

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 131 «Прикладна механіка»
на тему:
«Розробка верстата паралельної структури з ланками постійної довжини»
«Development of machine tool of parallel structure with of constant length struts»

Виконавець: здобувач вищої освіти 2 року
магістратури, групи ПМ-22М-3, напрямку 131
«Прикладна механіка»

Ігор МІЛАЙ

Керівник: доц., к.т.н.

Олександр СКІБІНСЬКИЙ

Рецензент: доц., к.т.н.

Андрій ТИХИЙ

Завідувач кафедри: доц., к.т.н.

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	131 Прикладна механіка
Освітньо-наукова програма	Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ММР
Андрій ГРЕЧКА

«____» _____ 2023 р.

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

Ігора МІЛАЯ

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Розробка верстата паралельної структури з ланками
постійної довжини

2. Керівник роботи: к.т.н., доц., Олександр СКІБІНСЬКИЙ

3. Строк подання роботи до захисту «12» січня 2024 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи:

Метою роботи є: є розробка та дослідження роботи трьохкоординатного верстата з ланками постійної довжини.

Завдання:

- проаналізувати існуючі конструкції верстатного обладнання з паралельною кінематикою;
- розробити конструкцію верстата на основі механізму паралельної структури ортоголайд;
- скласти розрахункові схеми та розрахувати зворотні кінематичні залежності механізму ортоголайд;
- провести аналіз кінематичних залежностей механізму ортоголайд;
- провести перевірочні розрахунки необхідних конструктивних елементів;
- виконати необхідні економічні розрахунки

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
РОЗДІЛ 1	Олександр СКІБІНСЬКИЙ		
РОЗДІЛ 2	Олександр СКІБІНСЬКИЙ		
РОЗДІЛ 3	Олександр СКІБІНСЬКИЙ		
РОЗДІЛ 4	Олександр СКІБІНСЬКИЙ		
РОЗДІЛ 5	Ірина ЖУРИЛО		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/ п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	При- мітка
1	ВСТУП	Жовтень 2023	вик.
2	РОЗДІЛ 1	Жовтень 2023	вик.
3	РОЗДІЛ 2	Жовтень 2023	вик.
4	РОЗДІЛ 3	Жовтень-листопад 2023	вик.
5	РОЗДІЛ 4	Листопад 2023	вик.
6	РОЗДІЛ 5	Листопад-грудень 2023	вик.
7	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	Грудень 2023	вик.
8	Графічна частина та оформлення	Грудень 2023	вик.

Дата видачі завдання « ____ » _____ 2023 р.

Керівник роботи _____ Олександр СКІБІНСЬКИЙ

(підпис)

Завдання прийнято до виконання « ____ » _____ 2023 р.

Здобувач _____ Ігор МІЛАЙ

(підпис)

Анотація

Ігор МІЛАЙ. Розробка верстата паралельної структури з ланками постійної довжини. Кваліфікаційна робота для освітнього ступеня «магістр»: ЦНТУ, 2024. – 85 с. Матеріали презентації 8 аркушів.

Метою роботи є розробка та дослідження роботи трьохкоординатного верстата з ланками постійної довжини.

Розглянувши основні схеми механізмів з паралельною кінематичною структурою, проаналізуємо можливість їх використання у верстатному обладнанні з трьома координатними переміщеннями робочого органу.

Очевидно, що для трьохкоординатної обробки можна застосувати трьохкоординатні механізми (трипод, триаглайд, дельта).

Схеми типу трипода та триаглайда вимагають додаткового застосування механізму орієнтації осі робочого органу.

Механізм ортоглайд дає змогу забезпечити робочий простір наближений за формою до куба, що безумовно є ще однією перевагою в порівнянні з іншими трьохкоординатними механізмами паралельної структури.

Актуальність: Верстат на основі механізму паралельної структури ортоглайд має ряд переваг, а саме: меншу матеріаломісткість конструктивних елементів, а відповідно і меншу інерційність та можливість забезпечення над швидких переміщень виконавчого органу, що підвищує продуктивність обробки.

В механізмі відсутні особливі положення, оскільки штанги при переміщенні не перетинають траєкторії одне одної.

Практичне значення: Розроблено 3D модель верстата, розраховано та проаналізовано зворотні кінематичні залежності, що дасть змогу керувати переміщеннями робочого органу.

Ключові слова: обладнання на основі механізмів паралельної структури, ортоглайд, зворотні кінематичні залежності, особливі положення.

Abstract

Ihor MILAI. Development of machine tool of parallel structure with of constant length struts. Master's Thesis: CNTU, 2024. - 85 p. Presentation materials 8 il.

The purpose of the work is to develop and study the operation of a three-coordinate machine with links of constant length.

Having considered the main schemes of mechanisms with a parallel kinematic structure, we will analyze the possibility of their use in machine tools with three coordinate movements of the working body.

The orthoglide mechanism makes it possible to provide a working space close in shape to a cube, which is definitely another advantage compared to other three-coordinate mechanisms of a parallel structure.

Relevance: A machine tool based on the orthoglide parallel structure mechanism has a number of advantages, namely: lower material consumption of structural elements, and, accordingly, lower inertia and the ability to ensure rapid movements of the executive body, which increases processing productivity.

There are no singularity in the mechanism, since the rods do not cross each other's trajectories when moving.

Practical significance: A 3D model of the machine tool has been developed, inverse kinematic dependencies have been calculated and analyzed, which will make it possible to control the movements of the working body.

Keywords: equipment based on parallel structure mechanisms, orthoglide, inverse kinematic dependencies, singularity.

ВСТУП.....	8
1. АНАЛІЗ КОМПОНОВОК ВЕРСТАТІВ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ	
КІНЕМАТИКОЮ	11
1.1. Передумови створення і функціональні можливості технологічного	
обладнання з паралельною кінематикою	11
1.2. Основні види та класифікація механізмів паралельної структури	15
1.3. Галузі використання механізмів паралельної структури	17
1.3.1. Аерокосмічна техніка	18
1.4. Аналіз існуючих конструкцій верстатного обладнання з паралельною	
кінематикою	25
1.5. Мета і задачі роботи	30
2. КОНСТРУКЦІЯ ТА ПРИНЦИП РОБОТИ ВЕРСТАТА НА ОСНОВІ	
МЕХАНІЗМУ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ОРТОГЛАЙД	32
2.1. Опис конструкції верстата	32
2.2. Принцип дії верстата	33
3. АНАЛІЗ КІНЕМАТИЧНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ МЕХАНІЗМУ	34
3.1. Основні положення.....	34
3.2. Зворотні кінематичні залежності	34
3.3. Аналіз кінематичних залежностей.....	41
4. КОНСТРУКТИВНИЙ РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ ВЕРСТАТА	46
4.1. Вибір шпинделя верстата	46
4.2. Розрахунок кулько-гвинтової передачі	46
4.2.1 Загальні відомості для розрахунку кулько-гвинтової передачі.....	46
4.2.2. Розрахунок гвинта на стійкість.	48
4.2.3. Визначення статичної вантажопід'ємності гвинта.	49
4.2.4. Розрахунок сили попереднього натягу в кулько-гвинтовій передачі.....	49
4.2.5. Розрахунок критичної частоти обертання гвинта.	50
4.3 Розрахунок підшипників кочення.....	52
5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ ВЕРСТАТА	57
5.1 Загальні вихідні дані.....	57
5.2 Конструкторська підготовка виробництва	58

5.3 Технологічна підготовка виробництва	60
5.4 Визначення собівартості та оптової ціни проектного верстата	62
5.5 Визначення експлуатаційних витрат, які припадають на одиницю продукції в базовому та проектному варіантах	66
5.6 Розрахунок показників економічної ефективності	71
5.7. Організаційно-планові розрахунки.....	74
ВИСНОВКИ	83
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	84

Глобалізація економіки та постійне зростання конкурентної боротьби за ринки збуту продукції обумовило розвиток та випуск в Україні машинобудівної багатомономенклатурної продукції на рівні світових аналогів, що вимагає від виробників створення швидко переналагоджуваною виробництва, гнучких технологічних систем, які мають властивість оперативно адаптуватися до нових умов виробництва. Гнучкі виробничі системи створюються на основі розробки та широкого впровадження нових високоефективних технологій (технологія синтезу 3-мірних об'єктів, нанотехнологія, біотехнологія, лазерна та оптична обробка) для реалізації яких необхідно побудувати високоефективне технологічне обладнання. Інтеграція у виробництво нових технологій обумовлює виготовлення продукції, спрямованої на зниження матеріале- та енергоємності виробів, покращення екології, а також соціально-економічної ситуації у суспільстві.

Існуюче технологічне обладнання, побудоване на основі традиційних структур приводів та компоновок, не задовольняє вимогам сучасної технології обробки, складання та контролю машин внаслідок визначених конструкторсько-технологічних та організаційно-функціональних недоліків:

- недостатня інтенсифікація режимів реалізації процесів
- обмежена кількість ступенів вільності виконавчих органів
- несиметрична компоновка більшості обладнання, неоднакова точність і жорсткість в різних координатних напрямках
- значні маси рухомих елементів обладнання
- значна номенклатура деталей та вузлів технологічної системи
- спеціалізація верстатів по видам обробки
- однофункціональність механізмів обладнання
- послідовна дія механізмів і кінематичних ланок

Використання механізмів послідовної дії (переміщеній виконавчого органу послідовно відносно осей координат) значно збільшує допоміжний час на виконання операції. Підвищує енергоємність технологічного обладнання однопоточність передачі рухів та навантажень (кожна кінематична ланка має тільки один тяговий елемент) внаслідок підвищення його жорсткості за рахунок підвищення матеріалоємності. Аналогічні наслідки має використання

малоконтактних передавальних механізмів (зубчасті, черв'ячні та рейкові передачі, які характеризуються незначним коефіцієнтом перекриття). Точність обробки залежить від кінематичної точності відповідних ланцюгів та зазорів у них, тому технологічне обладнання з досить довгими кінематичними ланцюгами, має недостатню для сучасного машинобудування точність

Основним напрямком автоматизації процесів гнучкого багатономенклатурного серійного виробництва, який задовольняє вимогам сучасної технології виробництва є створення агрегатно-модульного програмно-управляючого швидко-переналагоджуваного технологічного обладнання, побудованого на основі механізмів паралельної структури. Подібне технологічне обладнання слід розглядати не як удосконалення існуючих верстатних систем традиційної компоновки, а як матеріальне втілення нетрадиційного підходу до побудови технологічних процесів обробки, складання, випробування та вимірювання продукції, а також нових принципів конструювання сучасних верстатних систем. Технологічні можливості верстатних систем визначаються кінематичною структурою, компоновкою, конструктивним виконанням, рівнем автоматизації та технічною характеристикою.

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

Можливості технологічного обладнання з паралельною кінематикою надто широкі, вони можуть виконувати практично усі види робіт, пов'язаних з обробкою, складанням, випробуванням та контролем виробів. Виконуються різноманітні фрезерні операції, у тому числі послідовне фрезерування поверхонь, розташованих у різних площинах, під кутом або перпендикулярно, а також реалізуються майже усі операції по обробці творів (свердління, зенкерування, розгортання, колове фрезерування попередньо оброблених отворів, розташованих під різними кутами) у різних площинах та сторонах деталі.

Технологічні можливості подібного обладнання дозволяють розточувати отвори ступінчасті, конічні, фасонні, з канавками, а також підрізання торців в отворах розташованих під кутом за одну установку деталі.

Отже, технологічне обладнання з паралельною кінематикою має значно широкі технологічні можливості у порівнянні з традиційними верстатними системами, внаслідок їх побудови на принципово нових концепціях:

- використання багатофункціональних та багатопоточних стрижневих механізмів паралельної структури, що дозволяє за допомогою одного механізму виконувати транспортні, установчі та технологічні операції;

- застосування вбудованих високомоментних приводів та швидкодіючої обчислювальної техніки обумовлює управління технологічними переміщеннями виконавчого органу механізму та, крім того, компенсацію пружних переміщень під дією сил різання, чим забезпечує стійку роботу технологічної машини при нестійкому положенню механізмів;

- використання вбудованих систем контролю обумовлює створення технологічних систем з елементами штучного інтелекту, що дозволяє автоматизувати такі технологічні операції, які виконуються тільки людиною та вручну (обробка та виготовлення художніх виробів, граверні роботи та інші).

1. АНАЛІЗ КОМПОНОВОК ВЕРСТАТІВ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ

1.1. Передумови створення і функціональні можливості технологічного обладнання з паралельною кінематикою

Концепція гнучкого автоматизованого багатономенклатурного серійного виробництва вимагає нового підходу до проектування технологічних процесів, які мають специфічні особливості пов'язані з мінливим характером виробництва, швидким переналагоджуванням обладнання на випуск продукції іншої номенклатури, впровадженням програмно-управляемого технологічного обладнання та прогресивного інструменту. Автоматизація багатономенклатурного серійного виробництва є складним та багаторівневим процесом при якому повинен реалізуватися новий напрямок – створення гнучкого технологічного обладнання з широкими технологічними можливостями.

Існуюче технологічне обладнання, побудоване на основі традиційних структур приводів та компоновок, не задовольняє вимогам сучасної технології обробки, складання та контролю машин внаслідок визначених конструкторсько-технологічних та організаційно-функціональних недоліків

Сучасне технологічне обладнання класифікується по видам обробки (токарні, фрезерні та інші), що має історичні традиції, але не відповідає вимогам сучасної технології виробництва внаслідок багаторазового перебазування деталей та значної кількості транспортних міжопераційних процесів. Впровадження нових технологій вимагає застосовування технологічного обладнання з високим рівнем інтеграції операцій, що дозволяє виконувати комплекс різних технологічних методів (різноманітні види обробки, зварювання, фарбування, складання, випробовування, вимірювання тощо) на одному робочому місці за одну установку деталі.

Практично майже усі механізми та системи технологічного обладнання мають, в основному, тільки одне функціональне призначення (коробка швидкостей, коробка подач, механізм перетворення рухів та інші), тому для здійснення різних технологічних можливостей обладнання має досить насичену та складну побудову. Ускладнення функціональної структури зменшує надійність технологічного обладнання та збільшує його матеріало- та енергоємність, а також габаритні розміри.

Використання механізмів послідовної дії (переміщення виконавчого органу послідовно відносно осей координат) значно збільшує допоміжний час на виконання операції. Підвищує енергоємність технологічного обладнання однопоточність передачі рухів та навантажень (кожна кінематична ланка має тільки один тяговий елемент) внаслідок підвищення його жорсткості за рахунок підвищення матеріалоємності.

Традиційне технологічне обладнання, в основному, створювалось для конкретного методу обробки або процесу (токарні, свердлувальні, фрезерні, тощо), тому технологічні процеси також проектувалися з великою кількістю операцій, для виконання яких застосовувалися відповідні існуючі верстати. Такі технологічні процеси мають значний рівень диференціації обробки, що в більшості випадків не дозволяє підвищити продуктивність праці та забезпечити швидке переналагоджування технологічного обладнання на випуск деталей іншої номенклатури.

Основним напрямком автоматизації процесів гнучкого багатономенклатурного серійного виробництва, який задовольняє вимогам сучасної технології виробництва є створення агрегатно-модульного програмно-управляемого швидко-переналагоджуваного технологічного обладнання, побудованого на основі механізмів паралельної структури. Подібне технологічне обладнання слід розглядати не як удосконалення існуючих верстатних систем традиційної компоновки, а як матеріальне втілення нетрадиційного підходу до побудови технологічних процесів обробки, складання, випробування та вимірювання продукції, а також нових принципів конструювання сучасних верстатних систем.

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

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

Практична реалізація усіх схем формоутворення поверхонь деталей обумовлює основну властивість подібного обладнання – суміщення методів обробки та процесів з різним за фізичною природою технологічним впливом: лезову, абразивну, електрофізикохімічну обробку, пластичне деформування та зварювання, а також процеси складання машин, фарбування, випробування та вимірювання, що визначає значно більший рівень інтеграції операції у порівнянні з іншим технологічним обладнанням.

Таким чином, технологічне обладнання з паралельною кінематикою дозволяє органічно поєднати необхідну гнучкість з заданою продуктивністю виробництва, що задовольняє основним вимогам сучасного гнучкого автоматизованого багатомоделного виробництва.

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 отримання надвисоких швидкостей та прискорень виконавчого органу: частота обертання шпинделя досягає $120\,000\text{ хв}^{-1}$, а в окремих випадках майже $180\,000\text{ хв}^{-1}$ (при процесах шліфування) швидкість лінійних переміщень має величину до 100 м/хв , а прискорень – 50 м/с^2 .

Подібні режими переміщень виконавчих органів значно зменшують основний час виконання операцій та збільшують продуктивність обладнання.

На технологічному обладнанні з паралельною кінематикою передбачається автоматичне управління переходу з прискореного переміщення на уповільнене при наближенні відповідного інструменту до заданої координатної опорної точки та можливість чергування установчих та допоміжних переміщень та робочих подач виконавчого органу, що реалізується стандартними циклами виконання операцій.

Можливості технологічного обладнання з паралельною кінематикою надто широкі, вони можуть виконувати практично усі види робіт, пов'язаних з обробкою, складанням, випробуванням та контролем виробів.

Виконуються різноманітні фрезерні операції, у тому числі послідовне фрезерування поверхонь, розташованих у різних площинах, під кутом або перпендикулярно, а також реалізуються майже усі операції по обробці отворів (свердління, зенкерування, розгортання, колове фрезерування попередньо

оброблених отворів, розташованих під різними кутами) у різних площинах та сторонах деталі.

Технологічні можливості подібного обладнання дозволяють розточувати отвори ступінчасті, конічні, фасонні, з канавками, а також підрізання торців в отворах розташованих під кутом за одну установку деталі.

На технологічному обладнанні виконується обробка різноманітних отворів по різним циклам (свердління, зенкування, пекування, нарізання різьби). Слід відмітити, що мала міжцентрова відстань не обмежує процесу обробки, а отвори можуть бути розташовані на поверхнях заготовки у різних площинах, з різних сторін та під кутом.

Специфічною особливістю технологічного обладнання з паралельною кінематикою, що відрізняє його від традиційного обладнання є реальна можливість виконання складальних операцій, випробування та вимірювання виробів, які виготовляються на конкретному обладнанні. При цьому відсутні транспортні операції.

Подібне технологічне обладнання має практичну можливість виконання майже усіх складальних операцій, а саме: підготовчі (підготовка деталей, складальних одиниць та комплектуючих виробів до наступних операцій складання), допоміжні (змащування, маркування та інше), та складальні операції (технологічні операції по з'єднанню деталей у складальні одиниці, вузли та машини), а також обкатка, випробування та вимірювання складальних одиниць.

Під час виконання складальних операцій на перший план висуваються проблеми компенсації похибок взаємної орієнтації деталей та забезпечення надійного сполучення деталей, які вирішуються реалізацією точного позиціонування та орієнтації виконавчого органу з визначеною деталлю.

Отже, технологічне обладнання з паралельною кінематикою має значно широкі технологічні можливості у порівнянні з традиційними верстатними системами, внаслідок їх побудови на принципово нових концепціях:

- використання багатофункціональних та багатопоточних стрижневих механізмів паралельної структури, що дозволяє за допомогою одного механізму виконувати транспортні, установчі та технологічні операції;

- застосування вбудованих високомоментних приводів та швидкодіючої обчислювальної техніки обумовлює управління технологічними переміщеннями

виконавчого органу механізму та, крім того, компенсацію пружних переміщень під дією сил різання, чим забезпечує стійку роботу технологічної машини при нестійкому положенню механізмів;

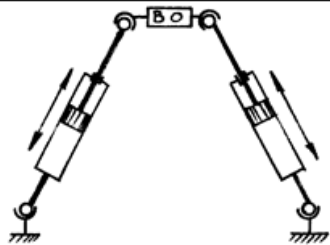
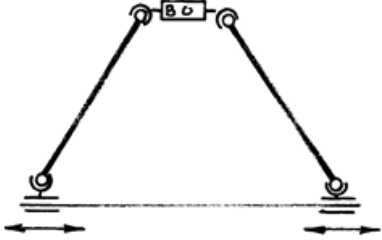
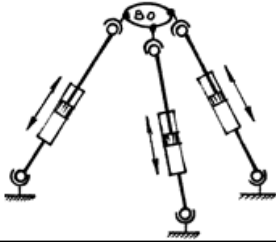
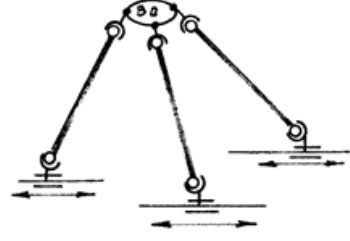
– використання вбудованих систем контролю обумовлює створення технологічних систем з елементами штучного інтелекту, що дозволяє автоматизувати такі технологічні операції, які виконуються тільки людиною та вручну (обробка та виготовлення художніх виробів, фінішна обробка турбінних лопостей, граверні роботи та інші).

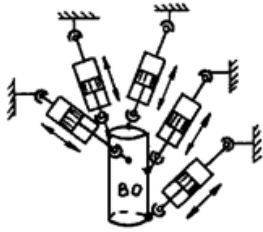
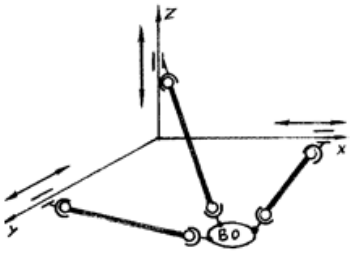
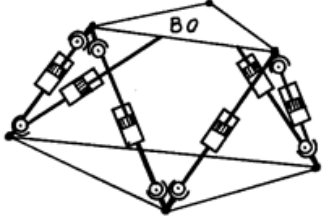
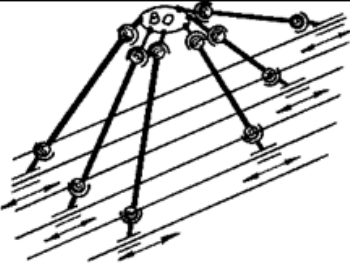
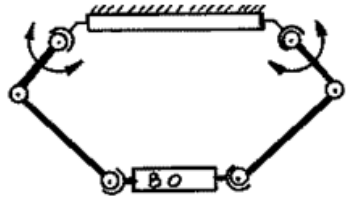
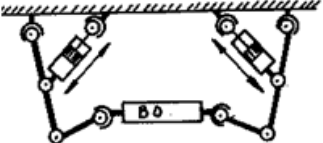
1.2. Основні види та класифікація механізмів паралельної структури

Відомі такі структурні схеми технологічного обладнання з паралельною кінематикою (Табл. 1.1)

Таблиця 1.1

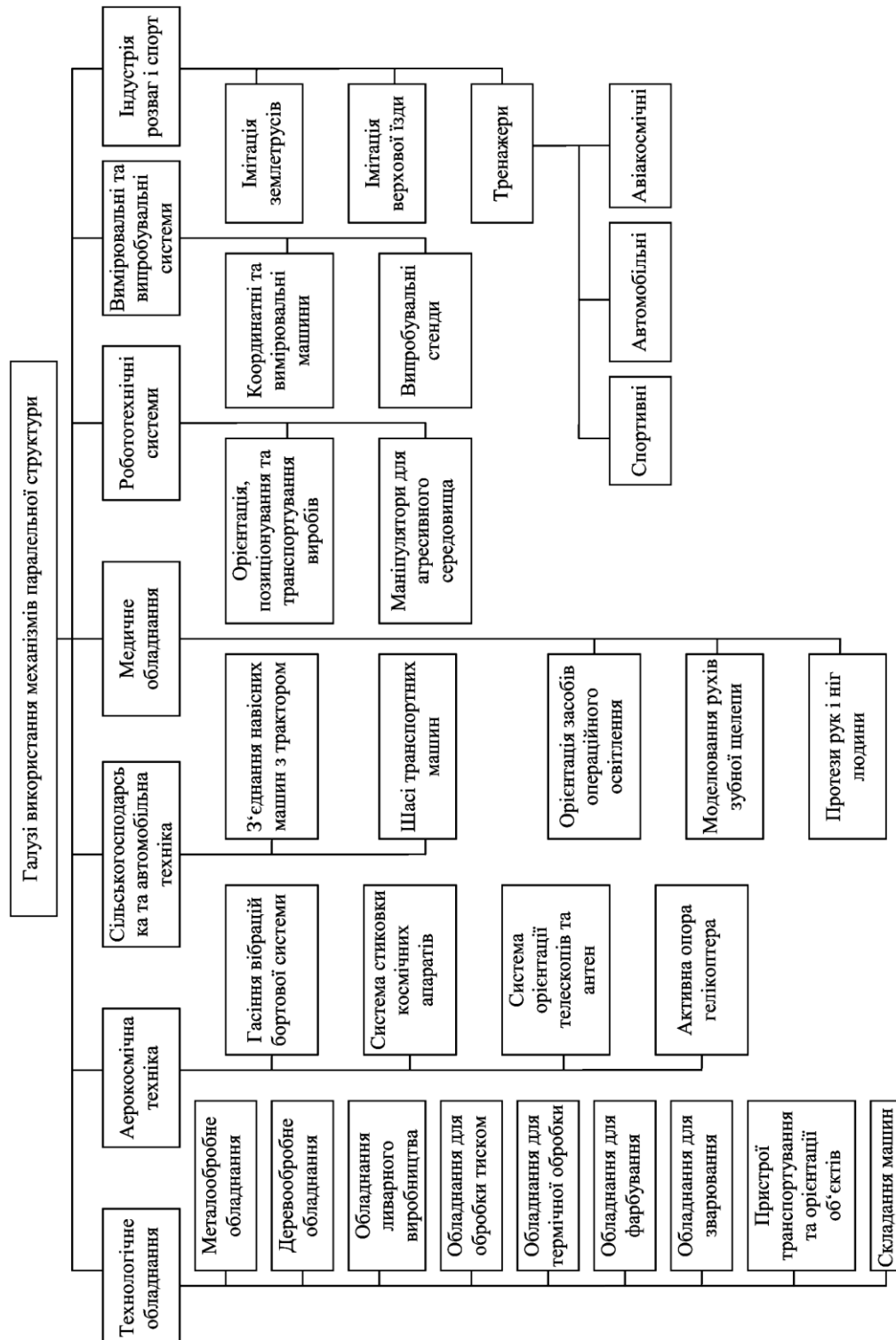
Основні типи механізмів паралельної структури

Визначення 1	Схема 2
Біпод – <u>двохкоординатний матеріалообробний верстат з паралельною кінематикою, побудований на основі кінематичного з'єднання двох штанг змінної довжини</u>	
Біглайд – <u>двохкоординатний матеріалообробний верстат з паралельною кінематикою, побудований на основі кінематичного з'єднання двох штанг постійної довжини, опорні шарніри яких переміщуються відносно напрямних</u>	
Трипод – <u>трьохкоординатний матеріалообробний верстат з паралельною кінематикою, побудований на основі кінематичного з'єднання трьох штанг змінної довжини</u>	
Тріаглайд – <u>трьохкоординатний матеріалообробний верстат з паралельною кінематикою, побудований на основі кінематичного з'єднання трьох штанг постійної довжини, опорні шарніри яких переміщуються відносно напрямних</u>	

Пентапод – <u>п'ятикоординатний матеріалообробний</u> верстат з паралельною кінематикою, побудований на основі кінематичного з'єднання трьох основних та двох додаткових штанг змінної довжини	
Ортоглайд – <u>трьохкоординатний матеріалообробний</u> верстат з паралельною кінематикою, побудований на основі кінематичного з'єднання трьох штанг постійної довжини з ортогональним розташуванням напрямних, відносно яких переміщуються опорні шарніри	
Гексапод – <u>шестикоординатний матеріалообробний</u> верстат з паралельною кінематикою, побудований на основі кінематичного з'єднання шести штанг змінної довжини	
Гексаглайд – <u>шестикоординатний матеріалообробний</u> верстат з паралельною кінематикою, побудований на основі кінематичного з'єднання шести штанг постійної довжини, опорні шарніри яких переміщуються відносно шести напрямних	
Дельта – <u>трьохкоординатний матеріалообробний</u> верстат з паралельною кінематикою, побудований на основі кінематичного з'єднання штанг, які виконані у вигляді <u>паралелограми</u> механізму, а перетворення рухів реалізується шляхом примусового обертання опорних шарнірів, змонтованих на нерухомому стаціонарному блоку	
Ножиці – <u>двохкоординатний матеріалообробний</u> 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 нерухомим елементами механізму	

1.3. Галузі використання механізмів паралельної структури

Просторові механізми почали інтенсивно застосовуватися у різних машинах, а найбільше у робототехнічних системах з початку 40-х рр. минулого століття разом з розвитком атомної енергетики. Радіоактивні матеріали, які використовуються у атомній енергетиці не дозволяють здійснити прямий контакт людини з такими матеріалами. Разом з тим значний об'єм наукових досліджень, задачі практичної експлуатації та ремонту ядерних реакторів, а також обслуговування машин та механізмів, розташованих у радіоактивній зоні вимагали участі людини.



Ці питання були вирішені впровадженням робототехнічних систем побудованих на основі просторових механізмів, які у минулому використовувались у деяких сільськогосподарських машинах, текстильній техніці, авіаційних двигунах та шасі та інших технологічних машинах, але широкого розповсюдження вони не отримали.

Механізми паралельної структури є принципово новим типом просторових механізмів, які складають окремий клас та отримали широке застосування у різних галузях господарства, а особливо у технологічному обладнанні.

1.3.1. Аерокосмічна техніка

Астрономічними центром ФІАН ім. С.П. Лебедева сформульовані вимоги до космічній обсерваторії XXI століття міжнародного проекту "Міліметрон", які передбачають створення космічних радіотелескопів з дзеркальними антенами лепесткового типу діаметром 12 м які утворюють з наземними телескопами інтерферометр "Земля-космос-космос". Точність поверхні дзеркала при всіх умовах експлуатації повинна бути не менше, як 20 мкм, а точність орієнтації та стабілізації космічного апарату та космічного радіотелескопу повинна бути не менше як 1 кутова секунда.

Запропонована концепція вирішення проблеми наведення дзеркала радіотелескопа передбачає створення системи механізмів, побудованих на основі механізмів паралельної структури. Космічний радіотелескоп (рис.1.1.) складається з антен 1, 2 та 8, опорної системи 3, фокального блоку 4, планетних датчиків 5, базової конструкції космічного апарату 6, сонячних батарей 7, перехідної ферми 9, яка побудована на основі механізму паралельної структури. Призначення перехідної форми полягає у забезпеченні шести ступенів вільності антен, що обумовлює надійну віброізоляцію бортових систем космічного апарату та високоточне наведення антен. Перехідна ферма 9 побудована по схемі "платформи Стюарта" та має рухомий та нерухомий елементи, шарнірно з'єднані з шістьма кінематичними ланками змінної довжини. Змінюючи довжину кінематичних ланок, можна отримати будь-яке задане положення антен.

Підготовка льотчиків і космонавтів в нашій країні та за кордоном здійснюється на тренажерах, які використовуються для імітації різних умов польотів літака або космічного апарату (рис.1.2, 1.3). Під час тренування відпрацьовуються навички управління апаратами.

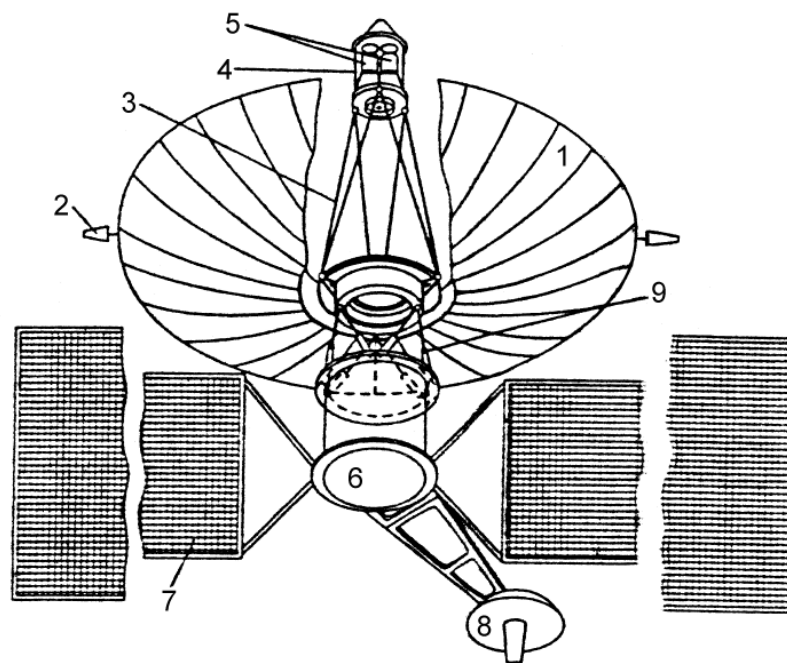


Рис. 1.1. Космічний радіотелескоп

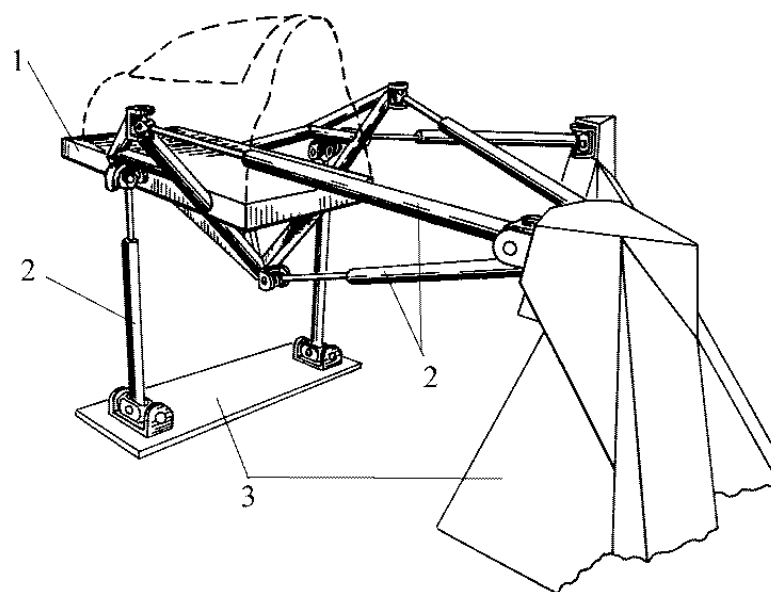


Рис. 1.2. Схема авіатренажера

Ще одна важлива проблема, яка виникає під час досліджень космічного простору – передача рухів крізь герметичну стінку з космічного апарату у вакуум вирішується за допомогою механізмів паралельної структури.

Штанги значної довжини проходять через стінку космічного апарату в місці розташування опорних сферичних шарнірів та зв'язують виконавчий орган, який

знаходиться ззовні, з приводами переміщень виконавчого органу розташованими в космічному апараті (рис. 1.3).

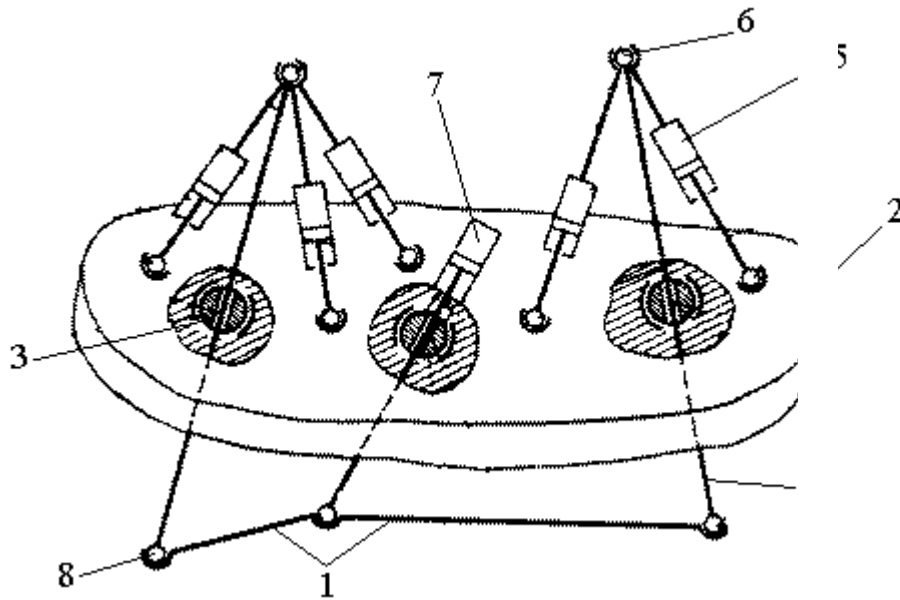


Рис. 1.3. Механізм паралельної структури для екстремальних середовищ

Механізм складається з виконавчого органу 1, який зв'язаний трьома стрижнями постійної довжини 4 з рухомими шарнірами 6. Стрижні проходять через герметичну стінку 2, у якій змонтовані три сферичні шарніри 3. Перше кінематичне з'єднання має три кінематичних ланцюги, які одним кінцем змонтовані на герметичній стінці, а другим – з рухомим шарніром 6, друге з'єднання має два кінематичних ланцюга аналогічного конструктивного виконання, а третє кінематичне з'єднання має тільки один кінематичний ланцюг, привод якого змонтований на герметичній стінці, а вихідний стрижень з'єднаний з виконавчим органом 1. Така кінематична структура механізму забезпечує три з'єднання стрижнів з рухомим виконавчим органом та три – з нерухомим елементом (герметичною стінкою), що підвищує жорсткість механізму. Задане положення виконавчого органу реалізується шляхом зміни довжини кожного кінематичного ланцюга 5 по відповідному закону.

Аналогічні механізми використовуються у хімічній промисловості для роботи у екстремальних середовищах.

Технологічне обладнання з паралельною кінематикою (рис. 1.4) призначене для одночасного контурного та об'ємного фрезерування різноманітних поверхонь у корпусах аерокосмічних апаратів.

Корпус апарату 2 установлюється на базові елементи технологічного обладнання. На нерухомому стаціонарному блоці 1 порталної конструкції встановлюється відповідна кількість фрезерних головок 3 з паралельною кінематикою, які одночасно виконують фрезерування різних отворів фасонної форми. Після закінчення обробки відповідної серії отворів, апарат переміщується вздовж напрямних для забезпечення обробки іншої серії отворів.

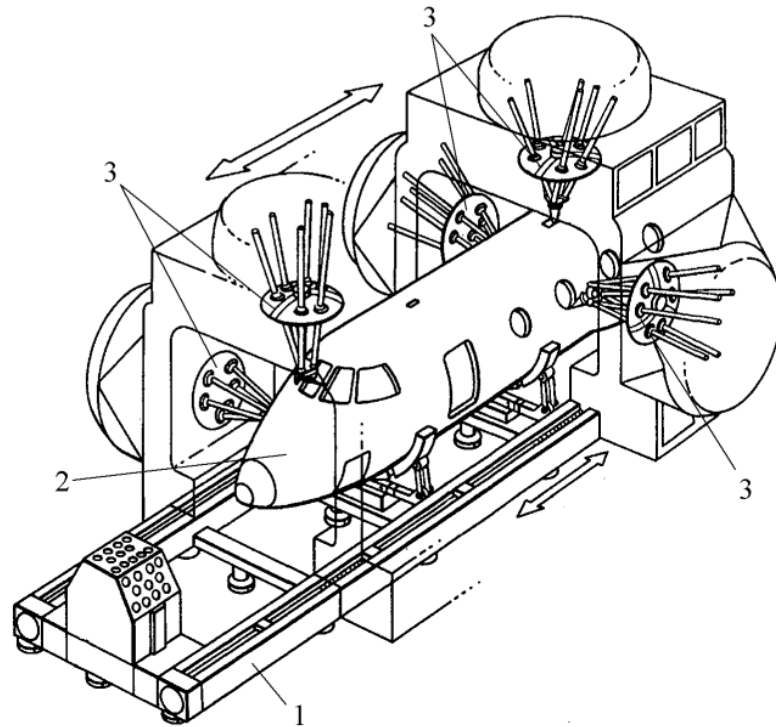


Рис. 1.4. Технологічне обладнання для фрезерування отворів корпусі аерокосмічного апарату

При дослідженні інших планет не завжди можна розрахувати на традиційні транспортні засоби оснащені колесами та гусеницями, які мають обмежену прохідність. Виникає проблема створення надійних самохідних транспортних засобів. Дослідним аерокосмічним центром США запропонована конструкція подібної шестиногої транспортної машини, побудованої на базі механізмів паралельної структури, але опис конструкції та їх технічна характеристика у літературних джерелах відсутні.

1.3.2. Транспортні засоби та сільськогосподарська техніка

Для з'єднання навісних машин з трактором та ходових коліс транспортного засобу з базовою конструкцією необхідно реалізувати вимоги щодо забезпечення

декількох ступенів вільності механізму з метою усунення або зменшення навантажень та вібрацій, що забезпечується застосуванням механізмів паралельної структури.

У лісовому та сільському господарствах, де транспортні засоби мають обмежену прохідність внаслідок перешкод та незадовільного стану ґрунту, є раціональним використання механізмів паралельної структури для з'єднання ходових коліс з базовою конструкцією транспортного засобу.

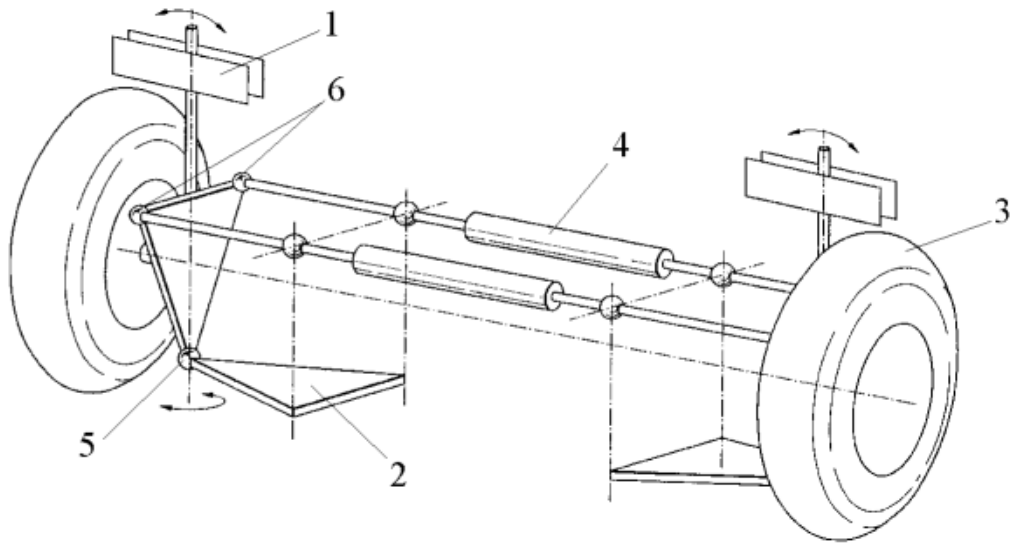


Рис. 1.5. Використання механізмів паралельної структури в автомобільних шасі

1.3.3. Медичне обладнання та електронна промисловість

У медицині відомі випадки, коли наслідком хвороби є психофізіологічні обмеження людини. Для таких випадків розробляють спеціальні робототехнічні системи. Для паралізованих хворих створені робототехнічні стопоходячі пристрої, які дозволяють рухатися по сходинкам, тротуарам з бордюрами. Такі стопоходячі пристрої реалізують стереотипний рух та алгоритм подолання перешкод.

Управління роботом з боку хворого реалізується вибором того чи іншого стереотипу, а у складних випадках він приймає управління кожним пристроєм самостійно. Такі пристрої повинні мати широкі функціональні характеристики, тому у цих випадках є доцільним використання механізмів паралельної структури. Інформація щодо конструкції подібних пристроїв та їх характеристик у літературних джерелах відсутня.

В ортопедії механізми паралельної структури використовують для фіксації поламаних кісток.

Механізми паралельної структури використовують при дослідженні рухів щелеп (рис. 1.6.).

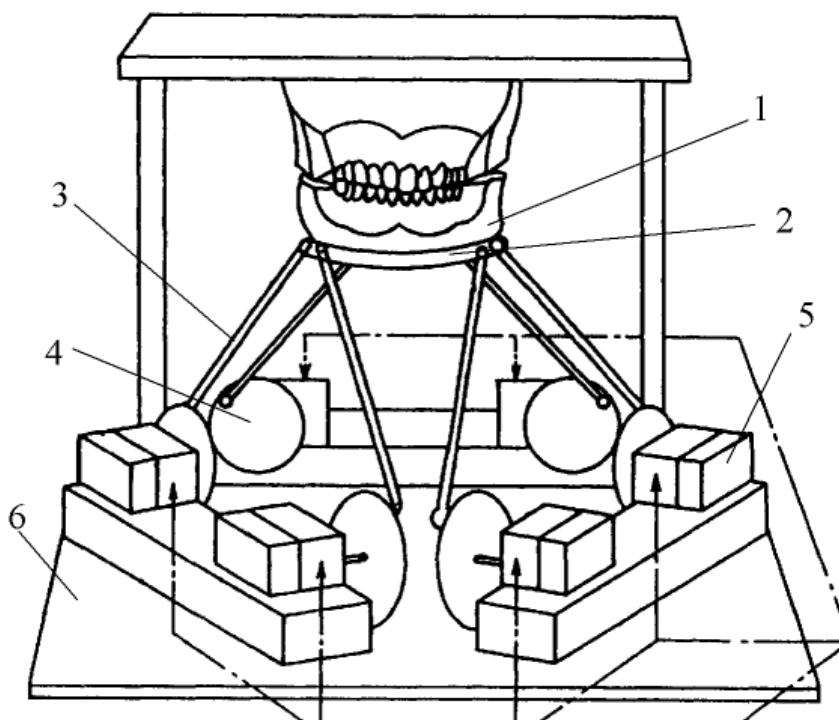


Рис. 1.6. Механізм для маніпулювання щелепами

Механізм складається з рухомого елемента 2, на якому встановлена нижня щелепа 1, нерухомого елемента 6, на якому змонтовані шість приводів, на вихідних валах яких напресовані диски 4. Рухомий елемент 2 шарнірно зв'язаний з приводними дисками кінематичними ланками постійної довжини. Верхня щелепа закріплена на верхній частині нерухомого елемента 6. Необхідні рухи нижньої щелепи при нерухомій верхній реалізуються зміною відстані між рухомим та нерухомим елементами шляхом обертання від приводів 5 приводних дисків 4 кожної кінематичної ланки по відповідному закону.

Хірургічні інструменти та засоби освітлення операційного столу повинні мати декілька ступенів вільності з метою їх наведення на відповідне місце проведення операції, що вирішується за допомогою використання механізмів паралельної структури.

Механізми паралельної структури використовуються в електронній промисловості та у галузі мікрохірургії з метою підвищення точності

позиціонування виконавчих органів, а також забезпечення максимального спрощення управління пристроями, де кожний привод впливає на переміщення виконавчого органу відносно визначеної вісі координат.

1.3.4. Робототехнічні та вимірювальні системи

Для транспортування, маніпулювання, орієнтації та позиціонування об'єктами призначені різноманітні за кінематичною структурою, компоновкою та конструктивним виконанням робототехнічні системи. Сучасні моделі маніпуляторів побудовані на основі 1-координатних механізмів паралельної структури, вихідний орган яких переміщується приводами, що регулюють відстань між заданими точками рухомої та нерухомої платформ. У таких робототехнічних системах шість ступенів вільності забезпечуються шляхом лінійних переміщень виконавчих кінематичних ланцюгів, реалізуючих відповідний закон руху.

У ІМАШ ім. А.А. Благонравова створений 1-координатний робот з 24 ступенями вільності, який складається з чотирьох однотипних модулів та має можливість виконувати різноманітні технологічні операції внаслідок високої маневреності. Робот має послідовну осьову компоновку модулів. При дискретних приводах робот має 224 положень в просторі.

Механізми паралельної структури використовуються для ручного управління робототехнічними системами, в тому числі тими, що мають паралельну структуру.

Сучасний розвиток машинобудування висуває нові задачі автоматизації процесів контролю, що обумовлює значне зростання швидкодії координатно-вимірювальних машин та забезпечення високих маніпуляційних властивостей. Роботи з паралельною кінематикою увійшли у міжнародну класифікацію.

1.3.5. Спортивні тренажери та індустрія розваг

Механізми паралельної структури почали широко використовувати у спортивних тренажерах та механізмах атракціонів індустрії розваг.

У тренажерному стенді "рухомий кінь" застосовується механізм, побудований на основі платформи Стюарта, який забезпечує імітацію верхової їзди та підвищує ефективність тренувань за рахунок можливості вибору різних режимів, характерних для класичних дисциплін кінного спорту.

Для індустрії розваг запропоновані оригінальні атракціони, що імітують умови землетрусу та устанавлюються у парках відпочинку. Платформа, на якій розташовані крісла, має шість ступіней вільності, які реалізуються механізмом паралельної структури. Управління рухами, що утворюють специфічні умови землетрусу, здійснюється від ЕОМ по заданій програмі.

1.4. Аналіз існуючих конструкцій верстатного обладнання з паралельною кінематикою

Розглянемо деякі існуючі конструкції верстатів з паралельною кінематикою [3]

Компоновки технологічного обладнання з паралельною кінематикою типу «дельта» з'явилися на початку 80-х років.

У 1987 р. проф. Раймонд Клавель, керівник лабораторії паралельної робототехніки університету Лозани (Швейцарія), запатентував оригінальну конструкцію механізму паралельної структури, який отримав назву «дельта» (рис. 1.7)

Характерною особливістю такого механізму є застосування паралелограмних конструкцій, які складаються з двох попарно-паралельних шарнірно з'єднаних штанг постійної довжини, одним кінцем з'єднаних з рухомою платформою (виконавчим органом), а іншим – з приводом. Три такі паралелограмні кінематичні ланки забезпечують три ступені вільності виконавчому органу.

В цих механізмах приводи переміщень кінематичних ланок розміщені на нерухомій несучій системі, що обумовлює значне зменшення рухомих мас механізму та дозволяє їм досягти величини прискорень до 50 м/с^2 (в експериментальних моделях) та $10\text{-}12 \text{ м/с}^2$ (у виробничому технологічному обладнанні).



Рис. 1.7. Робот типу «дельта» мод. FlexPicker IRB 340

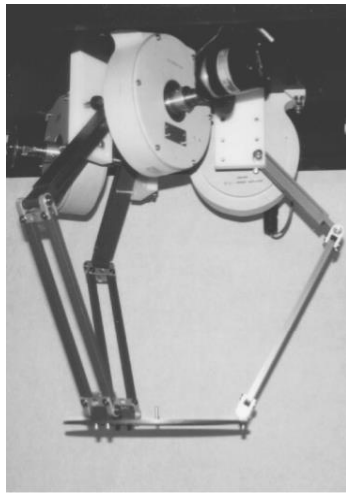
Крім того, кінематичні ланки механізму у вигляді паралелограмів забезпечують точну орієнтацію виконавчого органу у просторі, а технологічне обладнання побудоване на основі використання подібних механізмів має найпростішу форму робочого простору – циліндр.

Наведені властивості механізмів «дельта» обумовили їх інтенсивний розвиток за останні двадцять років.

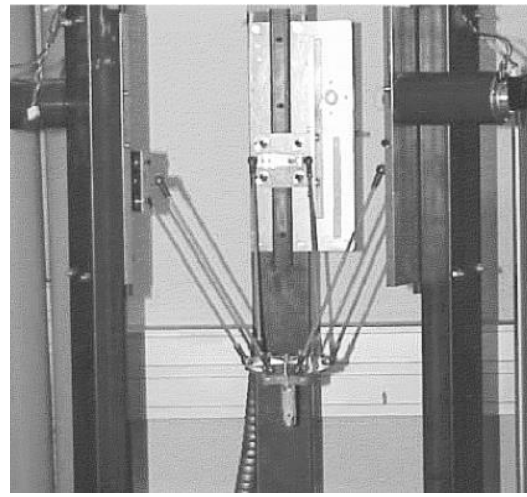
Створенням та дослідженням подібних механізмів займаються виробничі фірми та наукові лабораторії університетів Мічігану, Мериленду, Генуї, Цюриха, Австрії, Токію, Лозани та багато інших, які запропонували більш як 30 варіантів різних за конструктивним виконанням механізмів паралельної структури «дельта».

Аналіз існуючих механізмів «дельта» показує, що усі вони підрозділяються на дві групи: з приводами обертальної дії (рис. 1.8, а) та з лінійними приводами (рис. 1.8, б).

Механізми паралельної структури «дельта» з приводами обертальної дії (рис. 1.8, а) складаються з нерухомого елемента, на якому змонтовані відповідні приводи, рухомого виконавчого органу, які з'єднані кінематичними ланками у вигляді паралелограмів. При паралельному функціонуванні приводів кожний опорний шарнір та з'єднаний з ним паралелограмний механізм змінюють своє кутове положення, що обумовлює переміщення виконавчого органу механізму в просторі.



а



б

Рис. 1.8. Механізми «дельта» з обертальним (а) та поступальним (б) приводами

Механізми «дельта» з приводами поступальної дії (рис. 1.8, б) значно складніші за конструктивним виконанням, ніж механізми з приводами обертального руху внаслідок використання напрямних, які мають різноманітні положення у просторі. Рух виконавчого органу здійснюється при переміщенні опорних шарнірів вздовж напрямних.

Різне розташування напрямних у просторі обумовлюється технологічними задачами та визначеною формою та розмірами робочого простору [4].

Дельтапод (рис. 1.9) представляє собою комбінацію відомого механізму «дельта» і принципів роботи «гексапода». Він складається з трьох пар паралельно з'єднаних циліндрів, що формують штанги машини. В результаті отримано – дуже компактну але потужну машину, яка може сприймати досить великі навантаження, що в чотири рази перевищують його власну масу.

Вперше нова машина була використана в гнучкому автоматизованому виробництві, зокрема на підприємствах автомобільної промисловості. Чотири або більше механізмів дельтапод влаштовуються на лінійному треку і утримують корпус автомобіля, орієнтуючи його у просторі при зварювальних операціях під відповідними кутами нахилу. При цьому, рухаючись по треку, дельтаподи можуть підлаштовуватися під будь-яку модель автомобіля. Така конструкція отримала назву FlexPLP (рис. 1.10).

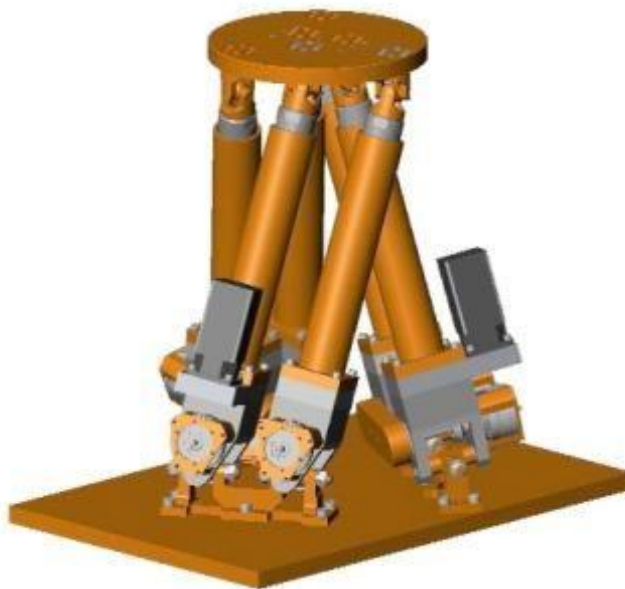


Рис. 1.9. Модель дельтапода

З тих пір, як механізм став потребувати лише 3-х ступеней свободи, застосування 6-ти приводів (як у «комах»), стало недоцільним. Тому, було винайдено і запатентовано механічне з'єднання, між циліндрами, яке управляється парою циліндрів, з'єднаними з двигуном. Один дельтапод потребує лише трьох двигунів, як і механізм «дельта». Це зменшує вартість підсилювача та диспетчера. Автоматичний диспетчер скорочує вартість на стороні підсилювача і диспетчера — автоматичний диспетчер IRC5 може управляти дванадцятьма трьох координатними машинами.



Рис. 1.10. Конструкція FlexPLP в дії

Роботи ELAU P3 та Der PacDrive P3 (рис. 1.11) є представниками трьохкоординатних роботів «дельта». Робот ELAU P3 (рис. 1.11, а), має інтегровану вісь обертання, що надає йому четверту ступінь вільності.

Завдяки вдалій структурі, механізм має значні динамічні характеристики під навантаженням. Швидкість може досягати 130 циклів за хвилину при навантаженні в 1000 м/с^2 .



а)



б)

Рис. 1.11. Робот ELAU P3 (а) та робот Der PacDrive P3 (б)

Ортоглайд (рис. 1.12) ще один цікавий представник трьохкоординатних механізмів. Головним показником якого є відносно гомогенні кінематичні залежності в корисному робочому просторі.

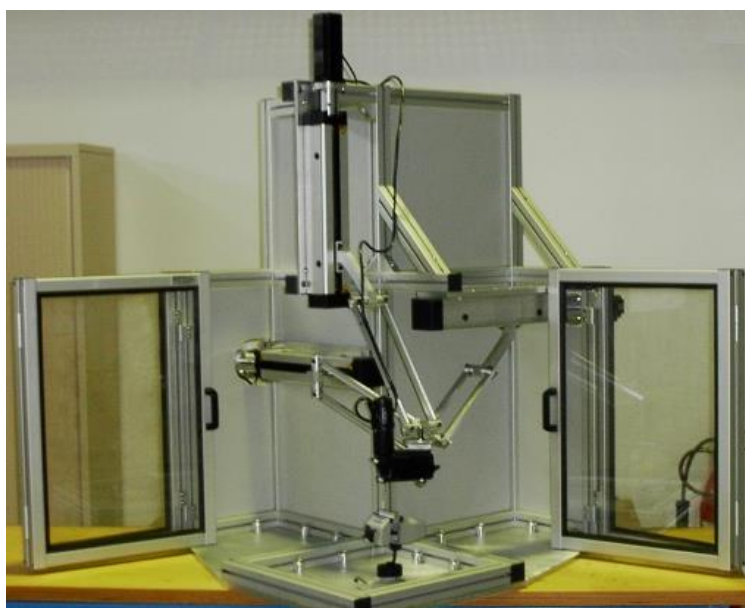


Рис.1.12. Робот Ортоглайд

Кінематична структура ортоглайда включає штанги постійної довжини, які з'єднані з виконавчим органом та трьома приводами, що рухаються по напрямних, закріплених на основі та розташованих у різних площинах. Штанги, виконані у вигляді паралелограмів отримують лише рух переміщення, завдяки чому і приводять в дію механізм. Такий зв'язок називається ортогональним.

1.5. Мета і задачі роботи

Задача поставлена в дипломній роботі полягає у розробці трьохкоординатного верстата з ланками постійної довжини.

Розглянувши основні схеми механізмів з паралельною кінематичною структурою, проаналізуємо можливість їх використання у верстатному обладнанні з трьома координатними переміщеннями робочого органу.

Очевидно, що для трьохкоординатної обробки можна застосувати трьохкоординатні механізми (трипод, триаглайд, дельта) або двохкоординатні (біпод, біглайд, лямбда) з додатковим лінійним приводом третьої координати, але це вже обладнання з комбінованою кінематичною структурою.

Схеми типу трипода та триаглайда вимагають додаткового застосування механізму орієнтації осі робочого органу.

Крім того, всі перелічені механізми на відміну від ортоглайда, за певних умов можуть мати особливі положення. В ортоглайда немає особливих положень, тобто положень, в яких втрачається керованість механізмом. Як зазначалося вище, відсутність таких положень обумовлена тим, що штанги при переміщенні не перетинають траєкторії одне одної.

Механізм ортоглайд дає змогу забезпечити робочий простір наближений за формою до куба, що безумовно є ще однією перевагою в порівнянні з іншими трьохкоординатними механізмами паралельної структури.

В якості базового прийнято верстат традиційної компоновки, в порівнянні з яким, верстат на основі механізму паралельної структури ортоглайд має ряд переваг, а саме: меншу матеріаломісткість конструктивних елементів, а відповідно і меншу інерційність та можливість забезпечення над швидких переміщень виконавчого органу, що підвищує продуктивність обробки.

В механізмі відсутні особливі положення, оскільки штанги при переміщенні не перетинають траєкторії одне одної. Докладний кінематичний аналіз ортоглайду провели Вегнер і Чаблат в 2000 році і визначили, що робочий простір ортоглайда наближений за формою до куба (рис. 1.13).

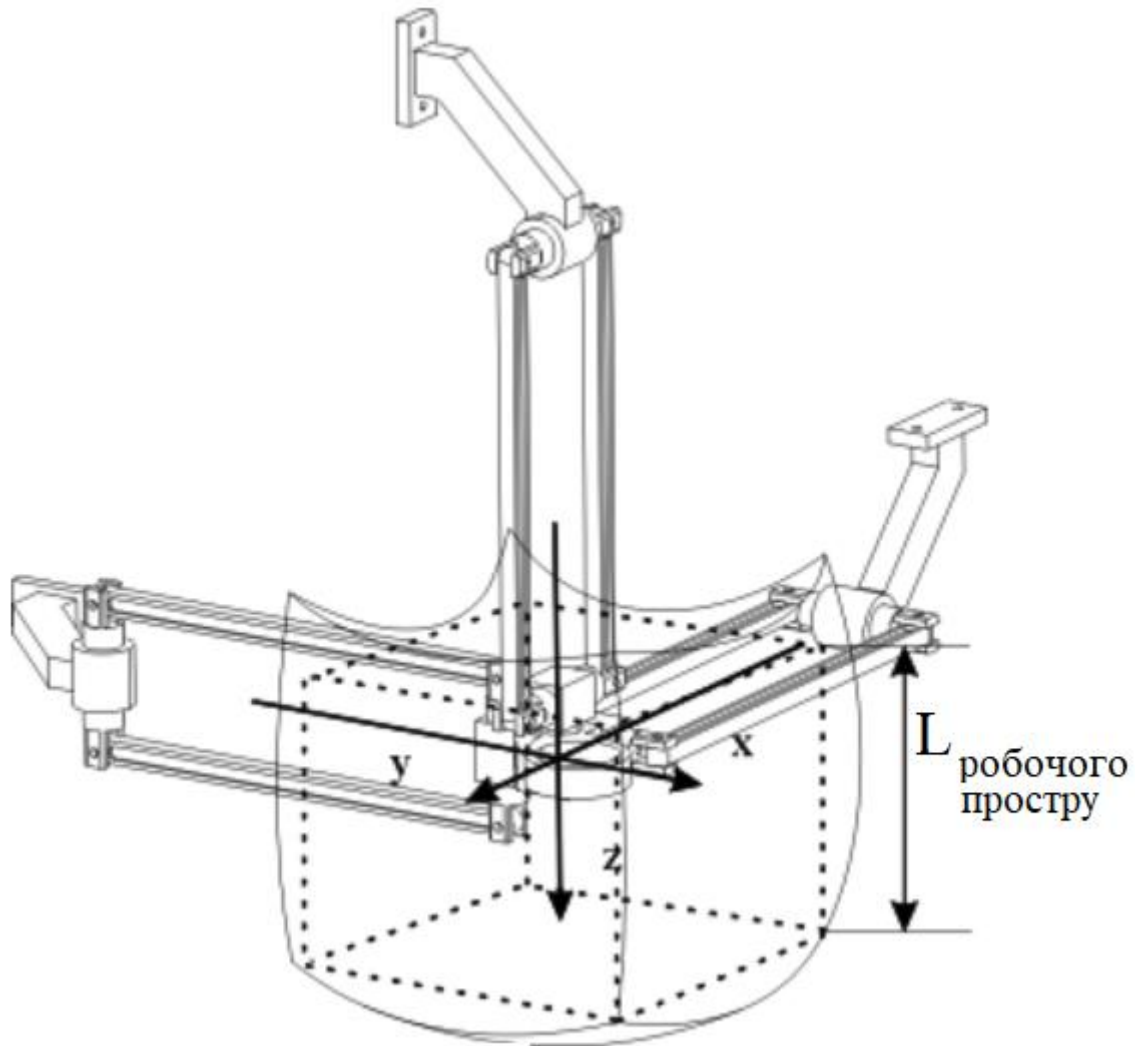


Рис. 1.13. Робочий простір ортоглайда

2. КОНСТРУКЦІЯ ТА ПРИНЦИП РОБОТИ ВЕРСТАТА НА ОСНОВІ МЕХАНІЗМУ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ОРТОГЛАЙД

2.1. Опис конструкції верстата

Розроблена тривимірна модель трьохкоординатного верстата паралельної структури з ланками постійної довжини зображена на рис.2.1.

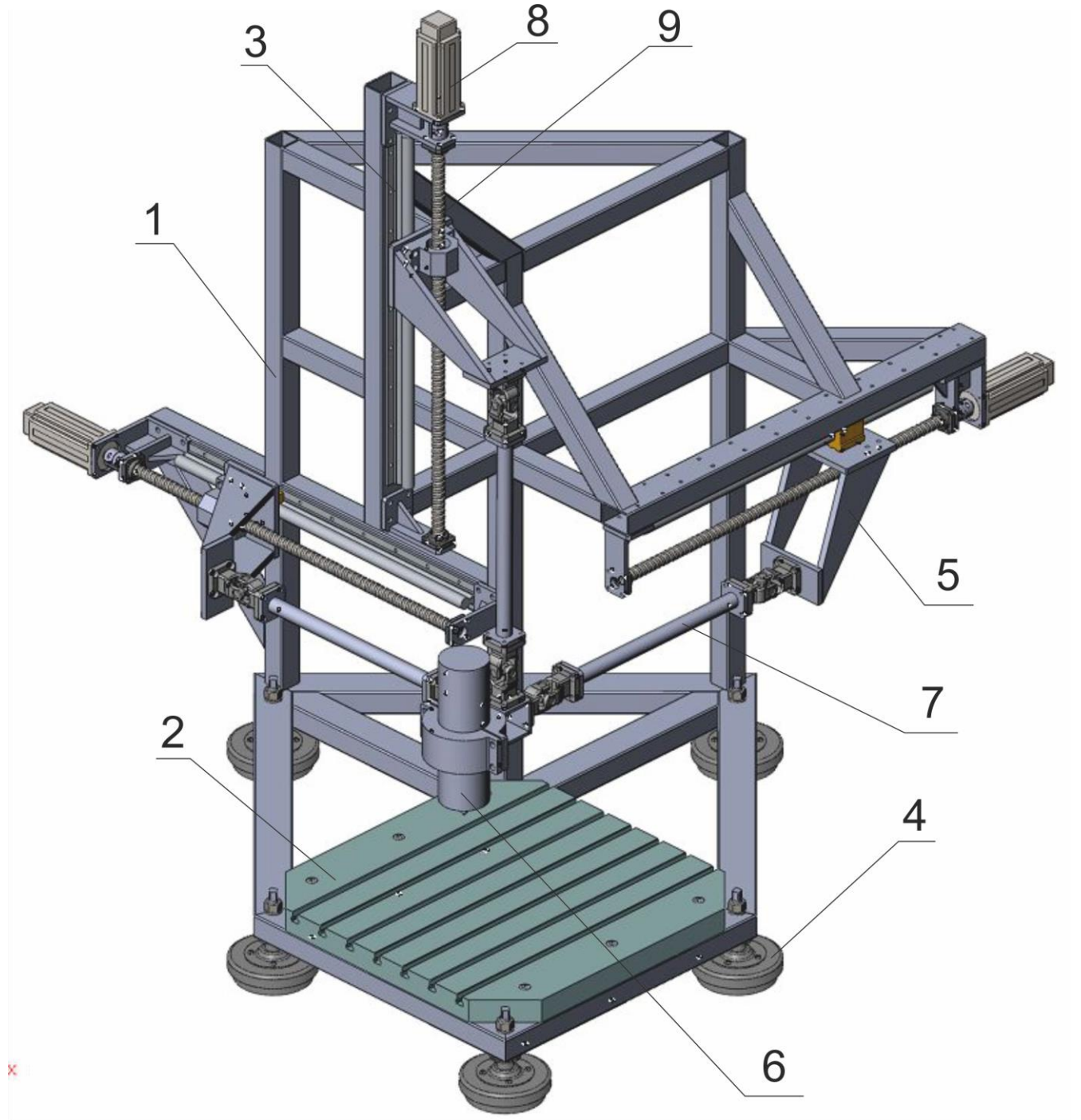


Рис.2.1. Модель трьохкоординатного верстата паралельної структури з ланками постійної довжини

Верстат містить основу, яка складається зі зварної рами 1, розміщеного на ній столу 2, напрямних рейок 3 та віброопор 4. Напрямні рейки встановлені на

раму ортогонально, тобто взаємоперпендикулярно. По напрямним рухаються повзуни 5, які шарнірно зв'язані зі шпиндельним вузлом 6 за допомогою штанг постійної довжини 7

2.2. Принцип дії верстата

Працює верстат наступним чином. Заготовка, що оброблюється, встановлюється і закріплюється на столі 2. Потім вмикаються приводи, які забезпечують шпиндельному вузлу 6 рухи формоутворення. Починається процес обробки.

Регульовані електродвигуни 8 за допомогою кулько-гвинтових передач 9 надають повзунам 5 взаємоузгоджені переміщення вздовж осей X, Y та Z по напрямним кочення 3. Шарнірне з'єднання повзунів 5 за допомогою штанг постійної довжини 7 зі шпиндельним вузлом 6 дає можливість останньому переміщуватись над столом 2 по координатам X, Y та Z.

Таким чином, конструкція розробленого верстата на основі механізму паралельної структури ортоголайд вирішує задачу зменшення інерційності рухомих елементів та матеріаломісткості в цілому.

Запропонована компоновка може знайти широке застосування в металообробних верстатах.

Технічна характеристика верстата

Частота обертання шпинделя, об/хв	5000...15000
Загальна потужність приводів, кВт	4
Габаритні розміри робочої зони верстата, мм:	
довжина	500
висота	500
ширина	500
Швидкість переміщення по осям X,Y,Z, м/хв.	60
Прискорення осей X,Y,Z, м/с ²	10
Габаритні розміри верстата, мм:	
довжина	1500
висота	1650
ширина	1500
Маса верстата, т	0,4

3. АНАЛІЗ КІНЕМАТИЧНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ МЕХАНІЗМУ

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)

Просторові координати робочого органа у загальному випадку представляють собою вектор узагальнених координат, що задає положення та орієнтацію робочого органа, а координати приводів звичайно задаються у вигляді вектора, що містить положення кожного приводу.

3.2. Зворотні кінематичні залежності

Кінематика ортоглайда показана на Рис. 3.1. Це складові трьох ідентичних кінематичних ланцюгів, які формально описуються як $PRPaR$, де P , R і Pa означають призматичний, повторно витий, і шарніри паралелограма відповідно. Є три приводи, які приводять в дію ортогональні призматичні шарніри. Тіло (з інструментом) з'єднується з призматичними шарнірами через набір трьох кінематичних ланцюгів. Усередині кожного ланцюга, один паралелограм використаний і орієнтований так, що тіло обмежене лише до перевідних переміщень. Аранжування шарнірів в ланцюгах $PRPaR$ було визначене, щоб виключити будь-яку реакцію зв'язку в Декартовій робочій області.

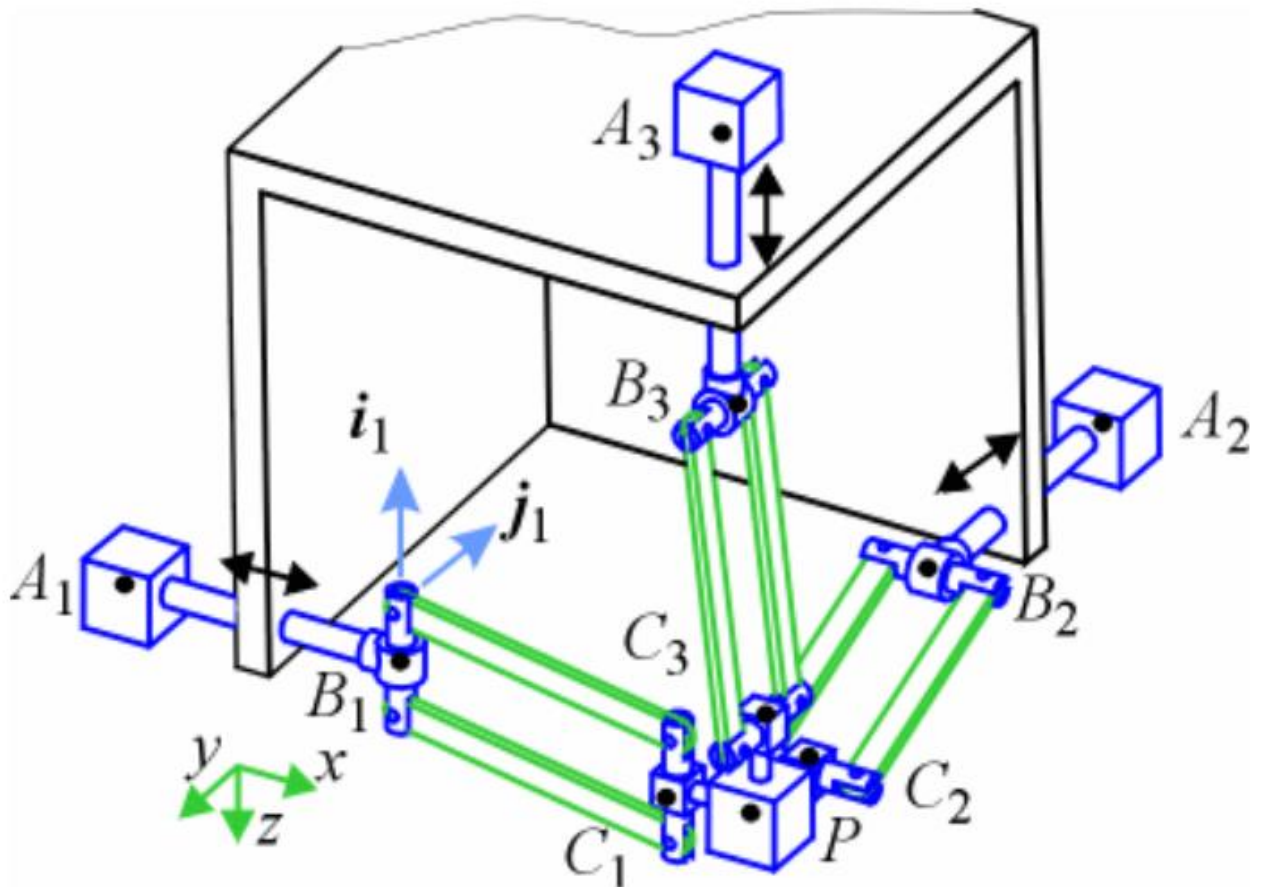


Рис. 3.1. Розрахункова схема ортоглайда.

Щоб отримати кінематичні вирівнювання ортоглайда, розміщують довідковий корпус в пересіченні призматичних об'єднаних координат і вирівнюють координатну вісь з ними (Рис. 3.2.), дотримуючись правила "правої руки". Позначимо також вхідний вектор призматичних змінних шарнірів як $\rho = (\rho_x, \rho_y, \rho_z)$ і вектор позиції вихідних відгуків centre пункту інструменту, як $p = (p_x, p_y, p_z)$. Зважаючи на очевидні властивості паралелограмів, геометрична модель ортоглайда може бути представлена в спрощеній формі, яка зв'язується сполучено сферичними шарнірами до центру інструменту в одній стороні і до призматичних шарнірів передачі в іншій стороні. Використовуючи це позначення, кінематичні вирівнювання ковзання можуть бути написані як вказано нижче:

$$\begin{aligned}
 (p_x - \rho_x)^2 + p_y^2 + p_z^2 &= L^2 \\
 p_x^2 + (p_y - \rho_y)^2 + p_z^2 &= L^2 \\
 p_x^2 + p_y^2 + (p_z - \rho_z)^2 &= L^2
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

де L - довжина паралелограма "Нульова" позиція $p_0 = (0,0,0)$ відповідає змінні шарнірів $\rho_0 = (L, L, L)$, (Рис. 3.3).

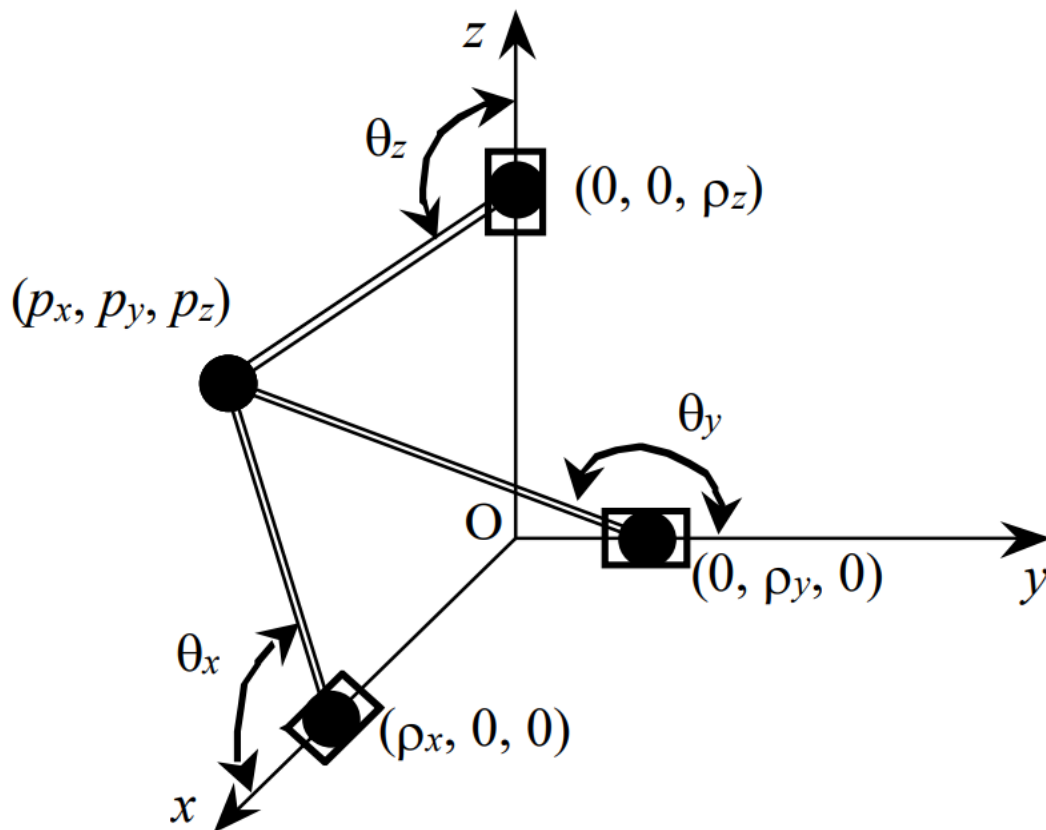


Рис. 3.2. Геометрична модель

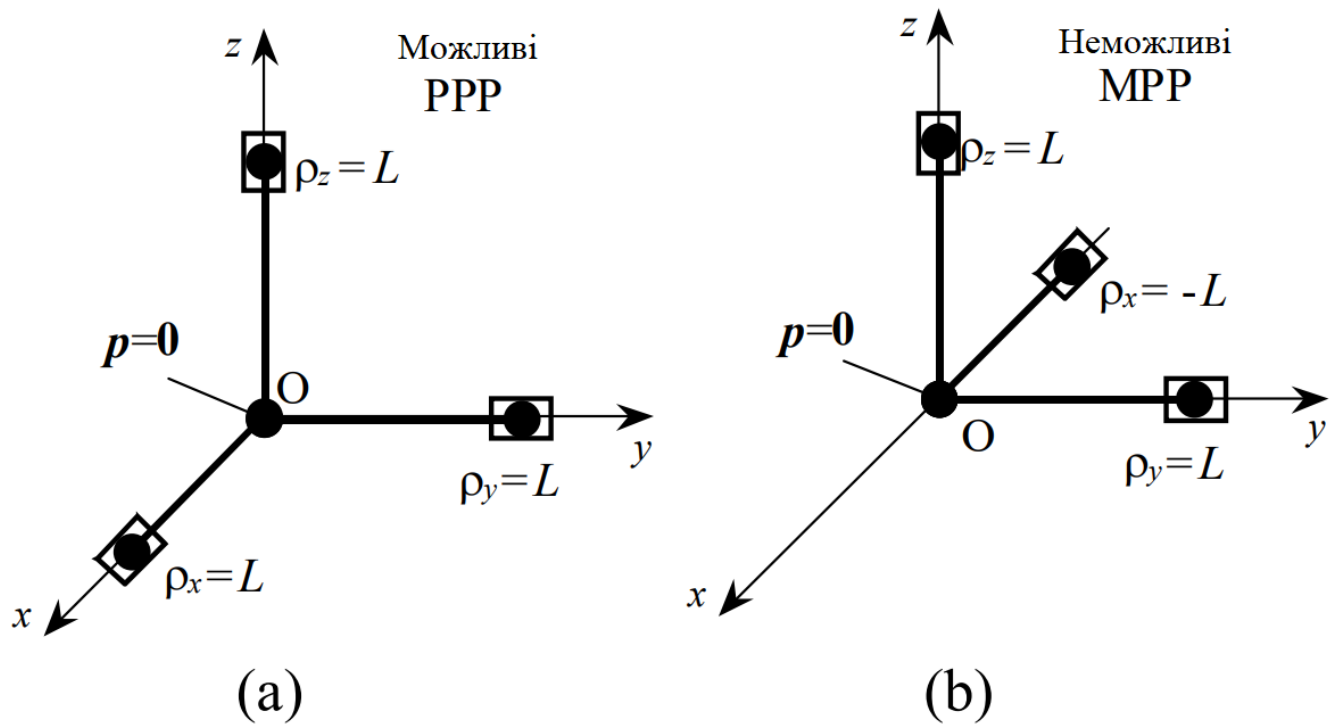


Рис.3.3. Можливі і неможливі «нульові» конфігурації

Наступні обмеження

$$0 < \rho_x \leq 2L ; 0 < \rho_y \leq 2L ; 0 < \rho_z \leq 2L, \quad (2)$$

які по суті впливають на форму робочої області. Верхня границя ($p < 2L$) і нижня ($p > 0$).

Для зворотної кінематики, позиція кінцевої точки (ρ_x, ρ_y, ρ_z), мета – знайти об'єднані змінні (ρ_x, ρ_y, ρ_z). Розраховуючи зворотну кінематику є декілька рішень, відповідних тій же локалізації інструменту, рішення мають бути відносно "гілки" алгоритму. Наприклад, якщо мета – виробляти послідовність пунктів до пересування інструмент уздовж дуги, треба уникати перемикання, що відгалужується, протягом руху, яке, можливо, викликає неефективні (або навіть неможливі) рухи маніпулятора. Від геометричної моделі (1) ортоглайда, зворотні кінематичні вирівнювання можуть бути виведені, як:

$$\begin{aligned}
\rho_x &= p_x + s_x \sqrt{L^2 - p_y^2 - p_z^2} \\
\rho_y &= p_y + s_y \sqrt{L^2 - p_x^2 - p_z^2} \\
\rho_z &= p_z + s_z \sqrt{L^2 - p_x^2 - p_y^2}
\end{aligned} \tag{3}$$

де s_x, s_y, s_z - індекси, які дорівнюють ± 1 . Вісім різних гілок зворотного кінематичного алгоритму, який буде надалі РРР, МРР...МММ, наступний за знаком відповідного коефіцієнта (тобто зображення знаками МРР відповідає індексам $s_x = -1; s_y = +1; s_z = +1$).

Геометричне значення цих індексів пояснює Рис. 2.3, де $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ - кути між осями передачі руху. Це може бути доведено це $s = 1$, якщо $\theta \in (90^\circ, 180^\circ)$; $s = -1$, якщо $\theta \in (0^\circ, 90^\circ)$. Переміщення ($\theta = 90^\circ$), що розглядається, відповідає порядковій оригінальності (де штанга ортогональна до відповідної привідної вісі і вхідний об'єднаний рух не є кінцевою точкою).

Очевидно, що, якщо зворотне кінематичне рішення існує, то цільовий пункт (p_x, p_y, p_z) належить до об'єму, зв'язаного пересіченням трьох циліндрів

$$C_L = \left\{ \mathbf{p} \mid p_x^2 + p_y^2 \leq L^2; p_x^2 + p_z^2 \leq L^2; p_y^2 + p_z^2 \leq L^2 \right\} \tag{4}$$

це гарантує позитивні значення під квадратним коренем в (3). Проте, це не достатньо, оскільки нижчі об'єднані межі (2) накладають додаткові обмеження, які скорочують вибір потенційного рішення.

$$\begin{aligned}
p_x &> -s_x \sqrt{L^2 - p_y^2 - p_z^2}; \\
p_y &> -s_y \sqrt{L^2 - p_x^2 - p_z^2}; \\
p_z &> -s_z \sqrt{L^2 - p_x^2 - p_y^2},
\end{aligned} \tag{5}$$

Наприклад, може бути легко обчислено, що для робочої області "Нуль" $p_0 = (0,0,0)$, зворотні кінематичні рівняння (3) дають вісім рішень $m \mathbf{p} = (\pm L, \pm L, \pm L)$ але лише одне з них виконується, як показано на рис. 2.4.

При детальному розгляді впливу перетину об'єднаних обмежень, нерівностей (5), та для підведення підсумів результатів для всіх можливих комбінацій трьох індексів конфігурацій, прийнемо, що $s_x = 1$, потім розглянемо два випадки, $p_x > 0$ і $p_x < 0$,

$$W_L^{+x} = \{\mathbf{p} \in C_L \mid p_x > 0\} \cup \{\mathbf{p} \in C_L \mid p_x \leq 0; p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 < L^2\}, \quad (6)$$

Якщо $s_x = -1$, то другий випадок $p_x < 0$ не дає жодного рішення і об'єднана реакція зв'язку $p_x > 0$ виражається в робочій області, як

$$W_L^{-x} = \{\mathbf{p} \in C_L \mid p_x \geq 0; p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 > L^2\}. \quad (7)$$

Останнє визначає тіло, зв'язане трьома циліндричними поверхнями і сферою.

Потім, знаходимо перетин отриманих наборів для різних комбінацій індексів конфігурацій. Може бути легко доведено, що "PPP" випадкові прибутки.

$$W_L^{PPP} = \{\mathbf{p} \in C_L \mid p_x, p_y, p_z > 0\} \cup \{\mathbf{p} \in C_L \mid p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 < L^2\} \quad (8)$$

випадки, що залишилися:

$$W_L^{MPP} = \dots = W_L^{MMM} = \{\mathbf{p} \in C_L \mid p_x, p_y, p_z > 0\} \cap \{\mathbf{p} \in C_L \mid p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 > L^2\} \quad (9)$$

Ці висновки може пояснювати 2D приклад наведений на рис. 3.4. і 3.5, які показують можливі границі робочої області.

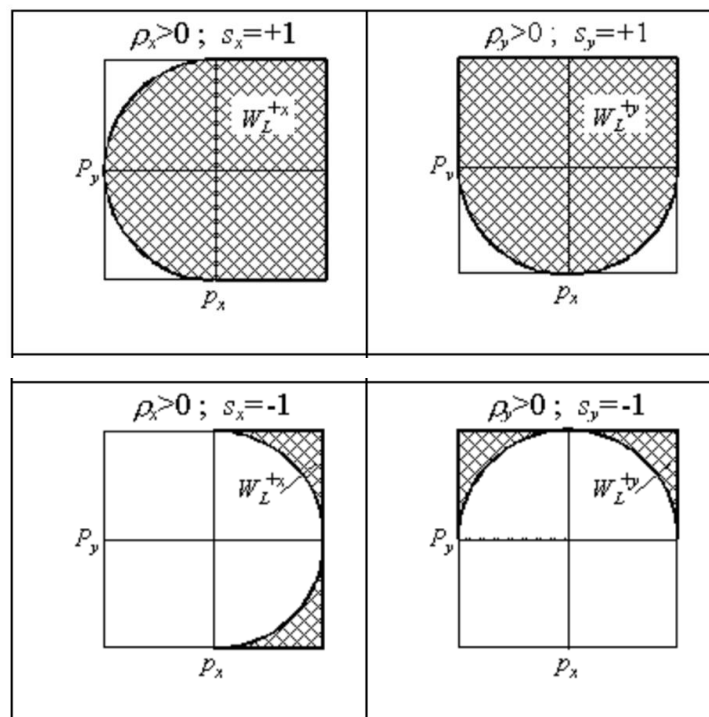


Рис. 3.4. Можливі границі для окремих обмежень (2D приклад)

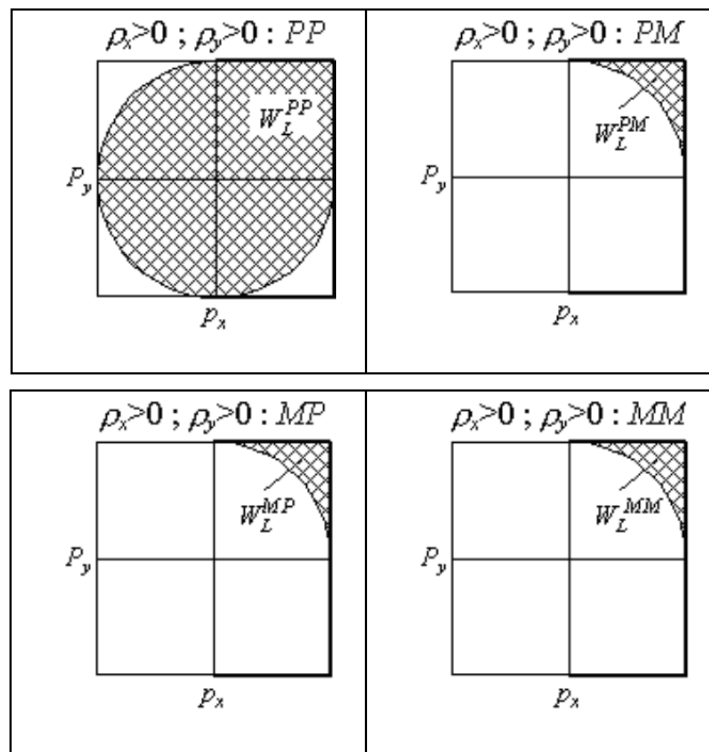


Рис. 3.5. Неможливі границі для одночасних обмежень (2D приклад)

Вирази (8) і (9) можуть бути поміщені у формулу

$$W_L^{PPP} = S_L \cup G_L; \quad W_L^{MPP} = \dots = W_L^{MMM} = G_L \quad (10)$$

де

$$S_L = \{ \mathbf{p} \in C_L \mid p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 < L^2 \}; \quad G_L = \{ \mathbf{p} \in C_L \mid p_x, p_y, p_z > 0; p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 > L^2 \}; \quad S_L \cap G_L = \emptyset.$$

Отже, підведемо підсумок можливих зворотних кінематичних рішень для даних позитивних об'єднаних меж (2):

- У середині сфери S_L існує одне зворотнє кінематичне рішення PPP з позитивним індексами s_x, s_y, s_z .

- За межами сфери S_L , але в межах позитивної частини циліндричного Q , існують 8 рішень зворотної кінематики (PPP, MPP ... MMM), відповідної всім можливим комбінаціям індексів s_x, s_y, s_z .

Якщо точка $\mathbf{p} = (-0.5, 0.4, 0.3)$ в межах S_L сфери, то об'єднані координати мають бути узяті з наборів $p_x \in \{0.37, -1.37\}$, $p_y \in \{1.21, -0.41\}$, $p_z \in \{1.07, -0.47\}$. У контрасті, для точки $\mathbf{p} = (0.7, 0.7, 0.7)$, яка за межами сфери, зворотна кінематика приводить рішення з двома позитивними значеннями $p_x, p_y, p_z \in \{0.84, 0.56\}$, позитивні комбінації об'єднаних змінних. Проміжні випадки (з 2 або 4 допустимих рішень) не можливі.

3.3. Аналіз кінематичних залежностей

Маючи розв'язок зворотних кінематичних залежностей, за допомогою програмного середовища MATLAB, моделюємо роботу приводів верстата згідно схеми (Рис. 3.6), а саме: переміщення приводів P_x , P_y , P_z в залежності від прямолінійного переміщення робочого органу по одній з координат протягом 2 секунд (Рис. 3.6, 3.7, 3.8).

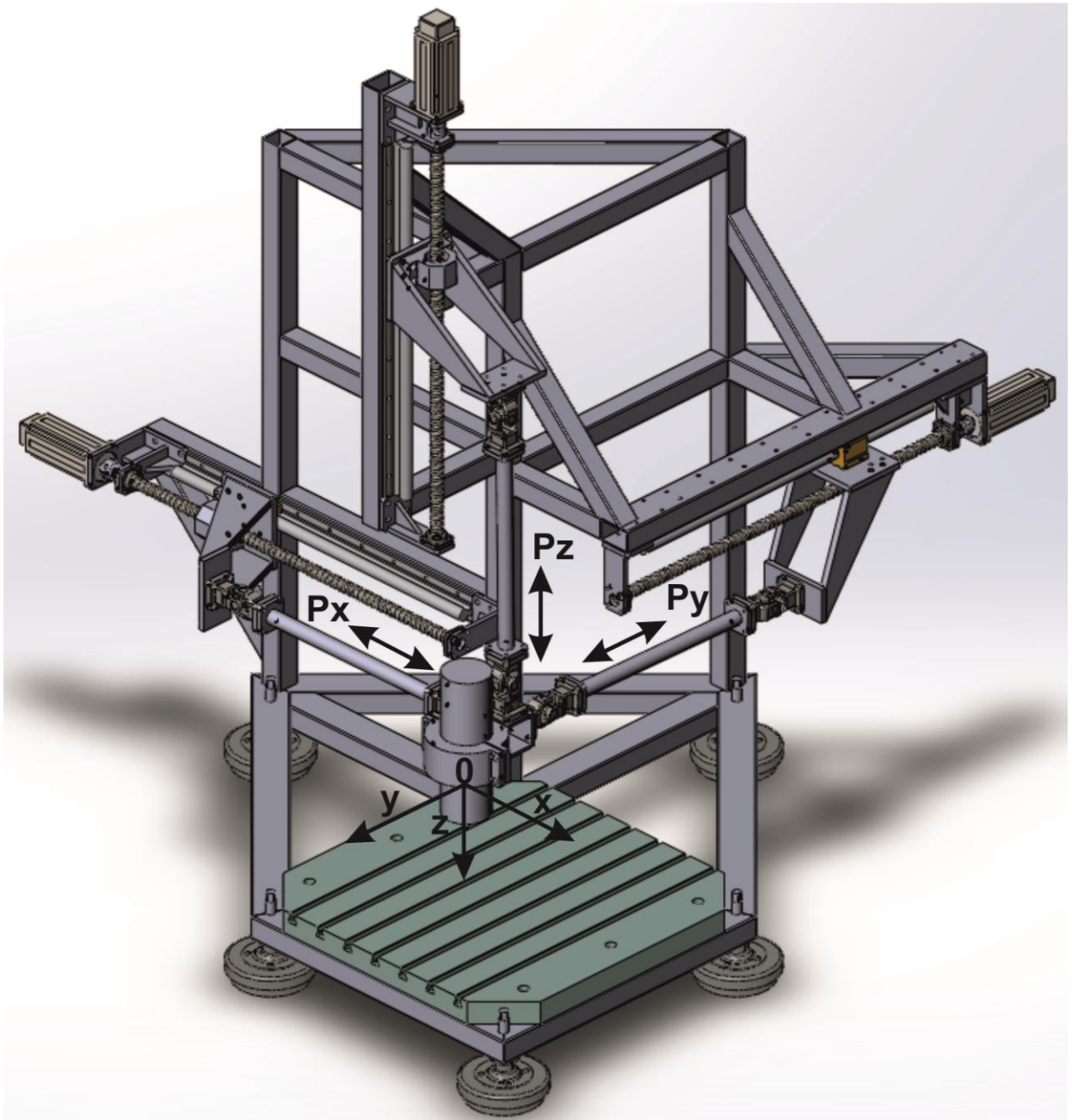


Рис. 3.6. Схема напрямів переміщення робочого органу та приводів верстата

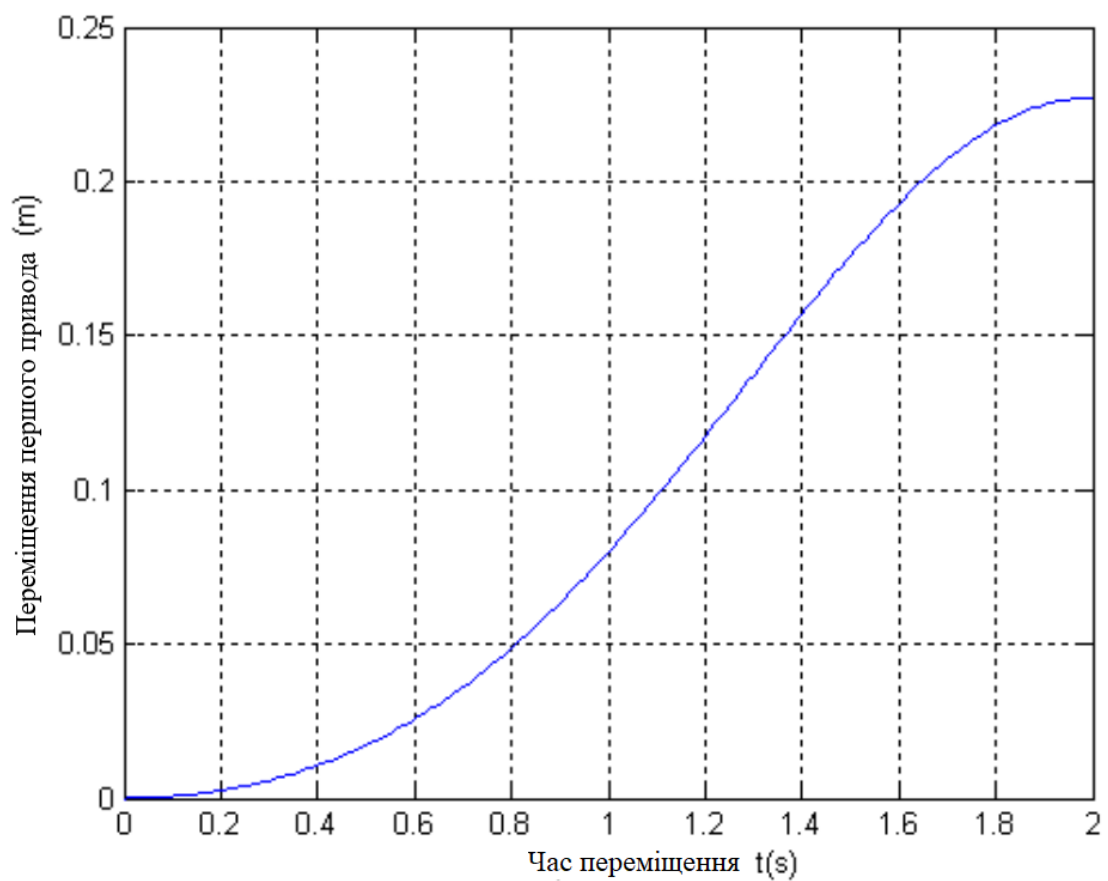


Рис. 3.7. Залежність переміщення першого привода від переміщення робочого органу

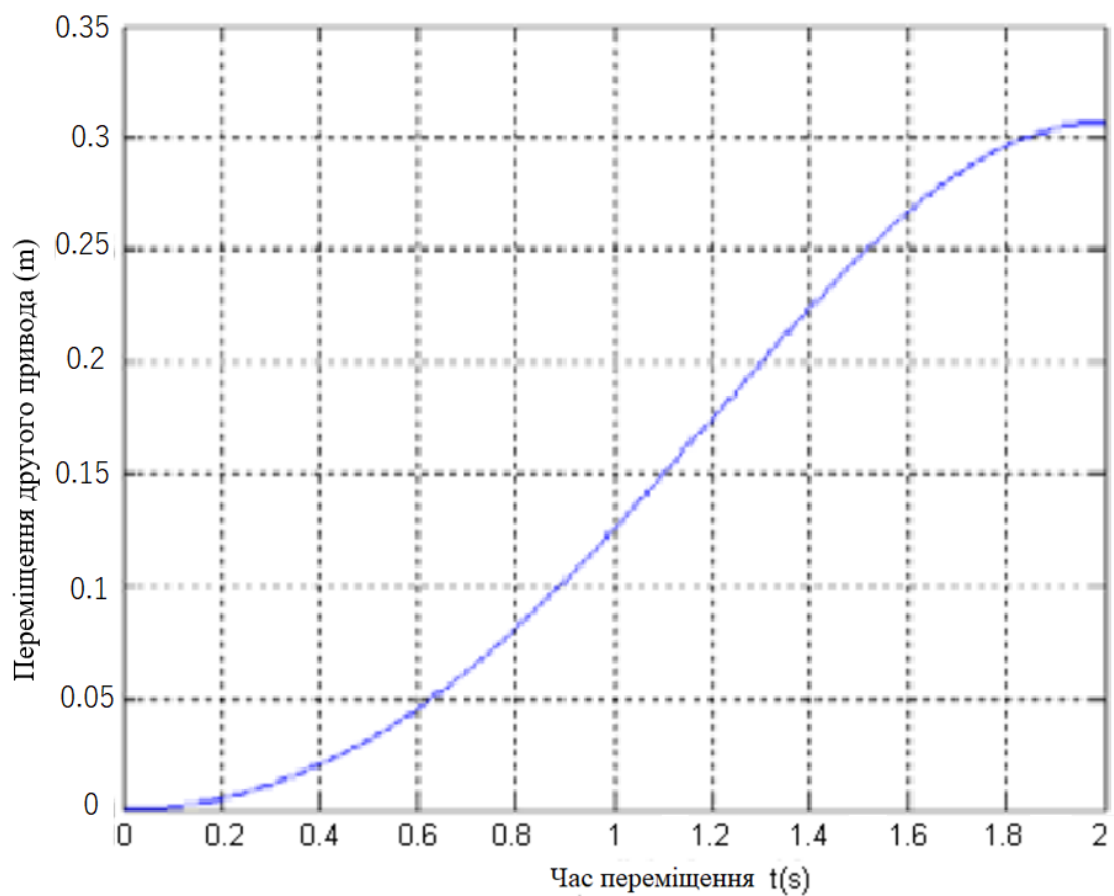


Рис. 3.8. Залежність переміщення другого привода від переміщення робочого органу

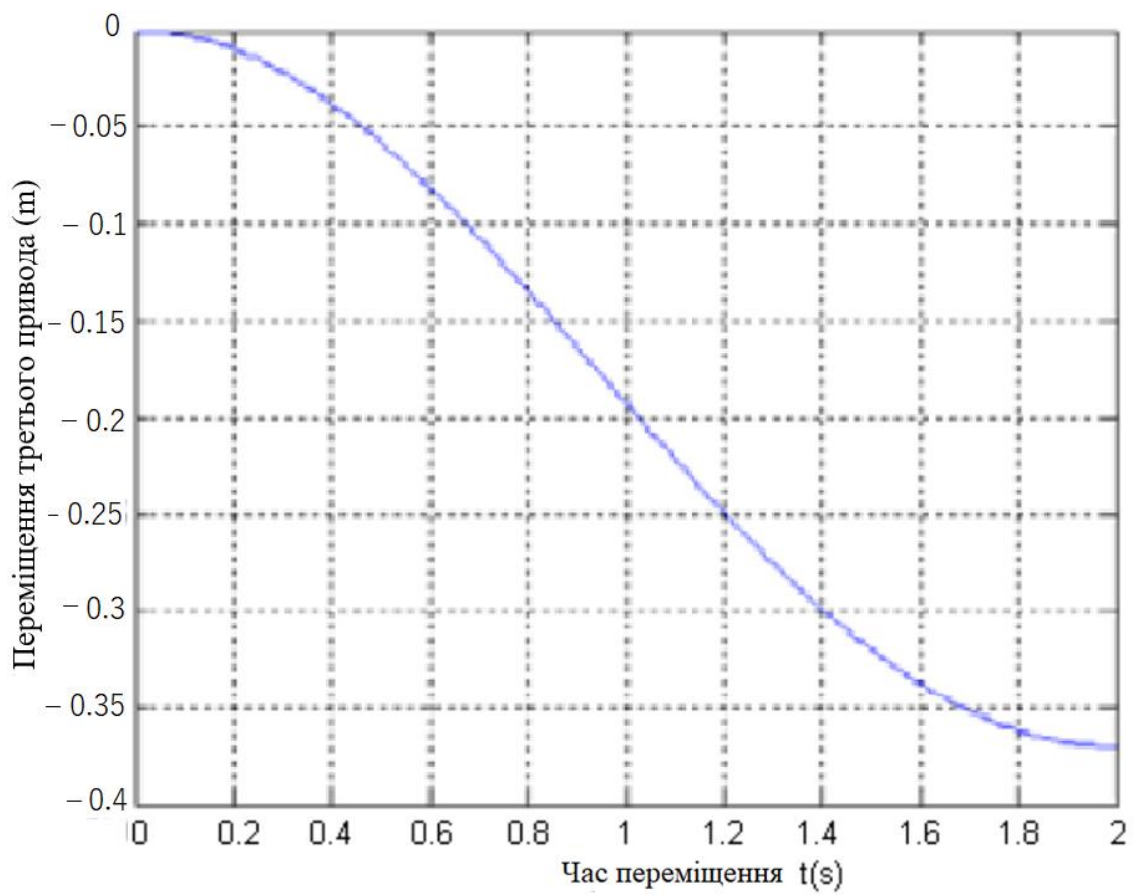


Рис. 3.9. Залежність переміщення третього привода від переміщення робочого органу

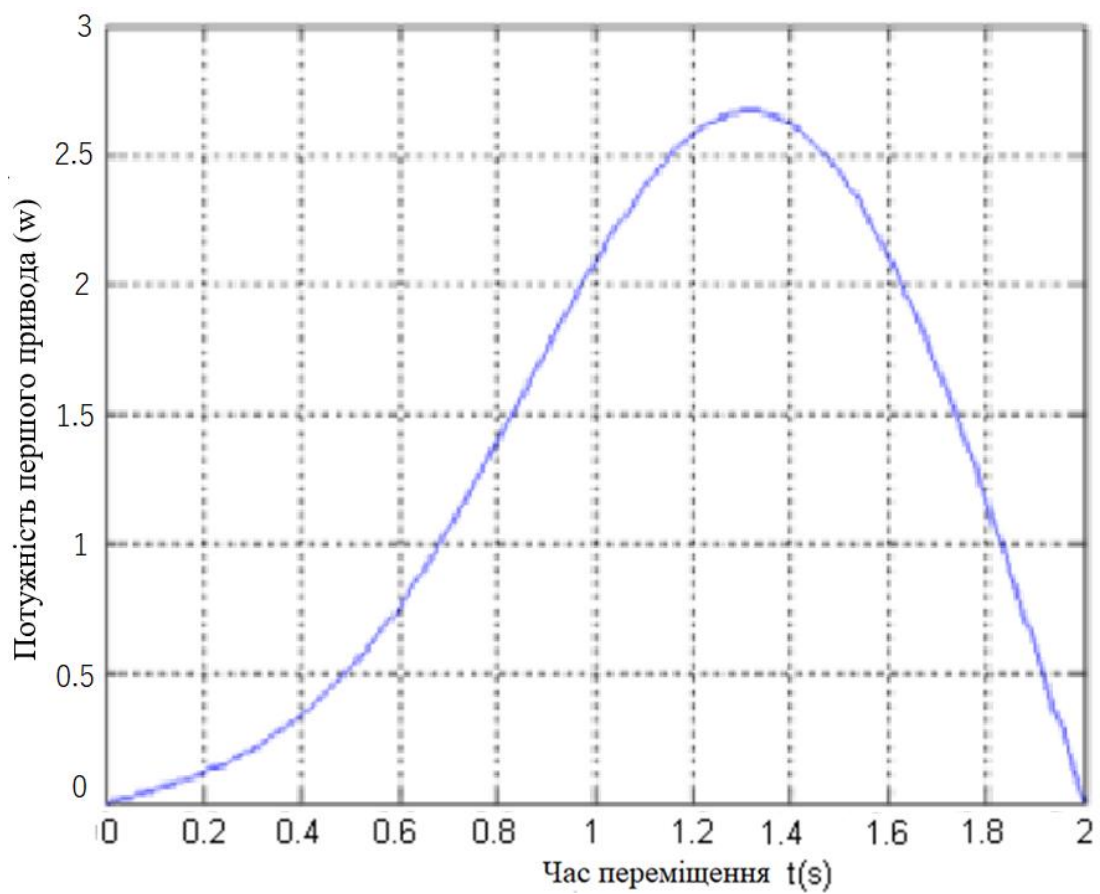


Рис. 3.10. Залежність потужності першого привода від переміщення робочого органу

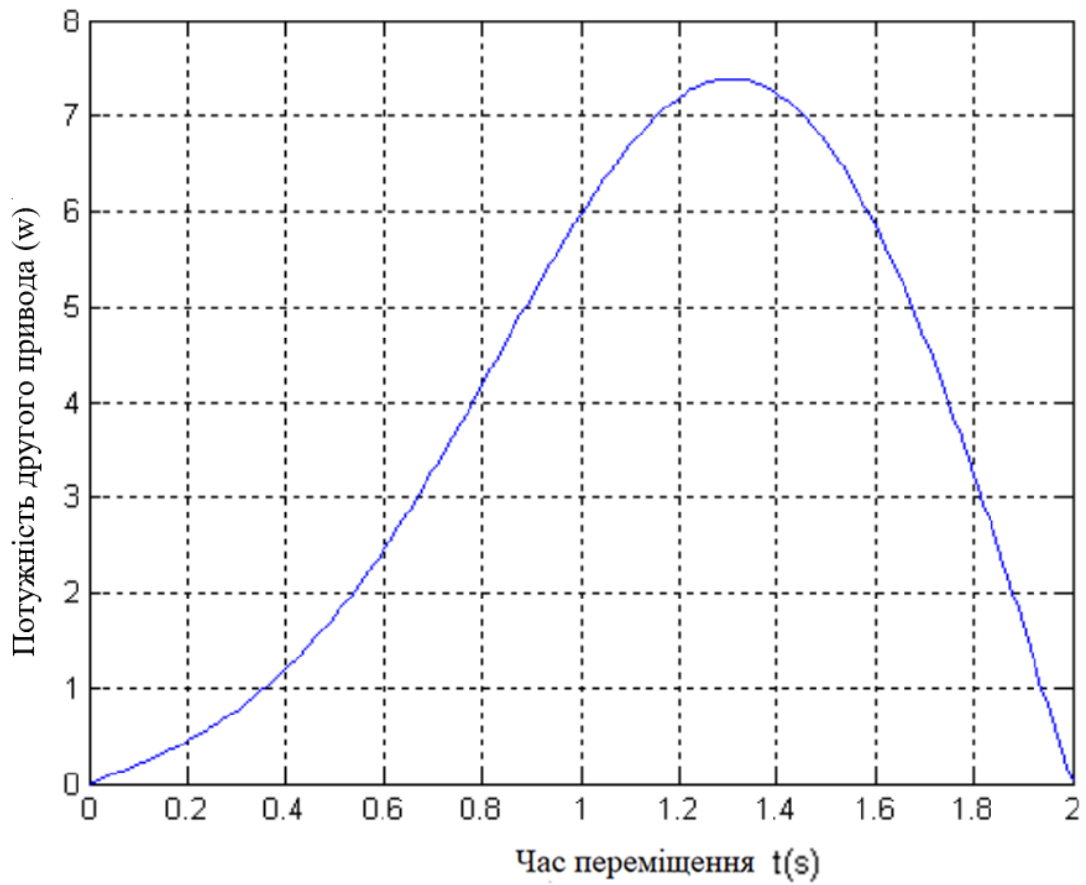


Рис. 3.11. Залежність потужності другого привода від переміщення робочого органу

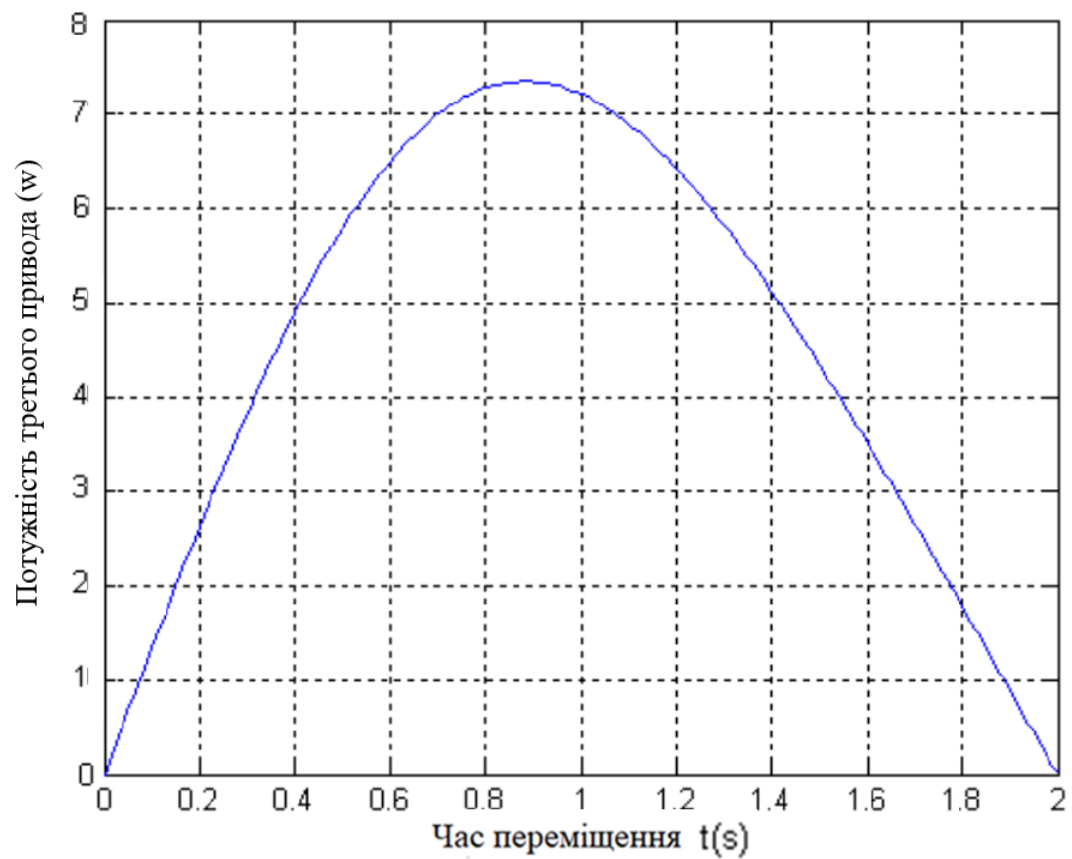


Рис. 3.12. Залежність потужності третього привода від переміщення робочого органу

Проаналізувавши графіки на (Рис. 3.7, 3.8, 3.9) бачимо, що при переміщенні робочого органу зі швидкістю 0,4 м/с по осі X, протягом 2 секунд, перший привід, що переміщується по відповідній осі, зміститься на 225 мм. Другий привід, що переміщується по осі Z зміститься на 320 мм, а третій привід, який переміщується по вісі Y, зміститься у від'ємному напрямку на 360 мм.

Також проведено моделювання споживаної потужності приводами при виконанні переміщення робочого органу по осі X, з тією ж швидкістю та тим самим часом переміщення. Проаналізувавши отримані залежності (Рис.3.10, 3.11, 3.12), можна прийти до висновку, що споживана потужність першого приводу буде 2,7 W. Споживана потужність другого та третього приводу буде майже однаковою, приблизно по 7,2 W.

4. КОНСТРУКТИВНИЙ РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ ВЕРСТАТА

4.1. Вибір шпинделя верстата

У верстаті використовується шпиндель.

Для заданих умов обробки вибираємо шпиндель Шпиндель для ЧПУ 2,2 kw, ER20 (рис. 2.2)



Рис.2.2. Шпиндель ER20

Технічна характеристика шпинделя

Частота, Гц	400
Потужність, кВт.	2,2
Робоча напруга, В	220
Швидкість обертання, хв ⁻¹	15000
Биття, мм	0,05
Цанговий патрон	ER20
Кількість підшипників, шт	4
Тип охолодження	повітряний

Обраний шпиндель повністю задовольняє заданим умовам обробки для спроектованого верстата

4.2. Розрахунок кілько-гвинтової передачі

4.2.1 Загальні відомості для розрахунку кілько-гвинтової передачі.

Передача гвинт-гайка кочення має властивості, які дозволяють застосовувати її як в приводах подач без відліку переміщень (універсальних верстатів, силових столів агрегатних верстатів), так і в приводах подач і позиціонування верстатів з

ЧПУ. Для передачі характерні високий коефіцієнт корисної дії (0,8-0,9), невелика різниця між силами тертя руху та спокою, незначний вплив частоти обертання гвинта на силу тертя в механізмі, повна відсутність осьового зазору. Недоліками є висока вартість, понижене демпфування, відсутність самогальмування.

Передача складається з гвинта 1 (рис.2.3), гайки 2, кульок 3 та пристроїв для повернення кульок (на рисунку не показані). Звично застосовують передачі з найбільш технологічним напівкруглим профілем різьби.

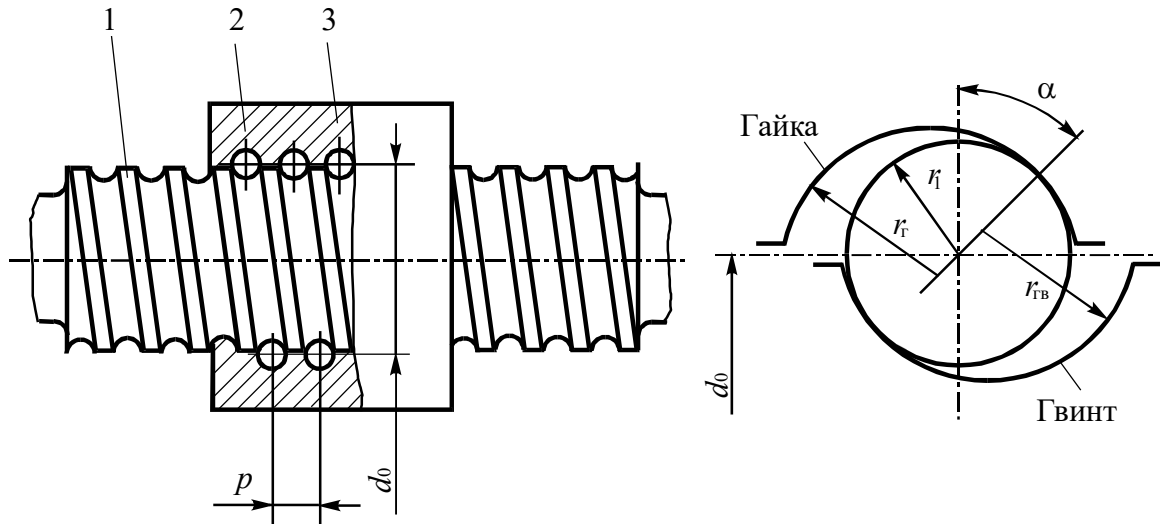


Рис.2.3. Схема передачі гвинт-гайка кочення

Розміри передачі визначаються за ГОСТ 25329-82. За номінальний розмір передачі приймають діаметр d_0 умовного циліндра, на якому розташовані центри кульок.

Критеріями працездатності передач гвинт-гайка кочення є: 1) міцність поверхневих шарів контактуючих тіл під час дії статичного навантаження; 2) довговічність (за утомленістю та зношенням поверхневих шарів) під час дії перемінного навантаження; 3) осьова жорсткість; 4) стійкість гвинта за критичним осьовим зусиллям; 5) стійкість гвинта за критичною частотою обертів. Розрахунки за вказаними критеріями дозволяють перевірити правильність вибору розмірів передачі, назначити величину попереднього натягу.

$d_0=25\text{мм}$ – номінальний діаметр гвинта

$p=20\text{мм}$ – крок різьби

$d_1=5\text{мм}$ – діаметр кульок.

Вибір матеріалів елементів.

До матеріалів гвинта та гайки ставляться жорсткі вимоги, виконання яких необхідно для забезпечення дієздатності та точності передачі:

- твердість робочих поверхонь не нижче HRC 60, тільки для довгих гвинтів допускається деякі зниження твердості;
- при усталенні поверхонь товщина шару повинна бути достатньою для сприйняття контактних напруг;
- стабілізація (зведення до мінімуму остаточних напруг), яка забезпечує зберігання розмірів та форми в час.

В нашій промисловості накопичено достатній досвід виготовлення гвинтів довжиною до 1м. Для точних передач ГГК виготовляють із сталі ХВГ із застосуванням об'ємної загартовки до твердості HRC 58-62, якщо діаметр не перевищує 50мм. Більш прогресивним є застосування сталі 7ХГ2ВМ, 8ХВ із загартуванням або сталі 20Х2МВФ із азотуванням.

Вибір марки сталі для гайок менш складний, ніж для гвинтів, із-за значно менших розмірів гайок рекомендується інструменту ментальні сталі 9ХС, ШХ15, ХВГ, а також цементуємі 18-ХГТ, 12ХНЗА, 12Х2Н4А.

4.2.2. Розрахунок гвинта на стійкість.

Так як стержень ходового гвинта працює на стиск і має велику вільну довжину, його необхідно перевірити на міцність з урахуванням усталеності за формулою:

$$\sigma = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_{\text{кв}}} \leq \varphi \cdot [\sigma]_{\text{сж}}$$

Приймаємо за матеріал гвинта сталь 7ХГ2ВМ та коефіцієнт запасу безпеки $n = 2,5$, маємо:

$$\frac{\sigma}{n} = [\sigma]_{\text{сж}} = \frac{700}{2,5} = 280 \text{ Н / мм}^2$$

де $[\sigma]_{\text{сж}}$ – допустиме навантаження на стиск;

σ_T – границя текучості матеріалу за табл. 1.1 [4]

$\sigma_T = 700 \text{ Н/мм}^2$

Коефіцієнт зменшення допустимих навантажень для стиснутих стержнів вибирається в залежності від гнучкості за табл. 13.1 [4]

$$\lambda = \frac{\mu \cdot L_1}{i} = \frac{\mu \cdot 4L_1}{d_{\kappa\theta}} = \frac{0,6 \cdot 4 \cdot 568}{21,475} = 63,48,$$

де $L_1=0.8L$ – максимальна довжина гвинта , яка працює на стиск;

$$\mu = 0,6;$$

$$i = \sqrt{j/F} = d_{\kappa\theta} / 4 - \text{радіус інерції гвинта для круглого перерізу}.$$

$$\text{Отже маємо: } \sigma = \frac{4 \cdot 360}{3,14 \cdot 21,475} = 21,36 \leq 0,62 \cdot 280 = 182 \text{ Н / мм}^2$$

4.2.3. Визначення статичної вантажопід'ємності гвинта.

Це гранично допустиме осьове навантаження на гвинт, в результаті дії якого виникає загальна залишкова деформація тіл кочення, гайки та гвинта в найбільш навантаженій зоні контакту, що дорівнює 0,0001 діаметра тіла кочення:

$$C_o = Pz_p u \sin \alpha \cos \beta,$$

де z_p – розрахункове число кульок в одному витку різьби;

$u=10$ – число витків у гайці;

$\alpha = 45^\circ$ – кут контакту кульки з гвинтом та гайкою;

β – кут підйому різьби.

$$\beta = \arctg \frac{p}{\pi d_0} = \arctg \frac{20}{3,14 \cdot 25} = 18^\circ.$$

$$\text{Оскільки } z_p = k_z z_1, \quad z_1 = \frac{\pi d_0}{d_1} - \frac{3p}{d_1},$$

де $k_z = 0,7..0,8$ – коефіцієнт, що враховує похибки виготовлення різьби гвинтового механізму;

z_1 – робоча кількість кульок в одному витку, то маємо:

$$C_o = k_o k_z d_1 (\pi d_0 - 3p) u \sin \alpha \cos \beta = 70 \cdot 0,8 \cdot 25 \cdot (3,14 \cdot 25 - 3 \cdot 20) \cdot 10 \cdot \sin 45^\circ \cdot \cos 18^\circ = 35600 \text{ Н}.$$

4.2.4. Розрахунок сили попереднього натягу в кулько-гвинтовій передачі.

Попередній натяг, підвищуючи осьову жорсткість передачі, підвищує момент холостого ходу та знижує її довговічність.

За мінімально допустиму силу натягу $P_{H_{\min}}$, що відноситься до одної кульки, приймають таку силу, яка забезпечує збереження попереднього натягу у гвинтовій передачі при дії максимального повздовжнього зусилля $Q_{\max}$, Н:

$$P_{H_{\min}} = \frac{Q_{\max}}{2k_z z_1 u \sin \alpha \cos \beta} = \frac{Q_{\max} d_1}{2k_z (\pi d_0 - 3p) u \sin \alpha \cos \beta}.$$

$$P_{H_{\min}} = \frac{2000 \cdot 5}{2 \cdot 0,8(3,14 \cdot 25 - 3p \cdot 20)5 \cdot \sin 45 \cos 18} = 98,47 \text{ Н}$$

Найбільша допустима сила натягу, що відноситься до одної кульки, при якій зберігається статична міцність механізму,

$$P_{H_{\max}} = P(1 - 0,55 \frac{Q_{\max}}{C_0}),$$

де P – гранично допустиме статичне навантаження на одну кульку, $P=1750\text{Н}$.

$$P_{H_{\max}} = 1750 \cdot (1 - 0,55 \frac{2000}{17800}) = 1643 \text{ Н}$$

В залежності від необхідної жорсткості передачі, її довговічності, допустимого нагрівання гвинта та особливостей вимірювального перетворювача переміщень силу натягу вибираємо в інтервалі від $P_{H_{\min}}$ до $P_{H_{\max}}$.
Приймаємо $P_H = 1000 \text{ Н}$

4.2.5. Розрахунок критичної частоти обертання гвинта.

Під час швидких переміщень робочого органу верстата, коли гвинт обертається з високою частотою, відцентрові сили можуть викликати втрату його стійкості, що проявляється у появі вібрацій.

Критична частота обертання гвинта:

$$n_k = 5 \cdot 10^7 \frac{d_{BH} \nu k}{l^2} \geq n_{\max},$$

де d_{BH} – внутрішній діаметр різьби гвинта, мм;

$\nu = 1$ – коефіцієнт, що залежить від способу закріплення гвинта;

$k = 1,5 \dots 2$ – коефіцієнт запасу, приймаємо $k = 2$

$$n_k = 5 \cdot 10^7 \frac{20 \cdot 1 \cdot 2}{715^2} = 3584 \text{ об/хв} \geq n_{\max} = 3000 \text{ об/хв} - \text{умова виконується.}$$

$$\text{Швидкість гвинта } v = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{3000 \cdot 20}{60} = 1 \text{ м/с}$$

4.2.6. Розрахунок на осьову жорсткість.

Перевірку на осьову жорсткість j , Н/мкм, приводу проводять для умови забезпечення жорсткості кульково-гвинтового механізму j_m , гвинта $j_{гв}$ та його

опор j_o :
$$j \leq \frac{1}{\frac{1}{j_{кгм}} + \frac{1}{j_{гв}} + \frac{1}{j_o}}.$$

Осьова жорсткість приводу впливає на можливість виникнення його резонансних коливань. Щоб не допустити резонансного режиму, власну частоту коливань механічної частини приводу f приймають в $3 \dots 3,5$ рази більшою, ніж частота імпульсів, що виробляються системою вимірювання переміщень. Виходячи з допустимої частоти коливань механічної частини приводу f (для середніх і малих верстатів $f = 45 \dots 75$ Гц), визначають його потрібну жорсткість, Н/мкм:

$$j = 4 \cdot 10^{-6} \pi^2 f^2 m,$$

де $m = 230$ кг – маса вузлів механічної частини приводу (ходового гвинта, виконавчого органу та встановлених на ньому пристосувань, заготовки), кг.

$$j = 4 \cdot 10^{-6} 3,14^2 75^2 230 = 51,075 \text{ Н/мкм}$$

Жорсткість кульково-гвинтового механізму з попереднім натягом і поверненням кульок через вкладиші при $r_1/r_2 = 0,96$, Н/мкм:

$$j_{кгм} = 6k_{\delta} u \left(\frac{d_0}{p} - 1 \right) \sqrt[3]{0,1 P_n p},$$

де k_{δ} – коефіцієнт, що враховує похибки виготовлення гайки, а також деформації у гвинтовому механізмі та в усіх його стиках (приймаємо

рівним 0.5).

$$j_{\text{ккм}} = 6 \cdot 0,5 \cdot 10 \left(\frac{25}{20} - 1 \right) \sqrt[3]{0,1 \cdot 1000 \cdot 20} = 94,5 \text{ Н / мкм}$$

Найменша жорсткість ходового гвинта залежить від способу встановлення його на опорах. При односторонньому закріпленні, а також у випадку, коли один кінець гвинта затиснений, а другий розташований на шарнірній опорі, жорсткість складає, Н/мкм:

$$j_{\text{гв}} = \frac{\pi d_0^2 E}{4l_1} ;$$

де $l_1 = 715$ мм – найбільша відстань від опори гвинта до середини гайки, мм.

$$j_{\text{гв}} = \frac{3,14 \cdot 25^2 \cdot 2 \cdot 10^5}{4 \cdot 715} = 138,204 \text{ Н / мкм}$$

Приблизне значення жорсткості опор гвинта, Н/мкм: $j_o = 750$,

$$51,075 \leq \frac{1}{\frac{1}{94,5} + \frac{1}{138,204} + \frac{1}{750}} - \text{умова виконується}$$

4.3 Розрахунок підшипників кочення.

Підшипники кочення виходять з ладу в результаті поломки або ушкодження робочих поверхонь деталей підшипника. При перевантаженні підшипників може відбутися розколювання кілець і тіл кочення. Сепаратори руйнуються в результаті великого тиску з боку тіл кочення під дією відцентрових сил. У більшості випадків підшипники виходять з ладу внаслідок абразивного зношування, пластичних деформацій і втомлювального викришування робочих поверхонь. Абразивне зношування відбувається при роботі погано захищеного підшипника в середовищі, забрудненому абразивним пилом.

Пластичні деформації відбуваються внаслідок перевищення границі текучості матеріалу на поверхні контакту тіла кочення з кільцем (зазвичай при динамічних і великих статичних навантаженнях без обертання).

Втомне викришування робочих поверхонь відбувається в результаті циклічного контактного навантаження і є основною причиною виходу підшипників кочення з ладу. Зазвичай викришування починається на доріжках кочення найбільш напружених кілець: у більшості підшипників – на внутрішніх, а в сферичних – на зовнішніх. Циклічність навантаження нерухомого внутрішнього кільця приблизно удвічі вище, ніж обертового. Отже обертання зовнішнього кільця менш сприятливе. У підшипниках найчастіше обертається внутрішнє кільце.

Враховуючи викладене, підшипники кочення з частотою обертання $n > 1$ об/хв розраховують на довговічність (ресурс) з умови втомлювального викришування. Необертові підшипники кочення й обертові з частотою $n < 1$ об/хв розраховують на статичну вантажопідйомність з умови попередження залишкових деформацій.

Розрахунок підшипників кочення на довговічність виконують по номінальній довговічності (розрахунковому терміну служби) L підшипника. При розрахунку враховують еквівалентне динамічне навантаження F для підшипника і його динамічну вантажопідйомність C .

Еквівалентним динамічним навантаженням F для радіальних і радіально-упорних підшипників кочення називається таке умовне постійне радіальне навантаження, яке при дії на підшипник з обертовим внутрішнім і нерухомим зовнішнім кільцями забезпечує таку ж довговічність, яку даний підшипник має при дійсних умовах навантаження й обертання. Для упорних і упорно-радіальних підшипників кочення під еквівалентним динамічним навантаженням розуміють таке умовне постійне центральне осьове навантаження, яке при дії на підшипник з обертовим посадковим кільцем на валу і нерухомим у корпусі підшипника забезпечує ту ж довговічність, яку даний підшипник має при дійсних умовах навантаження й обертання.

Значення еквівалентного динамічного навантаження визначається за формулою:

– для радіальних шарикопідшипників і радіально-упорних шарико- і роликопідшипників

$$F = (XVF_r + YF_a)k_o k_T;$$

де F_r і F_a – постійні за розміром і напрямком відповідно радіальне та осьове навантаження на підшипник;

X і Y – коефіцієнти відповідно радіального й осьового навантажень;

V – коефіцієнт обертання, що враховує, внутрішнє ($V=1$) чи зовнішнє ($V=1,2$) кільце обертається;

k_σ – коефіцієнт безпеки, що враховує характер навантаження на підшипник;

k_T – температурний коефіцієнт, що враховує робочу температуру нагрівання підшипника.

Динамічна вантажопідйомність C – постійне навантаження, яке підшипник може витримати протягом одного мільйона обертів без появи ознак втоми не менш чим у 90% з визначеного числа підшипників, що піддаються випробуванням. При цьому під навантаженням розуміють: радіальну – для радіальних і радіально-упорних підшипників (з необертним зовнішнім кільцем) і осьову – для упорних і упорно-радіальних підшипників (при обертанні одного з кілець). Значення C приведені в каталогах.

У результаті випробувань на утому підшипників кочення була встановлена залежність між довговічністю L , еквівалентним динамічним навантаженням F і динамічною вантажопідйомністю C :

$$L = \left(\frac{C}{F} \right)^p$$

де $p = 3$ для кулькових підшипників

Номінальна довговічність L (млн. об.) визначається по заданому терміну служби підшипника L_h :

$$L = 60 \cdot 10^{-6} n L_h.$$

Термін служби підшипників встановлюють у залежності від призначення машини та особливостей її експлуатації (зазвичай $L_h = 4 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^4$ год.).

Підшипники кочення вибирають з каталогу по динамічній вантажопідйомності C . При цьому повинна виконуватися умова

$$C_p \leq C_n,$$

де C_p – розрахункове значення динамічної вантажопідйомності, отримане з (3.6); C_n – паспортне значення C (наводиться в каталозі для кожного типу підшипника).

Практично навантаження обмежене статичною міцністю деталей підшипника кочення, чи так називаною статичною вантажопідйомністю, по якій підбирають підшипники при малих частотах обертання ($n < 1$ об/хв), коли число циклів навантажень мале і не викликає втомлювальних руйнувань, а також перевіряють підшипники, розраховані по динамічній вантажопідйомності.

Умова для перевірки і підбору:

$$F_0 < C_0,$$

де F_0 – еквівалентне статичне навантаження; C_0 – статична вантажопідйомність.

Під статичною вантажопідйомністю розуміють таке статичне навантаження, якій відповідає загальна залишкова деформація тіл кочення і кілець у найбільш навантаженій точці контакту, рівна 0,0001 діаметра тіла кочення. При цьому під навантаженням розуміють радіальну – для радіальних і радіально-упорних підшипників, осьову – для упорних і упорно-радіальних підшипників кочення. Значення C_0 зазначені в каталозі для кожного типорозміру підшипника.

При виборі підшипників кочення треба прагнути до того, щоб підшипник, відповідаючи заданим умовам працездатності, мав при цьому мінімальні розміри, клас точності, а звідси і мінімальну вартість. Відомо, якщо $T/F_r < 0,35$, можна застосувати кульковий радіальний підшипник.

Згідно з розрахунками реакцій опор більш навантаженим є підшипник А, на який діє радіальна сила R_A і момент T . Тому розрахунок будемо проводити для опори А.

Зважаючи на значне радіальне навантаження, а також на те, що $T/R_A = \frac{1,10 \cdot 10^3}{1390} = 0,79 > 0,35$, попередньо вибираємо радіальний кульковий підшипник важкої серії 104. Для цього підшипника базова статична вантажопідйомність $C_0 =$

4500000 Н, базова динамічна вантажопідйомність $C = 93600$ Н, $n_{zp} = 20000$ об/хв.

Умовою працездатності підшипника буде: $h < L_h$, де, L_h – номінальна довговічність підшипника в годинах, котра при сталому режимі роботи визначається за формулою:

$$L_h = \frac{10^6}{60n} \cdot \left(\frac{C}{F} \right)^p.$$

Еквівалентне навантаження F для радіальних кулькових підшипників визначаємо за формулою:

$$F = (XVF_r + YF_a)k_\sigma k_T,$$

де коефіцієнт обертання $V = 1$; радіальне навантаження $F_r = R_A = 1390$ Н; момент $T = 1,10 \cdot 10^3$ Н; температурний коефіцієнт $k_T = 1$ при робочій температурі менше 100°C ; коефіцієнт безпеки $k_\sigma = 1$ при спокійному навантаженні.

Для визначення коефіцієнтів радіального X та осьового Y навантаження визначимо відношення $T/C_0 = \frac{1,10 \cdot 10^3}{4500000} = 0,00024$ вибираємо параметр осьового навантаження $e = 0,32$.

Потім за співвідношенням $\frac{T}{VF_r} = \frac{1,10 \cdot 10^3}{1 \cdot 1390} = 0,79 > e = 0,32$ приймаємо $X = 1$; $Y = 0$.

Розрахункове еквівалентне навантаження на підшипник $F = R_A = 1390$ Н.

Розрахункова довговічність підшипника показник степеня для кулькових підшипників $p = 3$

$$L_h = \frac{10^6}{60n} \cdot \left(\frac{C}{F} \right)^p = \frac{10^6}{60 \cdot 20000} \cdot \left(\frac{93600}{1390} \right)^3 = 25440 \text{ год} > h = 20000 \text{ год}.$$

Отже вибраний підшипник 2204 та 2207 ГОСТ 8338-75 задовольняють умову працездатності.

Якщо ця умова не задовольняється, треба вибрати інший підшипник, більш важкої серії, і повторити розрахунок.

5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ ВЕРСТАТА

ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ З ЛАНКАМИ ПОСТІЙНОЇ ДОВЖИНИ

5.1 Загальні вихідні дані

Метою проектування верстата паралельної структури типу «триглайд», на даному етапі, є заміна застарілого вітчизняного фрезерного обладнання (обраного нами у якості бази для порівняння при розрахунках показників економічної ефективності), на відміну від якого новий верстат має ряд переваг, зокрема, значно більшу продуктивність обробки. Придбання австрійського аналогу верстата паралельної структури вимагає значних витрат на його придбання, транспортування та митне оформлення.

Загальні вихідні техніко-економічні показники базового та нового верстатів зведені до табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Загальні вихідні техніко – економічні показники

№ п/п	Показники	Одиниця	Варіанти	
			Базовий	Проектний
1.	Програма виробництва верстатів	шт./рік	-	5
2.	Програма виробництва деталей у конкретного споживача	шт./рік	10000	10000
3.	Штучний час обробки однієї деталі	хв.	4,41	2,0
4.	Маса верстата	кг	3200	50
5.	Площа яку займає верстат	м ²	6,161	1
6.	Встановлена потужність електродвигунів	кВт	8	0,5
7.	Категорія ремонтної складності:			
	а) механічної частини	УРО	8	10
	б) електричної частини	УРО	6	9,5
8.	Розряд роботи:			
	а) верстатника	розряд	3	4
	б) наладчика	розряд	4	4
9.	Оптова ціна базового верстата	грн.	1025650	-

5.2 Конструкторська підготовка виробництва

5.2.1 Встановлюю етапи конструкторської підготовки виробництва:

- технічне завдання;
- технічна пропозиція;
- ескізний проект;
- технічний проект;
- робочий проект.

5.2.2 Встановлюємо групу новизни та складності верстата, який конструюється [7, дод.1]. Він має IV групу новизни і IV групу конструкторської складності.

5.2.3 Визначаємо кількість деталей, які підлягають розробці, диференціюючи їх за видами. За допомогою коефіцієнтів переводу [7, дод.2] деталі різних видів переводимо в «умовні деталі».

5.2.4 Трудомісткість технічного і робочого проектів визначаємо як добуток відповідної загальної кількості «умовних деталей» на трудомісткість однієї умовної деталі [7, дод.3] в залежності від групи новизни та складності проектного верстата.

5.2.5 Трудомісткість технічного завдання, технічної пропозиції, ескізного проекту визначаємо відповідно групі новизни і складності верстата [7, дод.3].

5.2.6 Використовуючи дані трудомісткості етапів робіт конструкторської підготовки виробництва, розроблюємо сітьовий графік, який дозволяє організувати процес проектування так, щоб виконати його в найкоротший термін (розд. 5.7).

5.2.7 Після визначення трудомісткості робіт розраховуємо витрати на конструкторську підготовку виробництва.

5.2.8 Всі отримані результати зводимо до табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Розрахунок трудомісткості та витрат на конструкторську підготовку виробництва

№ п/п	Показники та етапи робіт	Одиниця	Технічне завдання	Технічна пропозиція	Ескізний проєкт	Технічний проєкт	Робочий проєкт	Всього
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	Група новизни	гр.	4	-	-	-	-	4
2.	Група складності	гр.	4	-	-	-	-	4
3.	Кількість деталей × коефіцієнт переводу в "умовні деталі":	шт.	-	-	-	-	-	-
	б) литих та зварних, які не є корпусними	-	-	-	-	12×2	12×4	
	в) оригінальних, які не є литими та корпусними	-	-	-	-	56×1	56×1	-
	г) використаних з іншого виробу	-	-	-	-	2×0,5	2×0,5	-
	д) уніфікованих у вузли	-	-	-	-	4×7	4×3,5	-
	е) стандартних нормалізованих	-	-	-	-	272×0,15	272×0,15	-
	є) покупних деталей та виробів	-	-	-	-	21×0,15	21×0,15	-
4.	Кількість умовних деталей	шт.	-	-	-	153	163	-
5.	Норма на умовну деталь	н-год	-	-	-	5,8	7	-
6.	Трудомісткість етапу робіт	н-год	45	270	440	887,4	1141	2783,4
7.	Середньогодинна заробітна плата конструктора	грн./год.	93,172	84,462	80,246	81,277	69,424	
8.	Зарплата основна (З _о)	грн.	4192,74	22804,74	35308,24	72125,21	79212,78	213643,7
9.	Зарплата додаткова (З _д): 10% від З _о	грн.	419,27	2280,47	3530,82	7212,52	7921,28	21364,37
10.	Єдиний соціальний внесок: 22,0% від (З _о +З _д)	грн.	1014,64	5518,75	8544,59	17454,30	19169,49	51701,78
11.	Витрати на відрядження: 5% від З _о	грн.	209,64	1140,24	1765,41	3606,26	3960,64	10682,19
12.	Накладні витрати: 45% від З _о	грн.	1886,73	10262,13	15888,71	32456,34	35645,75	96139,67
13.	Всього вартість проєкту В _{пк}	грн.	7723,03	42006,33	65037,78	132854,6	145910,0	393532,0

5.3 Технологічна підготовка виробництва

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

- технологічний контроль креслень, їх налагодження та розмноження;
- розробка техпроцесів: виготовлення деталей та складання вузлів;
- конструювання спеціального оснащення та нестандартних засобів механізації та автоматизації;
- виготовлення спеціального оснащення та нестандартних засобів механізації та автоматизації;
- перепланування та переустановлення обладнання.

Перш ніж починати визначення трудомісткості і витрат на технологічне проектування, було проведено аналіз технологічності конструкції і визначено перелік тих етапів, які слід включити до технологічної підготовки виробництва даного об'єкта.

5.3.2 Трудомісткість технологічної підготовки виробництва визначаємо в такій послідовності.

В залежності від кількості деталей та вузлів різної технологічної складності і на підставі диференційованих норм часу визначаємо трудомісткість проектування технологічних процесів виготовлення деталей і складання вузлів.

Трудомісткість останніх етапів робіт технологічної підготовки виробництва визначаємо у відсотках від трудомісткості проектування технологічних процесів обробки деталей та складання вузлів.

5.3.3 Після визначення трудомісткості виконання етапів робіт з технологічної підготовки виробництва визначаємо вартість проекту $V_{пт}$.

5.3.4 Всі отримані результати зводимо до табл.5.3.

Таблиця 5.3 – Витрати на технологічну підготовку

№ п/п	Показники та етапи робіт	Одиниця	Кількість	Кількість нормо-годин на одиницю	Загальна кількість нормо годин	Середньогодинна зарплата технолога	Зарплата основна З _о , грн.	Додаткова зарплата З _д , 10% від З _о , грн.	Відрахування у соціальні фонди 22% від (З _о +З _д)	Накладні витрати 55% від З _о , грн.	Загальна вартість
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Технологічний контроль креслень, їх відладка та розмноження	нормо-год.			32,5	87,31	2837,64	283,76	686,71	1560,70	5368,81
2	Розробка техпроцесів виготовлення деталей:										
	а) загальна кількість деталей	шт.	68		686		54330,6	5433,1	13148,0	29881,8	102793,4
	б) в т.ч. за групами технологічної складності:										
	I		20	4,5	90	69,42	6247,80				
	II		30	9	270	69,42	18743,4				
	III		16	17	272	87,79	23878,9				
	IV		2	27	54	101,12	5460,48				
3	Розробка технологічного процесу складання верстата VII групи складності	шт.	1	31,8	31,8	101,07	3214,03	321,40	777,79	1767,71	6080,94
4	Інші витрати	нормо-год.			31,8	69,42	2131,19	213,12	515,75	1172,16	4032,22
5	Всього вартість проекту				782,1		62513,4	6251,3	15128,3	34382,4	118276,0

5.4 Визначення собівартості та оптової ціни проектного верстата

Після визначення трудомісткості виготовлення проектного верстата розраховуємо:

а) основну заробітну плату виробничих робітників:

$$Z_{op} = \sum_{i=1}^n C_{ri} \cdot T_i, \quad (5.1)$$

де n – кількість i -тих видів робіт;

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

Так, основна заробітна плата виробничих робітників на механічних роботах:

$$Z_{op}^M = 93,6 \cdot 77,79 = 7298,83 \text{ грн.}$$

б) витрати на утримання та експлуатацію обладнання:

$$B_o = \sum_{i=1}^n Z_{op}^i \cdot \frac{P_{yo(i)}}{100}, \quad (5.2)$$

де $P_{yo(i)}$ – процент витрат на утримання та експлуатацію обладнання по кожному i -му виду робіт за заводською калькуляцією.

Так, на механічних роботах:

$$B_o^M = 7298,83 \cdot \frac{385}{100} = 28100,51 \text{ грн.}$$

в) цехові витрати:

$$B_{цех} = \sum_{i=1}^n Z_{op}^i \cdot \frac{P_{цр(i)}}{100}, \quad (5.3)$$

де $P_{цр(i)}$ – процент цехових витрат по кожному i -му виду робіт за заводською калькуляцією.

Для механічних робіт:

$$B_{цех}^M = 7298,83 \cdot \frac{232}{100} = 16933,30 \text{ грн.}$$

Аналогічно виконуємо розрахунки даних статей на інших роботах, результати заносимо до табл. 5.4.

Таблиця 5.4 – Трудомісткість виготовлення та окремі види витрат, включені до собівартості верстата

Види робіт	Трудомісткість робіт нормо-год.	Середній розряд Середньогодинна	тарифна ставка робітників, грн./год.	Основна заробітна плата робітників $З_{ор}$, грн.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання, B_o		Загально- цехові витрати $B_{цех}$	
					%	грн.	%	грн.
Зварювально-заготівельні	27,6	4	66,354	1831,37	245	4486,86	132	2417,41
Механічні	93,6	4	77,979	7298,83	385	28100,51	232	16933,30
Слюсарсько-складальні	64,8	4	77,979	5053,04	210	10611,38	242	12228,35
Фарбувальні	5	2	45,319	226,60	110	249,25	120	271,91
Пакувальні	4,2	2	41,935	176,13	110	193,74	120	211,35
Інші	38	3	70,181	2666,88	220	5867,13	240	6400,51
Всього	233,2	-	-	17252,84	-	49508,88	-	38462,83

Собівартість (повну) верстата розраховуємо за статтями витрат за допомогою отриманих на підприємстві кошторисних і звітних калькуляцій.

Розрахунок виконуємо за формулою:

$$C_{\text{вир}} = M_o + M_d + \Pi_n + T_v - B_{\text{зв}} + E_{\text{тех}} + \Pi_{\text{тех}} + \\ + Z_{\text{ор}} + Z_{\text{др}} + B_{\text{ес}} + B_{\text{цп}} + B_{\text{цех}} + B_{\text{зав}} + B_{\text{ін}}, \quad (5.4)$$

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

Π_n – покупні напівфабрикати та комплектуючі вироби, грн.;

Розрахунки M_o , Π_n , зводимо до табл. 5.5.

Таблиця 5.5 – Склад матеріальних витрат на верстат

№ п.п	Матеріали, покупні комплектуючі вироби	Одиниця	Витрати (шт., кг)	Ціна, грн.	Витрати на виріб, грн.
1. Основні матеріали					
1.	Трубка сталевая 10×800	шт.	1	33,30	33,30
2.	Трубка сталевая 30×100	шт.	1	169,91	169,91
3.	Лист металевий	шт.	15	57,00	855,00
4.	Текстоліт 200×200	шт.	1	280,14	280,14
5.	Фторопласт 10×100	шт.	1	574,52	574,52
6.	Пруток калібрований 16×1500	шт.	1	293,74	293,74
7.	Труби квадратного профілю	м	10	1047,30	1047,30
8.	Інші матеріали				911,47
Всього основних матеріалів		-	-	-	4165,38
2. Покупні комплектуючі вироби					
1.	Система ЧПУ	шт.	1	42140,0	42140,00
2.	Електродвигун Yaskawa SGMPH Sigma II	шт.	3	71470,0	214410,00
3.	Шпиндель	шт.	1	60200,0	60200,00
4.	Підшипник лінійний закритий LM16UU	шт.	6	392,00	2352,00
5.	Шків Desch 24-3m	шт.	3	834,05	2502,15
6.	Пас Bando HTD 309 3m	шт.	1	1575,00	1575,00
7.	Кульково-гвинтова передача	шт.	3	1407,0	4221,00
8.	Віброопора	шт.	3	1109,5	3328,50
9.	Інші покупні			17955,0	17955,00
Всього покупних		-	-	-	348683,65

B_T – транспортно-заготівельні витрати, грн.;

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

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

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

$B_{ес}$ – єдиний соціальний внесок, грн.;

$B_{щп}$ – відшкодування зносу інструмента та пристосувань цільового призначення, грн.;

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

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

Розрахунок собівартості зводимо до табл. 5.6.

Таблиця 5.6 – Повна собівартість та оптова ціна верстата

№ п.п	Стаття калькуляції	Коротке позначення	Метод розрахунку, джерело інформації	Результат, сума, грн.
1.	Матеріали основні	M_o	табл. 5.5	4165,38
2.	Матеріали допоміжні	M_d	4% від M_o	166,62
3.	Покупні напівфабрикати, комплектуючі вироби та послуги інших підприємств	Π_n	табл. 5.5	348683,65
4.	Зворотні відходи	$-B_{\text{зв}}$	6% від M_o	249,92
5.	Транспортно-заготівельні витрати	B_t	5% від $(M_o + M_d + \Pi_n)$	14120,63
6.	Паливо та енергія на технологічні цілі	$\Pi_{\text{тех}}, E_{\text{тех}}$	78% від M_o	13457,22
7.	Всього матеріальні витрати			380343,57
8.	Основна заробітна плата виробничих робітників	$З_{\text{ор}}$	табл. 5.4	17252,84
9.	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	$З_{\text{др}}$	10% від $З_{\text{ор}}$	1725,28
10.	Єдиний соціальний внесок	$B_{\text{сс}}$	22,0% від $(З_{\text{ор}} + З_{\text{др}})$	4175,19
11.	Відшкодування зносу інструментів та пристосувань цільового призначення	$B_{\text{цп}}$	8,0% від $З_{\text{ор}}$	1414,73
12.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання	B_o	табл. 5.4	49508,88
13.	Цехові витрати	$B_{\text{цех}}$	табл. 5.4	38462,83
14.	Загальнозаводські витрати	$B_{\text{зав}}$	180% від $З_{\text{ор}}$	31055,12
15.	Інші виробничі витрати	$B_{\text{ін}}$	2,0% від $З_{\text{ор}}$	345,06
16.	Виробнича собівартість	$C_{\text{вир}}$	Σ ст.1-15	524283,50
17.	Позавиробничі витрати	$B_{\text{пв}}$	1% від $C_{\text{вир}}$	5242,84
18.	Повна собівартість	$C_{\text{пов}}$	$C_{\text{вир}} + B_{\text{пв}}$	529526,34
19.	Прибуток	Π_p	15% від $C_{\text{пов}}$	79428,95
20.	Оптова ціна верстата	$\Pi_{\text{опт}}$	$C_{\text{пов}} + \Pi_p$	609000,0

Оптову ціну верстата розраховуємо за формулою:

$$Ц_{ont} = C_{нов} + \Pi_n, \quad (5.5)$$

де Π_n – нормативний прибуток, грн.:

$$\Pi_n = \frac{P_{np} \cdot C_{нов}}{100}, \quad (5.6)$$

де P_{np} – рентабельність маніпулятора, %

$$\Pi_n = \frac{529526,34 \cdot 15}{100} = 79428,95 \text{ грн.}$$

$$Ц_{ont} = 529526,34 + 79428,95 = 609000 \text{ грн.}$$

5.5 Визначення експлуатаційних витрат, які припадають на одиницю продукції в базовому та проектному варіантах

Розрахунок виконуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^m B_i, \quad (5.7)$$

де B_z – витрати на заробітну плату основну, додаткову та єдиний соціальний внесок, грн.;

$B_{ел}$ – витрати на силову електроенергію, грн.;

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

B_p – витрати на ремонт обладнання, грн.;

$B_{п}$ – витрати на утримання площі, грн.;

B_a – витрати на амортизацію обладнання, грн.;

B_n – витрати на налагодження верстата, грн.

Витрати на заробітну плату основну, додаткову та відрахування у соціальні фонди:

$$B_z = C_{zp} \frac{t_{um}}{60} \cdot (1 + K_o) \cdot (1 + K_c), \quad (5.8)$$

де: C_{zp} – середньо-годинна ставка робітника, грн.;

$t_{шт}$ – час обробки деталі, хв.;

K_d , K_c – коефіцієнти додаткової зарплати та єдиного соціального внеску відповідно.

В базовому варіанті:

$$B_3^{\text{баз}} = 70,180 \cdot \frac{4,41}{60} \cdot (1+0,1) \cdot (1+0,22) = 6,9223 \text{ грн.}$$

В проектному варіанті:

$$B_3^{\text{пр}} = 77,979 \cdot \frac{2,0}{60} \cdot (1+0,1) \cdot (1+0,22) = 3,4883 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію силову:

$$B_{\text{ел}} = \frac{N_y \cdot K_o \cdot K_N \cdot K_d}{\eta_m \cdot \eta_c} \cdot \frac{t_{\text{ум}}}{60} \cdot \Pi_{\text{ел}}, \quad (5.9)$$

де: N_y – установлена потужність електродвигунів верстата, кВт;

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

K_N – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за потужністю (приймають 0,5...0,8);

K_d – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів верстата за часом (приймають 0,3...0,5);

η_c – середній коефіцієнт корисної дії електродвигунів (приймають 0,86...0,9);

η_m – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі підприємства (приймають 0,92...0,96);

$\Pi_{\text{ел}}$ – ціна 1 кВт/год. силовій електроенергії без ПДВ, грн.

$$B_{\text{ел}}^{\text{баз}} = \frac{8 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 0,4}{0,86 \cdot 0,92} \cdot \frac{4,41}{60} \cdot 7,5 = 1,1078 \text{ грн.}$$

$$B_{\text{ел}}^{\text{пр}} = \frac{0,5 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 0,4}{0,86 \cdot 0,92} \cdot \frac{2,0}{60} \cdot 7,5 = 0,0293 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжні матеріали:

$$B_{\text{дм}} = \frac{M_{\text{зв}} \cdot R_{\text{м}} \cdot t_{\text{ум}}}{60 \cdot 100} \cdot K_n, \quad (5.10)$$

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

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

K_n – коефіцієнт, який враховує тип виробництва (для серійного виробництва $K_n=1$).

$$B_{\text{дм}}^{\text{баз}} = \frac{79,5 \cdot 8 \cdot 4,41}{60 \cdot 100} \cdot 1 = 0,4675 \text{ грн.}$$

$$B_{\text{дм}}^{\text{пр}} = \frac{79,5 \cdot 10 \cdot 2,0}{60 \cdot 100} \cdot 1 = 0,2650 \text{ грн.}$$

Витрати на експлуатацію універсального ріжучого інструменту:

$$B_{\text{ip}} = \frac{(S_u + pS_{\text{пер}}) \cdot \gamma \cdot t_{\text{ум}}}{t_e(p+1)} K_n, \quad (5.11)$$

де: S_u – первісна вартість універсального ріжучого інструменту, грн.;

p – кількість переточок ріжучого інструменту до повного зносу по лімітуючому розміру ріжучої грані [11, табл. 7.12.];

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

γ – питома значення машинного часу роботи обладнання в загальному варіанті його роботи [11, табл. 7.11.];

t_e – економічна стійкість інструменту, хв. [11, табл. 7.12.];

K_n – коефіцієнт обліку втрати інструменту [11, табл. 7.12].

$$B_{\text{ip}}^{\text{баз}} = \frac{(1197 + 5 \cdot 29,79) \cdot 0,7 \cdot 4,41}{90 \cdot (5+1)} \cdot 1,15 = 8,8487 \text{ грн.};$$

$$B_{\text{ip}}^{\text{пр}} = \frac{(1755,6 + 5 \cdot 29,79) \cdot 0,7 \cdot 2,0}{90 \cdot (5+1)} \cdot 1,15 = 5,6787 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт обладнання:

$$B_p = \frac{R_m \cdot P_{vm} + R_e \cdot P_{ve}}{F_{дрм}} \cdot \frac{t_{ум}}{60}, \quad (5.12)$$

де: P_{vm} , P_{ve} – відповідно річні витрати на всі види ремонту на одну категорію ремонтної складності механічної та електричної частини верстата, грн./рік;

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

$$B_p^{баз} = \frac{8 \cdot 880 + 6 \cdot 215}{3950} \cdot 720 \cdot 4,41 = 0,2114 \text{ грн.}$$

$$B_p^{пр} = \frac{10 \cdot 880 + 9,5 \cdot 720}{3950} \cdot \frac{2,0}{60} = 0,1320 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання приміщення:

$$B_{yn} = \frac{F_o \cdot K_f \cdot C}{F_{дрм}} \cdot \frac{t_{ум}}{60}, \quad (5.13)$$

де: F_o – виробнича площа, яку займає одиниця обладнання, м²;

K_f – коефіцієнт, який враховує додаткову площу (на проходи, проїзди, побутові та службові приміщення)

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

$$B_{yn}^{баз} = \frac{6,161 \cdot 2,5 \cdot 780}{3950} \cdot \frac{4,41}{60} = 0,2236 \text{ грн.}$$

$$B_{yn}^{пр} = \frac{1,0 \cdot 4,0 \cdot 780}{3950} \cdot \frac{2,0}{60} = 0,0263 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію верстата:

$$B_a = \frac{\Phi_{бал} \cdot H_a}{F_{дрм} \cdot 100} \cdot \frac{t_{ум}}{60}, \quad (5.14)$$

де: H_a – норма амортизації, %;

$\Phi_{\text{бал}}$ – балансова вартість верстата, грн., розраховується за формулою:

$$\Phi_{\text{бал}} = C_{\text{опт}} \cdot (1 + K_{\text{тр}} + K_{\text{м}} + K_{\text{ф}}), \quad (5.15)$$

де: $C_{\text{опт}}$ – 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), улаштування фундаменту (0,02...0,08).

$$\Phi_{\text{бал}}^{\text{баз}} = 1025650 \cdot (1 + 0,08 + 0,05 + 0,06) = 1220524 \text{ грн.}$$

$$\Phi_{\text{бал}}^{\text{пр}} = 609000 \cdot (1 + 0,08 + 0,05 + 0,06) = 724710 \text{ грн.}$$

$$B_{\text{а}}^{\text{баз}} = \frac{1220524 \cdot 15}{3950 \cdot 100} \cdot \frac{4,41}{60} = 4,4277 \text{ грн.}$$

$$B_{\text{а}}^{\text{пр}} = \frac{724710 \cdot 15}{3950 \cdot 100} \cdot \frac{2,0}{60} = 1,1922 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків зводимо до таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 – Експлуатаційні витрати (собівартість обробки)

№ п.п	Експлуатаційні витрати	Умовне позначення	Варіанти	
			Базовий	Проектний
1.	Заробітна плата робітника основна, додаткова з відрахуваннями у соціальні фонди	B_z	6,9223	3,4883
2.	Силова електроенергія	$B_{\text{ел}}$	1,1078	0,0293
3.	Допоміжні матеріали	$B_{\text{дм}}$	0,4675	0,2650
4.	Універсальний ріжучий інструмент	$B_{\text{ін}}$	0,2114	0,1320
5.	Ремонт обладнання	$B_{\text{р}}$	8,8487	5,6787
6.	Утримання приміщення	$B_{\text{уп}}$	0,2236	0,0263
7.	Амортизація обладнання	$B_{\text{а}}$	4,4277	1,1922
8.	Загальна сума	$B_{\text{с}}$	22,3828	10,9472

5.6 Розрахунок показників економічної ефективності

5.6.1. Річний економічний ефект, який отримує виробник верстата, виконуємо за формулою:

$$E_{p.в} = (C_{онт} - C_{нов}) \cdot \Pi_в - E_n \cdot K_в \quad (5.16)$$

де: $C_{онт}$ – оптова ціна проектного верстату, грн.;

$C_{нов}$ – повна собівартість проектного верстату, грн.;

$\Pi_в$ – програма виробництва об'єктів, шт./рік;

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

$K_в$ – додаткові капітальні витрати у виробника, грн.

$$K_в = B_{нк} + B_{нт}, \quad (5.17)$$

де: $B_{нк}$, $B_{нт}$ – відповідно, вартість конструкторської та технологічної підготовки виробництва, грн.

$$K_в = 393532 + 118276 = 511808 \text{ грн.}$$

$$E_{p.в} = (609000 - 529526) \cdot 5 - 0,16 \cdot 511808 = 315260 \text{ грн.}$$

5.6.2. Річний економічний ефект, який отримує підприємство споживач:

$$E_{p.сн} = (B_e^{\delta} - B_e^n) \cdot N_{\delta} - E_n \cdot K_{сн} \quad (5.18)$$

де: B_e^{δ}, B_e^n – відповідно річні експлуатаційні витрати у базовому та проектному варіанті, грн.;

N_{δ} – річна програма випуску продукції, грн.;

K_{cn} – додаткові капітальні витрати у споживача, грн.;

$$K_{cn} = \Phi_{бал}^{np} \cdot Q_{np} - \Phi_{бал}^{баз} \cdot Q_{баз} \quad (5.19)$$

де: $\Phi_{бал}^{np}$, $\Phi_{бал}^{баз}$ - відповідно, балансова вартість проектного та базового верстатів, грн.;

Q_{np} , $Q_{баз}$ – потреба в об'єктах відповідно в проектному та в базовому варіантах для виконання річної програми випуску деталей, шт.

$$Q = \frac{N_d \cdot t_{um}}{F_{дрм} \cdot 60 \cdot K_{вн}}, \quad (5.20)$$

де: $K_{вн}$ – коефіцієнт виконання норм часу.

В базовому варіанті:

$$Q_{баз} = \frac{10000 \cdot 4,41}{3950 \cdot 60 \cdot 1,01} = 0,18$$

Приймається 1 верстат з коефіцієнтом завантаження $\eta=0,18$.

В проектному варіанті:

$$Q_{np} = \frac{10000 \cdot 2,0}{3950 \cdot 60 \cdot 1,01} = 0,08$$

Приймається 1 верстат з коефіцієнтом завантаження $\eta=0,08$.

$$K_{cn} = 724710 \cdot 1 - 1220524 \cdot 1 = -495814 \text{ грн.}$$

$$E_{p.cn} = (22,3828 - 10,9472) \cdot 10000 - 0,16 \cdot (-153629) = 193700 \text{ грн.}$$

5.6.3. Строк окупності додаткових капітальних вкладень у виробника:

$$T_{ок.в} = \frac{K_{с}}{(C_{опт}^{np} - C_{нов}^{np}) \cdot P_{с}} = \frac{511808}{(609000 - 529526) \cdot 5} = 1,3 \text{ р.}, \quad (5.21)$$

5.6.5 У підсумку складаємо зведену таблицю техніко-економічних показників (табл. 5.8).

Таблиця 5.8 – Підсумкові техніко-економічні показники базового та проектного варіантів

№	Показники	Одиниця	Варіанти		Зміна % ($\pm$)
			Базовий	Проект	
1.	Програма виробництва верстатів	шт./р ік	—	5	—
2.	Річний випуск продукції із застосуванням верстата	шт./р ік	10000	10000	-
3.	Штучний час обробки виробу	хв.	4,41	2,0	-54,6
4.	Потреба у верстатах для виконання річної програми випуску деталей	шт.	1	1	-
5.	Коефіцієнт завантаження верстата	η_z	0,18	0,08	-55,6
6.	Собівартість (повна) виготовлення верстату	грн.	—	529526	—
7.	Оптова ціна верстату	грн.	1025650	609000	-68,4
8.	Балансова вартість верстатів у споживача	грн.	1220524	724710	-68,4
9.	Собівартість одиниці обробки з застосуванням верстату	грн.	22,323	10,947	-103,9
10	Капітальні витрати на конструкторську та технологічну підготовку виробництва	грн.	—	511808	—
11	Строк окупності додаткових капітальних витрат у виробника	років	—	1,3	—
12	Річний економічний ефект:				
	а) у виробника: б) у споживача:	грн. грн.	— —	315260 193700	— —

5.7. Організаційно-планові розрахунки.

5.7.1 Розробка плану виконання комплексу робіт з конструкторської підготовки виробництва.

Складання такого плану виконуємо з використанням сіткових методів планування та організації виробництва.

Комплекс робіт, на який необхідно розробити оптимізований план, представимо у вигляді сіткової моделі (рис. 5.1). Дані про тривалість виконання кожної роботи та попередньо прийняту кількість виконавців зводимо до табл. 5.9.

Таблиця 5.9

Дані про комплекс робіт з проектування верстата

Номер роботи	Шифр роботи	Зміст роботи	Тривалість виконання, роб. дні	Кількість виконавців, осіб
1	2	3	4	5
1.	1–2	Аналіз патентної літератури	30–45	10
2.	1–3	Аналіз науково-технічної літератури	11–18	5
3.	2–3	Перевірка конструкції на патентну чистоту	25–42	12
4.	3–4	Розробка кінематичної схеми верстата	6–8	2
5.	4–5	Розробка електричної схеми верстата	11–20	6
6.	4–6	Розробки схеми ЧПУ	8–15	4
7.	4–7	Розробка загального вигляду верстата	16–22	5
8.	7–8	Розробка конструкції шпиндельного вузла	9–20	8
9.	7–9	Розробка конструкції приводів	7–23	4
10.	7–13	Розробка конструкції напрямних і рамки	8–23	6
11.	8–11	Деталювання шпиндельного вузла	12–27	12
12.	9–12	Деталювання приводів	8–26	7
13.	10–13	Деталювання напрямних і рамки	11–31	9
14.	11–14	Розрахунок шпиндельного вузла	7–16	5
15.	12–14	Розрахунок кульково-гвинтової передачі	5–15	3
16.	13–14	Розрахунок напрямних	6–17	4
17.	14–15	Розробка креслень загального вигляду верстата та формування його промислово-художньої естетики	37–50	6

1	2	3	4	5
18.	15–17	Розрахунок показників економічної ефективності конструкції	8–12	5
19.	15–16	Контроль креслень на технологічність	5–7	1
20.	16–17	Нормоконтроль креслень	5–6	3
21.	17–18	Розробка відомостей специфікацій	6–12	4
22.	17–19	Розробка відомостей покупних виробів	7–10	3
23.	19–20	Передача документації на науково-технічну раду (НТР)	3–5	1
24.	20–21	Доробка документації за зауваженнями НТР	11–16	6
25.	21–22	Комплектування та передача документації в цех	6–10	4

5.7.2. Визначення очікуваної тривалості робіт

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

$$t_{\text{оч}} = \frac{3 \cdot t_{\min} + 2 \cdot t_{\max}}{5}. \quad (5.22)$$

Так, наприклад, для роботи 4–5:

$$t_{\text{оч}(1-2)} = \frac{3 \cdot 11 + 2 \cdot 20}{5} = 15 \text{ роб.днів.}$$

Значення $t_{\text{оч}}$ округлюємо до цілих чисел. Наприклад, для роботи 4–5 приймаємо 15 роб. днів. Результати записуємо до табл. 5.10, а також наносимо на вихідну сітьову модель (рис. 5.1). При цьому тривалість роботи вказуємо над стрілкою, кількість виконавців – під нею.

5.7.3. 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.

Параметри робіт

Шифр роботи	Тривал. виконання, роб. дні				Кількість виконавців ($K_{\text{вик}}$)		Коефіцієнт напруженості		σ^2 , роб. дні
	$t_{\min}$	$t_{\max}$	Очікувана ($t_{\text{оч}}$)		до опти-мізації	після оп-тимізації	до опти-мізації	після оп-тимізації	
			до опти-мізації	після оп-тимізації					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 - 3	11	18	14	35	5	2	0,20588	0,58333	1,96
1 - 2	30	45	36	28	10	13	1	1	9
2 - 3	25	42	32	32	12	12	1	1	11,56
3 - 4	6	8	7	7	2	2	1	1	0,16
4 - 5	11	20	15	15	6	6	0,83333	1	3,24
4 - 6	8	15	11	15	4	3	0,61111	1	1,96
4 - 7	16	22	18	15	5	6	1	1	1,44
5 - 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6 - 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7 - 8	9	20	13	13	8	8	0,97674	1	4,84
7 - 9	7	23	13	17	4	3	0,86047	0,97619	10,24
7 - 10	8	23	14	12	6	7	1	0,97619	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8 - 11	12	27	18	18	12	12	0,97674	1	9
9 - 12	8	26	15	15	7	7	0,86047	0,97619	12,96
10 - 13	11	31	19	19	9	9	1	0,97619	16
11 - 14	7	16	11	11	5	5	0,97674	1	3,24
12 - 14	5	15	9	9	3	3	0,86047	0,97619	4
13 - 14	6	17	10	10	4	4	1	0,97619	4,84
14 - 15	37	50	42	42	6	6	1	1	6,76
15 - 17	8	12	10	10	5	5	0,90909	0,90909	0,64
15 - 16	5	7	6	6	1	1	1	1	0,16
16 - 17	5	6	5	5	3	3	1	1	0,04
17 - 18	6	12	8	8	4	4	1	1	1,44
17 - 19	7	10	8	8	3	3	1	1	0,36
18 - 19	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19 - 20	3	5	4	4	1	1	1	1	0,16
20 - 21	11	16	13	13	6	6	1	1	1
21 - 22	6	10	8	8	4	4	1	1	0,64

Ранній строк здійснення i -тої події визначається тривалістю максимального шляху від початкової події до даної (табл. 5.11). Наприклад, для події 5 він складає 90 роб. днів.

Ранній строк здійснення кінцевої події дорівнює тривалості критичного шляху $L_{кр}$. В даному випадку він складає 222 роб. дня.

Пізні строки здійснення подій розраховуємо за наступною формулою, а отримані величини заносимо до табл. 5.11.

$$T_{\Pi_i} = L_{\text{кр}} - L_{\text{max}_{i-c}}, \quad (5.23)$$

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

Наприклад, для події 5:

$$T_{\Pi_5} = 222 - 129 = 93 \text{ роб. дня}$$

Резерви часу здійснення подій визначаємо за наступною формулою, а отримані величини заносимо до таблиці 3.11.

$$P_{\Pi_i} = T_{\Pi_i} - T_{P_i}. \quad (5.24)$$

Наприклад, для події 5:

$$P_{\Pi_{12}} = 93 - 90 = 3 \text{ роб.дні}$$

Таблиця 5.11

Параметри подій (робочі дні)

Шифр подій	До оптимізації			Після оптимізації		
	T_p	T_{Π}	P_{Π}	T_p	T_{Π}	P_{Π}
1	0	0	0	0	0	0
2	36	36	0	28	28	0
3	68	68	0	60	60	0
4	75	75	0	67	67	0
5	90	93	3	82	82	0
6	86	93	7	82	82	0
7	93	93	0	82	82	0
8	106	107	1	95	95	0
9	106	112	6	99	100	1
10	107	107	0	94	95	1
11	124	125	1	113	113	0
12	121	127	6	114	115	1
13	126	126	0	113	114	1
14	136	136	0	124	124	0
15	178	178	0	166	166	0
16	184	184	0	172	172	0
17	189	189	0	177	177	0
18	197	197	0	185	185	0
19	197	197	0	185	185	0
20	201	201	0	189	189	0
21	214	214	0	202	202	0
22	222	222	0	210	210	0

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:

$$K_{n_{i-k}} = \frac{L_{\max} - L_{\text{кр.с}}}{L_{\text{кр}} - L_{\text{кр.с}}}, \quad (5.25)$$

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

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

Отриманні величини K_n заносимо до табл. 5.10.

Наприклад, для роботи 4–6:

$$K_{n_{4-23}} = \frac{215 - 204}{222 - 204} = 0,611.$$

5.7.4. Оптимізація сітьового графіка

Для скорочення тривалості критичного шляху та забезпечення рівномірного завантаження виконавців переведемо по одному виконавцю з робіт 4–6, 7–9 на роботи 4–7, 7–10 відповідно, і три виконавці з роботи 1–3 на роботу 1–2. При переводі виконавців з однієї роботи на іншу змінюється їх тривалість.

Нова тривалість роботи визначається за формулою:

$$t'_{\text{оч}_{i-k}} = \frac{t_{\text{оч}_{i-k}} \cdot K_{\text{вик}_{i-k}}}{K'_{\text{вик}_{i-k}}}, \quad (5.26)$$

де $t_{\text{оч}_{i-k}}$, $K_{\text{вик}_{i=k}}$ – відповідно очікувана тривалість роботи $i-k$ та кількість її виконавців до оптимізації;

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

Так, для роботи 4–6 після перерозподілу виконавців нова тривалість:

$$t'_{\text{оч}_{9-12}} = \frac{11 \cdot 4}{3} = 14,667 \text{ роб. днів}$$

Приймаємо $t'_{\text{оч}_{9-12}} = 15 \text{ роб. днів}$.

Отримані нові значення очікуваної тривалості робіт та їх виконавців заносимо до табл. 5.10 і наносимо на сітьовий графік. Такий графік показано на рис. 5.2, а розрахунки його параметрів у таблицях 5.10, 5.11.

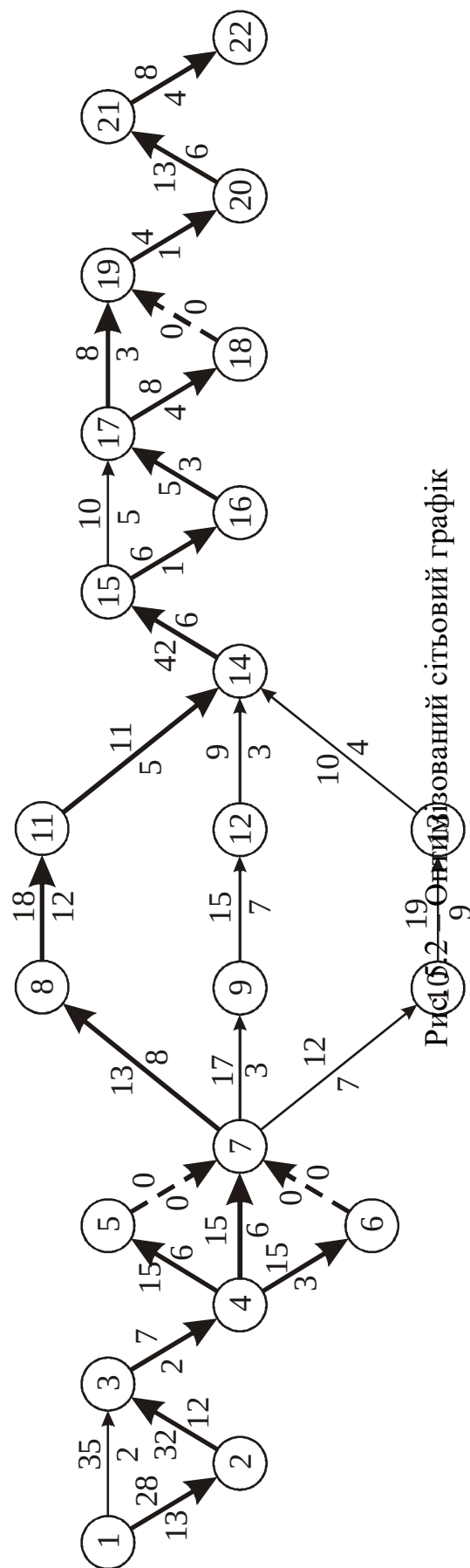
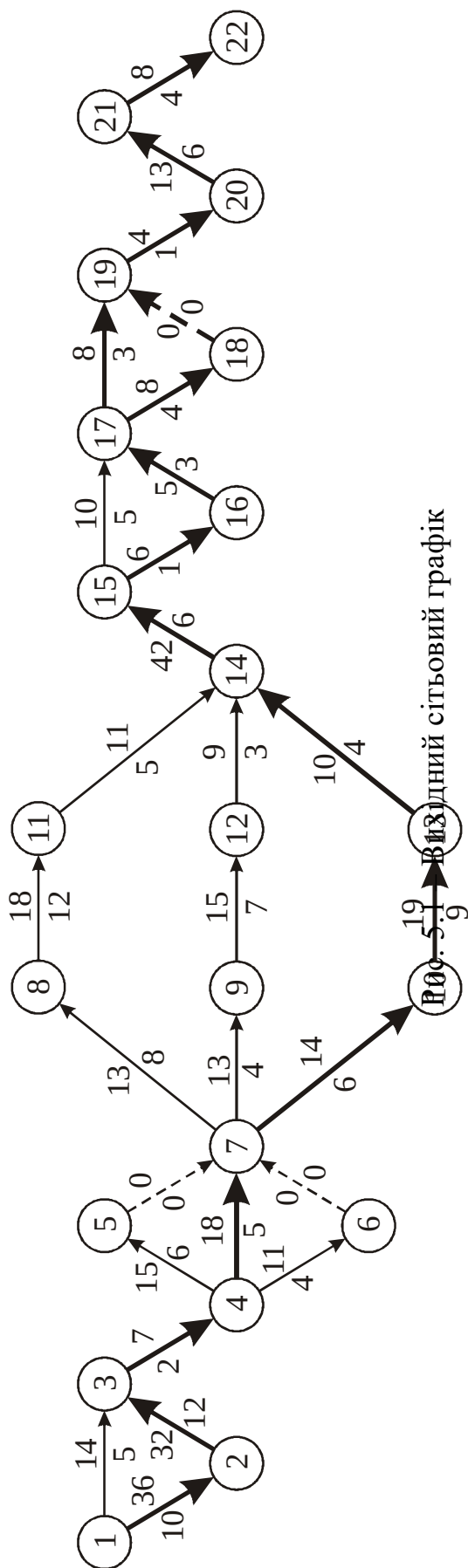
Як свідчать розрахунки, тривалість критичного шляху сітьового графіку після оптимізації складає 210 робочих днів. В порівнянні з вихідним графіком вона скоротилася на 12 робочих днів. При цьому тривалість робіт з події 4 по подію 7 вирівнялися і всі вони вважаються такими, що лежать на критичному шляху. В той же час критичний шлях з ланцюга робіт 7–10, 10–13, 13–14 перемістився на послідовність робіт 7–8, 8–11, 11–14.

5.7.5. 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.

Потрібна кількість виконавців коливається від 1 до 12 чоловік. Зменшити потрібну кількість виконавців і раціонально їх завантажити в окремі проміжки часу можливо за рахунок переміщення вправо некритичних робіт, що мають резерви часу. Внаслідок вдалого зменшення тривалості критичного шляху єдиним варіантом, при якому досягається зменшення виконавців в окремий проміжок часу, буде переміщення роботи 7–9 вправо. При цьому з 29-го по 31-й день проекту кількість одночасно працюючих виконавців зменшиться на 1, а з 25-го по 27-й день – на 2. Зменшити максимальну кількість одночасно працюючих виконавців неможливо, оскільки всі роботи, що проводяться у даний час, лежать на критичному шляху.

Нове положення робіт на графіку та діаграмі зображено суцільною лінією, а початкове положення цих робіт – пунктирною лінією.



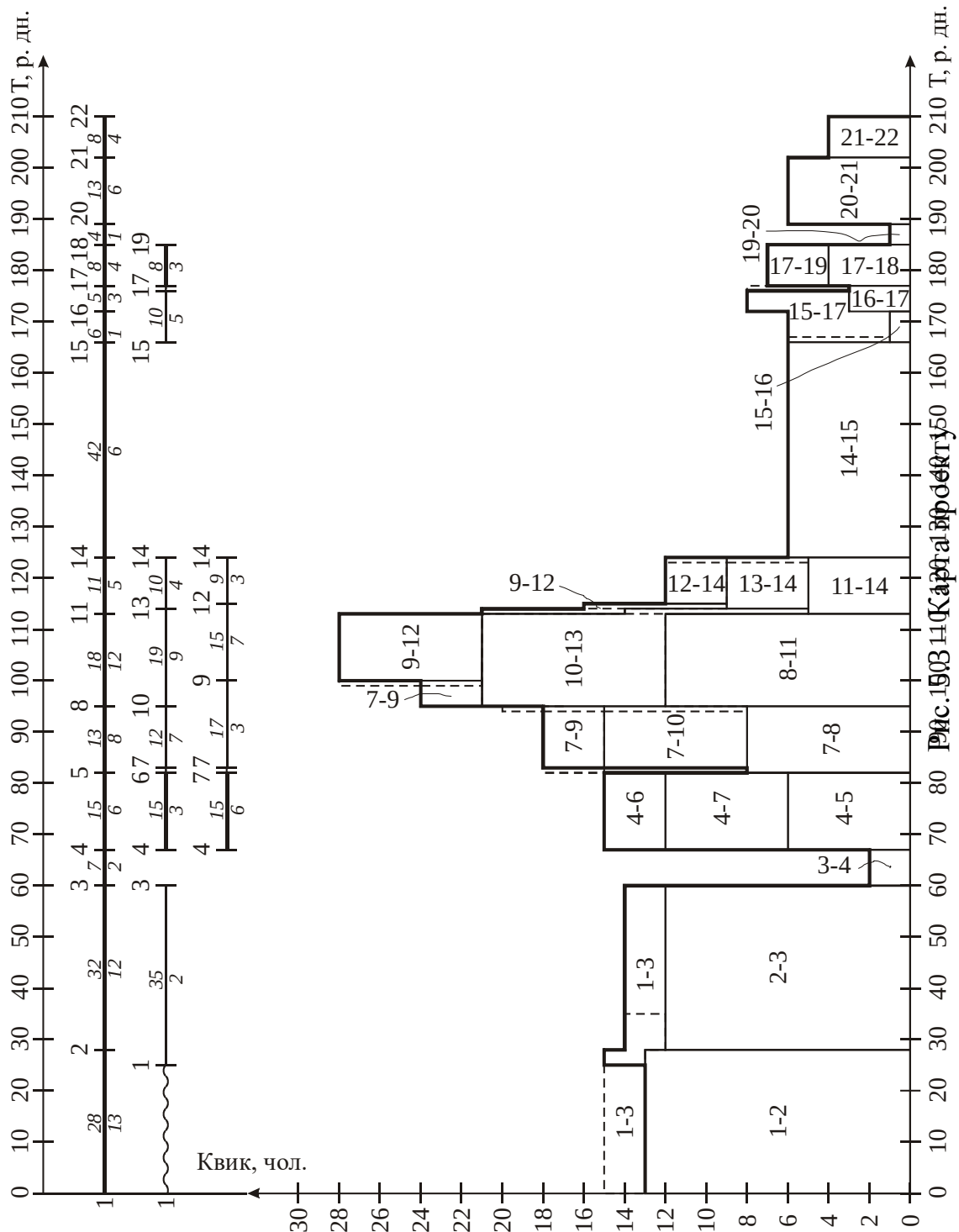


Рис. 19.03.11 Критичний шлях

5.7.6. 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 розраховують дисперсії тривалості виконання робіт, які лежать на критичному шляху, за формулою:

$$\sigma_{i-k}^2 = 0,04(t_{\max_{i-k}} - t_{\min_{i-k}})^2. \quad (5.27)$$

Результати розрахунків заносимо до табл. 5.10. Наприклад, дисперсія тривалості роботи 4–6:

$$\sigma_{10-11}^2 = 0,04(15 - 8)^2 = 1,96 \text{ роб. день}$$

Середньо квадратичне відхилення тривалості критичного шляху:

$$\sigma_{\text{кр}} = \pm \sqrt{\sum \sigma_{i-k}^2}. \quad (5.28)$$

Зважаючи на те, що у даному випадку є шість варіантів критичного шляху, необхідно до розгляду брати максимальну можливу суму дисперсій. Отже:

$$\sigma_{\text{кр}} = \pm \sqrt{18,32} = \pm 4,28 \text{ роб. днів}. \quad (5.29)$$

Таким чином, планова тривалість критичного шляху складає:

$$L_{\text{кр}} = 210 \pm 4 \text{ роб. дні}.$$

ВИСНОВКИ

1. Аналіз існуючих схем механізмів паралельної структури показав, що одним з раціональних варіантів компоновки трьохкоординатного верстата є використання механізму паралельної структури типу «ортоглайд». При цьому переміщення робочого органу по координатам X , Y та Z відбувається за рахунок переміщення приводів по ортогонально розміщеним напрямним, що унеможливорює виникнення особливих положень механізму.

2. На ряду з іншими верстатами даного типу вдалося зменшити матеріаломісткість конструктивних елементів, а відповідно і енергозатратність приводів.

3. Розраховано та праналізовано зворотні кінематичні залежності механізму.

4. Розроблено 3D модель верстата з відповідними конструктивними елементами, працездатність яких підтверджена відповідними розрахунками.

5. Визначено собівартість, витрати на проектування, виготовлення та експлуатацію верстата. Економічний ефект складає 315260 грн. у виробника і 193700 грн. у споживача, що досягається за рахунок зниження вартості та підвищення продуктивності обробки. Строк окупності капітальних вкладень 1,3 роки

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Крайнев А.Ф. Идеология конструирования машин. – М.: Машиностроение, 2003.- 384с.
2. Бушуев В.В. Практика конструирования машин.- М.: Машиностроение, 2006.- 448с.
3. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теория упругости. – М.: Наука, 1987. – 246 с.
4. Иванов М.Н. Детали машин: Учеб. Для студентов вузов/ Под ред. В.А. Финогенова. – 6-е изд., перераб. - М.: Высш. шк., 2000. – 383 с.: ил.
5. Агрегатно-модульне технологічне обладнання / Крижанівський В.А., Кузнєцов Ю.М., Кириченко А.М. та ін. / Під ред. Ю.М. Кузнєцова. Навч. посібник для ВНЗ у 3-х част. – Кіровоград, 2003. – Частина І. Принципи побудови агрегатно-модульного технологічного обладнання – 422 с.
6. Бушуев В.В. Мехатронные системы в станках // СТИН – 1998. -№ 9, 10
7. 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
8. Кириченко А.Н. Станки с параллельной кинематикой: быстрее, точнее, прочнее // Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2005. – №9. – С. 26-28
9. 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
10. Обрабатывающее оборудование нового поколения. Концепция проектирования / В.Л. Афонин, А.Ф. Крайнев, В.Е. Ковалев и др.; Под ред. В.Л. Афолина. – М.: Машиностроение, 2001.– 256 с., ил
11. Расчет экономической эффективности новой техники. Справочник (Под ред. К.М. Великанова - Л. Машиностроение, 1975,432с.)
- 12.Расчеты экономической эффективности новой техники. Справочник (2-е издание - дополненное и переработанное. Под ред. К.М.,Великанова, Л., Машиностроение, 1990)

13. Сітьові методи в плануванні та організації виробництва. (Укл.: В.М. Глух, І.В. Складенко, Л.М. Романюк, - Кіровоград, КІСМ, 1998)
14. Основи охорони праці: Підручник / В.Ц. Жидецький.-Львів: Афіша, 2002-320 с.
15. Охорона праці в машинобудуванні: Підручник для машинобудівних вузів / Е.Я. Юдин, С.В. Белов, С.К. Баланцев та ін.; Під ред. Е.Я. Юдина, С.В. Белова – 2-ге вид., перепрац. і доп. – М.: Машинобудування, 1983, 432с., іл.
16. Кодекс України про адміністративні правопорушення: Відомості Верховної Ради Української РСР (ВВР) 1984, додаток до № 51, ст.1122.
17. Кодекс законів про працю України: Затверджується Законом № 322-VIII від 10.12.71 ВВР, 1971, додаток до № 50, ст. 375