

Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра “Машинобудування, мехатроніки і робототехніки”

«Допущено до захисту»
Завідувач кафедри ММіР
к.т.н., доцент
_____ Андрій ГРЕЧКА
«_____» _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему:

«Дослідження верстата з паралельною кінематикою»
«Study of a machine with parallel kinematics»

Виконав здобувач вищої освіти 2-го
року магістратури групи ПМ-23М-3
ОПП «Прикладна механіка»
спеціальності 131 «Прикладна
механіка»
_____ В’ячеслав КОЛІСНИЧЕНКО

Керівник роботи к.т.н., доцент
_____ Іван ВАЛЯВСЬКИЙ

Рецензент: _____

Кропивницький – 2024

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-професійна програма	Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ММР
_____ Андрій ГРЕЧКА

«_____» _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА
В'ячеслава КОЛІСНИЧЕНКА**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження верстата з паралельною кінематикою

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

3. Строк подання роботи до захисту « » _____ 2024 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи:

Метою роботи є: дослідження впливу геометричних параметрів кінематичних ланок верстата з паралельною кінематикою на переміщення його виконавчого органу.

Завдання:

- виконати аналіз компоновок верстатів з паралельною кінематикою, їх переваг і недоліків;
- визначити кінематичні залежності верстата з паралельною кінематикою, вирішити пряму і зворотну задачі кінематики;
- проаналізувати можливість здійснення виконавчим органом вертикальних і горизонтальних рухів при різних геометричних параметрах кінематичних ланок;
- виконати необхідні економічні розрахунки.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п / п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	ВСТУП	Вересень 2024	вик.
2	РОЗДІЛ 1	Вересень-жовтень 2024	вик.
3	РОЗДІЛ 2	Жовтень 2024	вик.
4	РОЗДІЛ 3	Жовтень-листопад 2024	вик.
5	РОЗДІЛ 4	Листопад 2024	вик.
6	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	Листопад-грудень 2024	вик.
7	Графічна частина	Листопад-грудень 2024	вик.

Дата видачі завдання «____» _____ 2024 р.

Керівник роботи _____ Іван ВАЛЯВСЬКИЙ
(підпис)

Завдання прийнято до виконання «____» _____ 2024 р.

Здобувач _____ В'ячеслав КОЛІСНИЧЕНКО
(підпис)

Анотація

Колісниченко В.Р. Дослідження верстата з паралельною кінематикою: кваліфікаційна робота для освітнього ступеня «магістр»: спец. 131 «Прикладна механіка» / наук. кер. І. А. Валявський; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2024. – 70 с. Матеріали презентації 9 креслень.

Метою роботи є дослідження впливу геометричних параметрів кінематичних ланок верстата з паралельною кінематикою на переміщення його виконавчого органу.

В роботі проведено аналіз компоновок верстатів з паралельною кінематикою, їх переваг і недоліків. Також вирішено пряму і зворотну задачу кінематики для верстата з паралельною кінематикою типу «ножиці».

Розглянуто узгодженість рухів кінематичних ланок при реалізації типових рухів виконавчого органу. Проаналізовано можливість здійснення виконавчим органом вертикальних і горизонтальних рухів при різних геометричних параметрах кінематичних ланок. Виконано необхідні економічні розрахунки.

Актуальність: досліджено вплив геометричних параметрів кінематичних ланок верстата з паралельною кінематикою на переміщення його виконавчого органу.

Практичне значення: вирішено пряму та зворотну задачі кінематики для верстата з паралельною кінематикою типу «ножиці».

Ключові слова: паралельна кінематика, верстат, кінематичний аналіз, робочий простір.

Annotation

Viacheslav KOLISNYCHENKO. Study of a machine with parallel kinematics.

M

a

s The purpose of the work is to study the influence of the geometric parameters of the kinematic links of a machine with parallel kinematics on the movement of its executive body.

r The paper analyzes the layouts of machines with parallel kinematics, their advantages and disadvantages. The direct and inverse problem of kinematics for a machine with parallel kinematics of the "scissors" type has also been solved.

The coherence of the movements of kinematic links during the implementation of typical movements of the executive body is considered. The possibility of the executive body performing vertical and horizontal movements with different geometric parameters of the kinematic links was analyzed. Necessary economic calculations have been performed.

i *Relevance:* the effect of the geometric parameters of the kinematic links of the machine tool with parallel kinematics on the movement of its executive body was investigated.

Practical significance: direct and inverse kinematics problems are solved for a machine with parallel kinematics of the "scissors" type.

N *Key words:* parallel kinematics, machine tool, kinematic analysis, working space.

U

,

2

0

2

.

-

7

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ	
1.1. Загальні відомості	8
1.2. Історичний розвиток механізмів паралельної структури	9
1.3. Переваги і недоліки	12
1.4. Існуючі верстати з паралельною кінематикою	13
1.5. Перспективи розвитку верстатів з паралельною кінематикою	24
РОЗДІЛ 2 КІНЕМАТИЧНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ВЕРСТАТА З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ	28
2.1. Вирішення прямої задачі кінематики	29
2.2. Вирішення зворотної задачі кінематики.....	34
РОЗДІЛ 3 УЗГОДЖЕНІСТЬ РУХІВ КІНЕМАТИЧНИХ ЛАНОК ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ ТИПОВИХ РУХІВ ВИКОНАВЧОГО ОРГАНУ.....	40
РОЗДІЛ 4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ОБГРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	52
ВИСНОВКИ.....	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	68

ВСТУП

В сучасному високорозвиненому індустріальному суспільстві відбувається постійна інтеграція нових технологій, зумовлена ринковими відносинами та необхідністю підвищення конкурентоспроможності продукції. Таким чином, конкурентна боротьба за ринки збуту верстатобудівної продукції вимагає постійного вдосконалення технологічного обладнання. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою, завдяки своїм специфічним властивостям, здатне вирішити більшу кількість завдань, що ставляться сучасним виробництвом, включно з: реалізацією надвисоких швидкостей робочих, допоміжних та установчих переміщень рухомих виконавчих органів; модульною конструкцією технологічного обладнання; високою точністю позиціонування та динамічними характеристиками.

Тому створення та дослідження технологічного обладнання з паралельною кінематикою, що дозволить розширити функціональні можливості, підвищити продуктивність, ефективність проектування та експлуатації, є актуальним науковим завданням.

Метою роботи є дослідження впливу геометричних параметрів кінематичних ланок верстата з паралельною кінематикою типу «ножиці» на переміщення його виконавчого органу.

В роботі необхідно виконати аналіз компоновок верстатів з паралельною кінематикою, їх переваг і недоліків, визначити кінематичні залежності верстата з паралельною кінематикою, вирішити пряму і зворотну задачі кінематики. Проаналізувати можливість здійснення виконавчим органом вертикальних і горизонтальних рухів при різних геометричних параметрах кінематичних ланок, що дозволить створювати конструкції верстатів з паралельною кінематикою з найбільшим діапазоном робочих рухів.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ

1.1. Загальні відомості

Маніпулятори з паралельною кінематикою привертають увагу дослідницьких інститутів і промисловості завдяки динамічним характеристикам, жорсткості конструкції та високій точності завдяки замкненим кінематичним контурам і відсутності накопичення похибок.

Перші прототипи верстатів з паралельною кінематикою (ВПК) були представлені громадськості в 1994 році компанією Ingersoll та Giddings & Lewis (рис. 1.1 та рис. 1.2). За останні десятиліття, згідно з [14], було побудовано понад 100 різних механізмів паралельної структури, в основному як прототипи або академічних досліджень. Хоча минуло вже багато років з моменту появи перших комерційних верстатів з паралельною кінематикою, але вони не отримали широкого розповсюдження в промисловості.

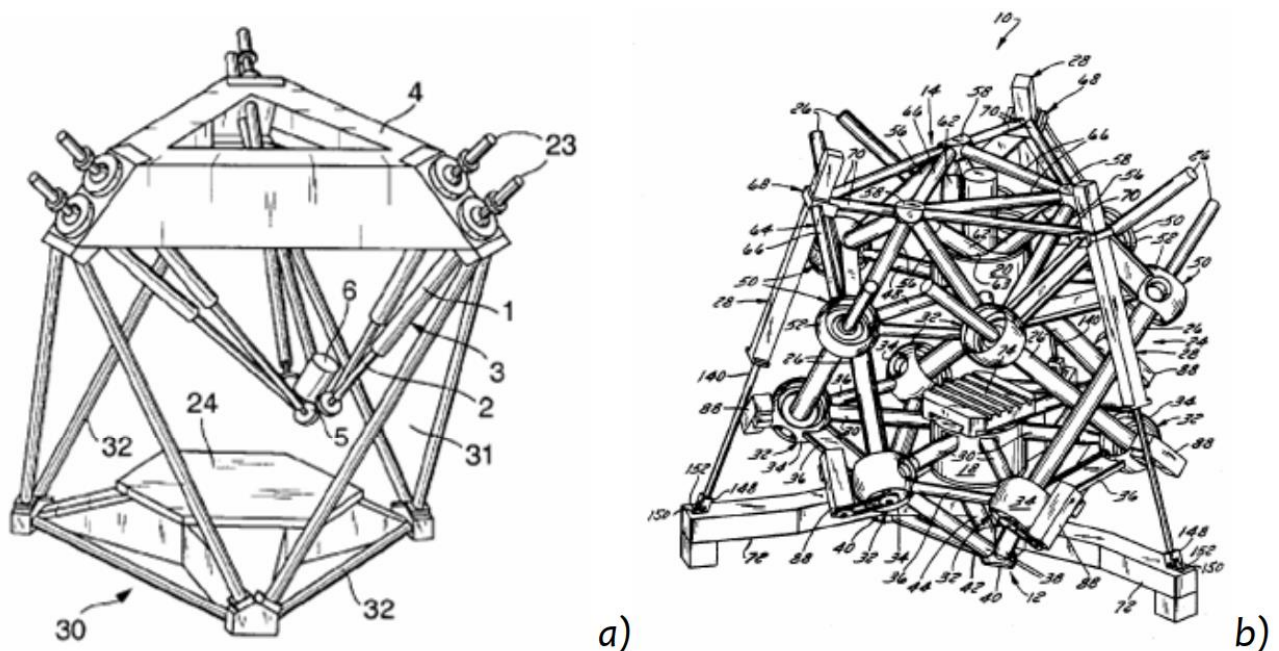


Рис. 1.1. Схеми верстатів з паралельною кінематикою:

а) Octahedral Hexapod фірми Ingersoll; б) Верстат Variax фірми Giddings & Lewis

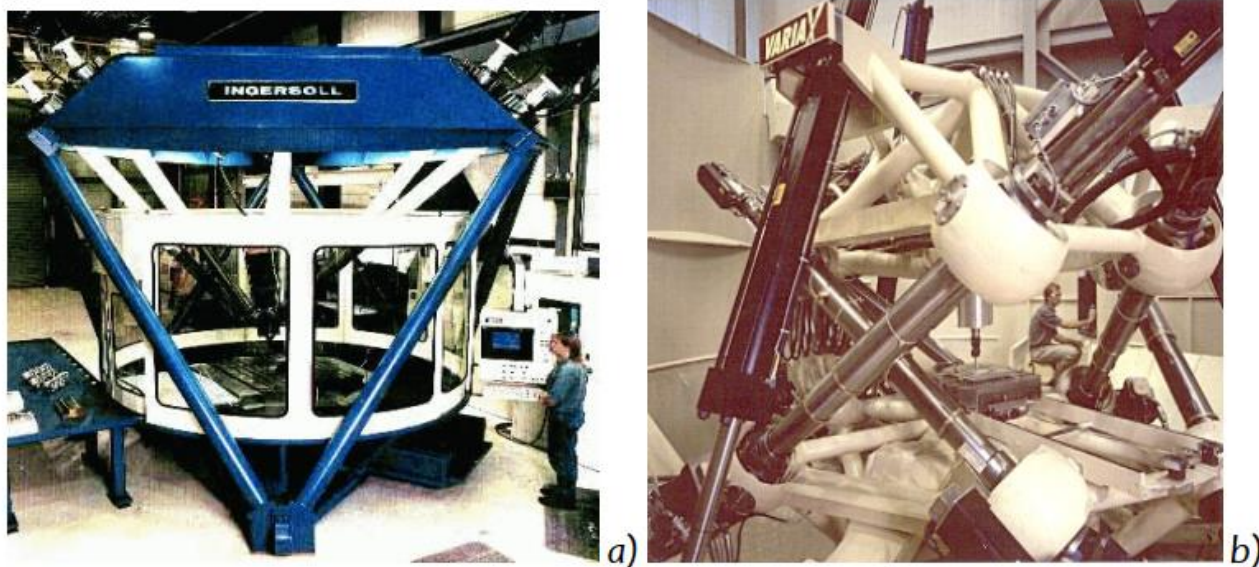


Рис. 1.2. Зовнішній вигляд верстатів з паралельною кінематикою:
 а) Octahedral Hexapod фірми Ingersoll; б) Верстат Variac фірми Giddings & Lewis

На це є дві причини. По-перше, з самого початку появи подібних верстатів стало очевидно, що реалізація їх теоретичних можливостей на практиці породжує багато нових проблем. Друга причина - це психологічні аргументи: недовіра до нової, дивної на вигляд технології, небажання першими випробувати нову технологію, відсутність загальноприйнятих стандартів для оцінки споживчої цінності верстатів з паралельною кінематикою [17].

Крім того, існують протилежні думки щодо верстатів з паралельною кінематикою. Стверджується, що ця концепція поступається серійним верстатам і практично не є корисною [20].

1.2. Історичний розвиток механізмів паралельної структури

Історично паралельні механізми (замкнені ланцюгові структури) привертали увагу переважно математиків, оскільки вони пропонують цікаві проблеми. Деякі теоретичні проблеми, пов'язані з цим типом механізмів, були згадані ще в 1645 році Крістофером Реном, потім у 1813 році Коші і в 1867

році Лебегом. Однією з головних теоретичних проблем у цій галузі був аналіз сингулярностей. Але очевидно, що на той час будь-якого практичного застосування цього тилу механізмів не було.

У 50-60-х роках минулого століття паралельні механізми типу «гексапод» (рис. 1.3, а) використовувалися в симуляторах руху: машині для випробування шин [11] (рис. 1.3, б) та авіасимуляторі [19]. Ще у 60-х роках минулого століття застосування паралельних структур у верстатах обговорювалось, але було відхилено через відсутність технологій управління [22].

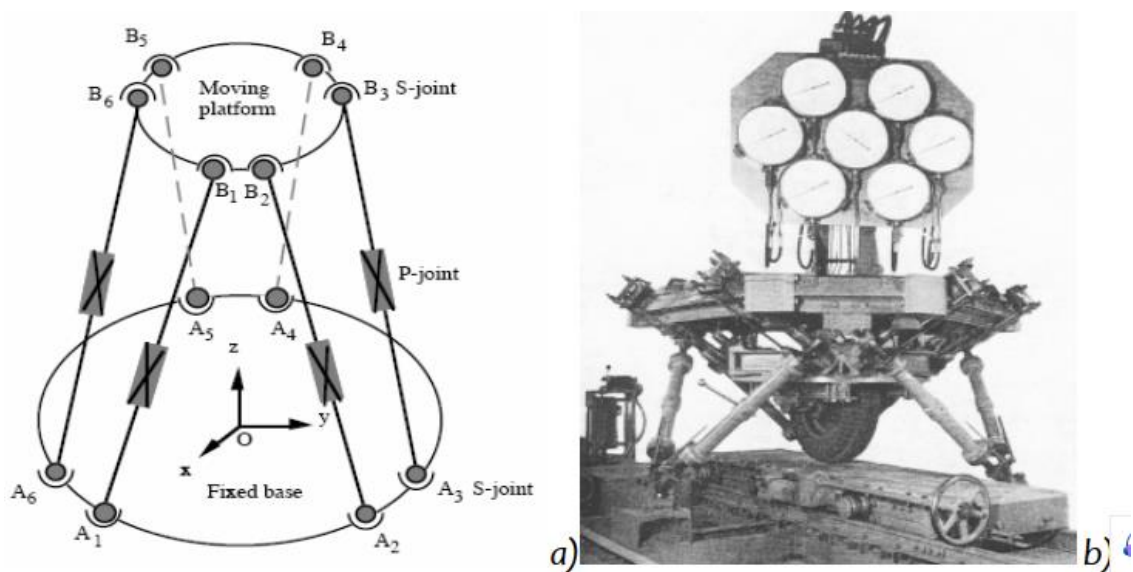


Рис. 1.3. Механізм паралельної структури типу «гексапод» (а)
і платформа Гауфа (б)

В 1980-х роках XX ст. структури з паралельною кінематикою привернули увагу робототехнічної спільноти.

Найуспішнішими роботами з паралельною кінематикою є робот Delta (рис. 1.4), розроблений у 1980-х роках професором Реймондом Клавелем та робот Tricept (рис. 1.5), спроектований і створений Карлом-Еріком Нейманом у 1987 році. Обидві структури мали комерційний успіх і зараз можуть бути знайдені в різних промислових застосуваннях [15, 16].

У 1994 році на Міжнародній технологічній виставці в Чикаго були представлені перші прототипи верстатів з паралельною кінематикою компаній Ingersoll і Giddings & Lewis (рис. 1.1, 1.2).

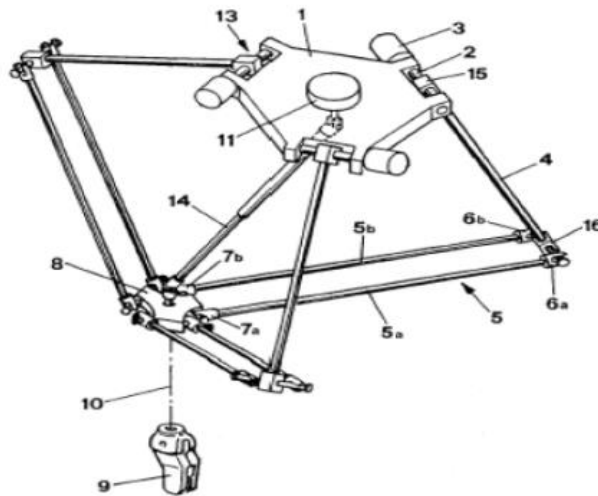


Рис. 1.4. Схема дельта-робота (Патент US 4976582)

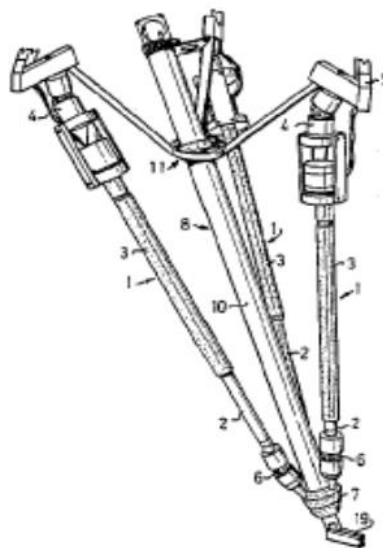


Рис. 1.5. Трикоординатний робот з паралельною кінематикою (Патент US 4732525)

У промисловості оригінальність продукту має набагато менше значення, ніж експлуатаційні характеристики. Створення успішного продукту вимагає командної роботи – партнерство між потенційними клієнтами, промисловістю та науковцями. На жаль, цей факт був проігнорований промисловістю. Такі компанії, як Giddings & Lewis та Ingersoll, що мають багаторічний досвід у

сфері механічної обробки, вирішили діяти поодиночі і зазнали невдачі зі своїми паралельними кінематичними верстатами. Вони просто не змогли виконати обіцянки щодо найвищої точності. Причинами цього стали такі проблеми, як теплове розширення, вібрації та складність системи.

Витоки цієї невдачі лежать у підході компаній, який був орієнтований не на застосування, а на новизну і оригінальність: «Ось ця футуристична шестинога конструкція, що використовується в тренажерах, давайте перетворимо її на верстат».

У наступні роки в науково-дослідних інститутах і промисловості було розроблено багато нових прототипів верстатів для фрезерування та інших процесів, але в основному вони призначалися для вивчення замість того, щоб випускати продукцію на ринок. Крім того, було зареєстровано велику кількість патентів, пов'язаних з паралельною кінематикою.

Сьогодні верстати з паралельною кінематикою повільно, але впевнено виходять на комерційний ринок і вже утвердилися в нішевих застосуваннях [26, 27, 12].

1.3. Переваги і недоліки

Сформулюємо основні переваги та недоліки механізмів паралельної структури і верстатів на їх основі.

Переваги:

- Висока жорсткість завдяки замкненим кінематичним ланцюгам;
- Кінематичні ланки працюють тільки на стискання та розтягування, зусилля згину відсутні;
- Невеликі рухомі маси, мала інерція;
- Високі динамічні показники;
- Можливість модульної конструкції та реконфігурації;
- Невеликі значення похибок позиціонування;
- Багато однакових компонентів.

Недоліки:

- Невеликий і складний робочий простір;
- Неефективне співвідношення розмірів верстата і робочого простору;
- Складне управління переміщеннями;
- Чутливий до теплових деформацій;
- Небезпека зіткнення кінематичних ланок;
- Особливі положення (сингулярності) в робочому просторі складне калібрування.

1.4. Існуючі верстати з паралельною кінематикою

За останні понад 15 років було створено більше 50 різних конструкцій верстатів з паралельною кінематикою. Понад 80% цих верстатів - це обробні центри для 3-осьового або 5-осьового фрезерування.

3-координатні фрезерні верстати з паралельною кінематикою

Наразі виробники верстатів досліджують можливості паралельної кінематики для високошвидкісних 3-координатних обробних центрів у дослідних зразках, а деякі виробники готові розпочати або вже розпочали серійне виробництво.

Наведемо кілька прикладів 3-координатних верстатів з паралельною кінематикою.

В 2000 р. компанія StarragHeckert (раніше – Heckert Werkzeugmaschinen GmbH) запустила нову, новаторську технологію з обробним центром SKM 400, засновану на ідеї заміни лінійних напрямних обертовими шарнірами і запатентувала свій варіант трипода (рис. 1.6).



Рис. 1.7. Обработный центр SKM 400 (StarragHeckert)

Виконавчий орган підтримується додатковим пасивним ланцюгом для забезпечення необхідних ступенів вільності. Робочий шпиндель завжди переміщується в просторі горизонтально завдяки зв'язаній кінематиці. Всі поступальні переміщення вздовж поздовжньої, поперечної і вертикальної осей шпиндель здійснює тільки разом з інструментом. Верстат не має колони, станини, супорта, упорів супорта, напрямних та їх кришок.

Обробний центр SKM 400 характеризується хорошим співвідношенням між робочим простором і необхідною площею, що подібно до звичайних верстатів традиційної компоновки [18]. Серійне виробництво вже розпочато.

GENIUS 500 (з 2004 року випускається серійно) (рис. 1.8) - це гібридна система, в якій рухи по осях X-Y реалізуються за допомогою паралельної кінематики ножиць, тоді як вісь Z розташована в столі. Осі X і Y виконані за кінематичною схемою «ножиці» (рис. 1.9), приводяться в дію лінійними приводами і дозволяють досягати прискорень $15-24 \text{ м/с}^2$ і швидкості подачі $120-180 \text{ м/хв}$ в поєднанні з жорсткістю більше 30 Н/мм .

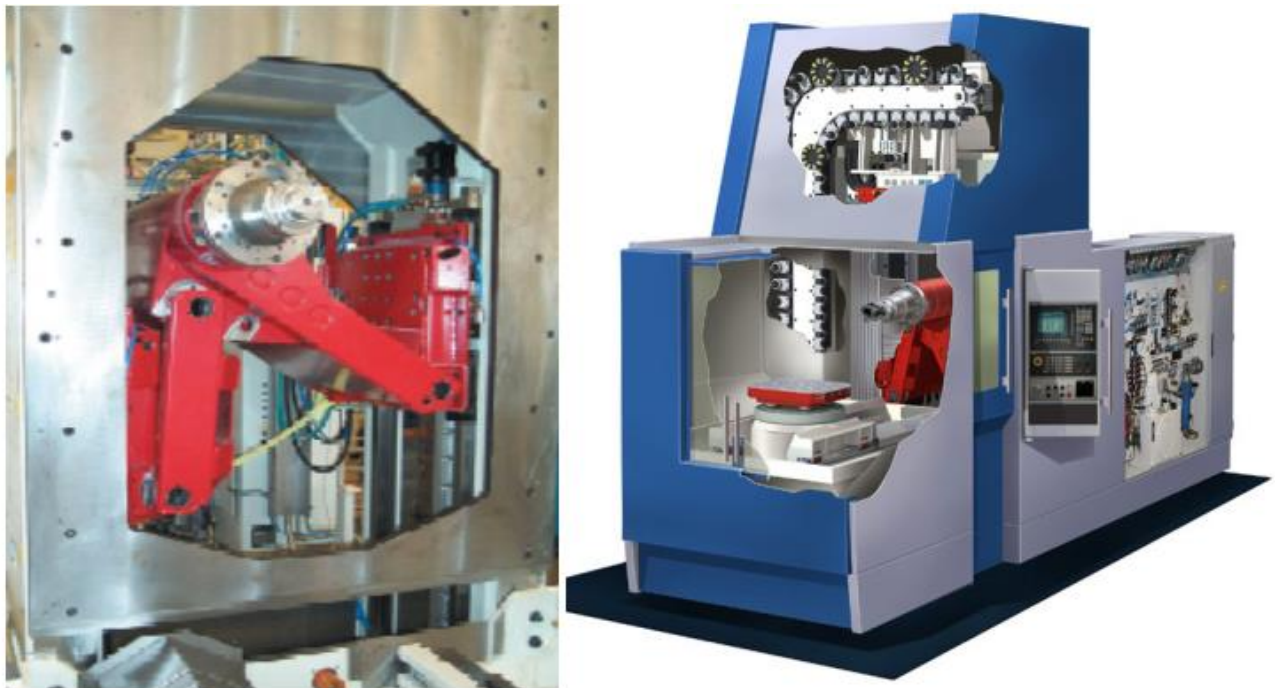


Рис. 1.8. Обробний центр з паралельною кінематикою GENIUS 500

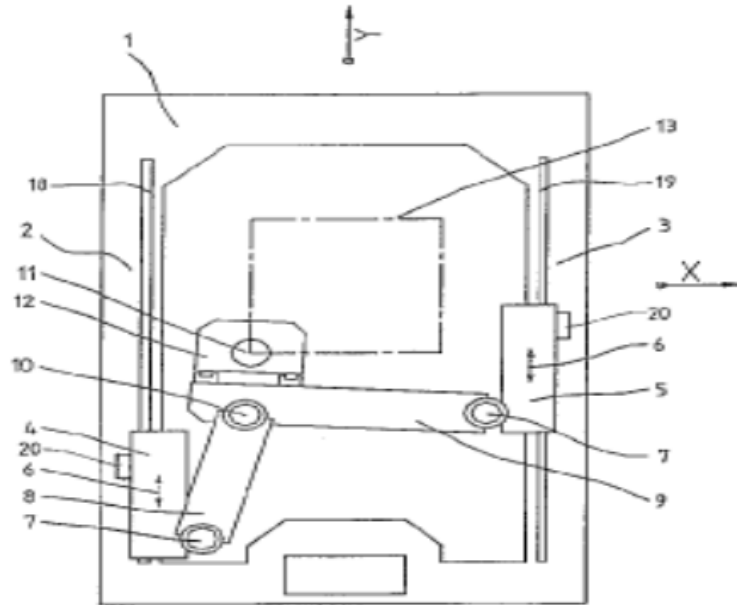


Рис. 1.9. Обробний центр з паралельною кінематикою (Патент US 6328510)

5-координатні фрезерні верстати з паралельною кінематикою

Для 5-осьової обробки було реалізовано багато концепцій верстатів, заснованих на паралельній кінематиці. Якщо в минулому домінували повністю паралельні концепції то останнім часом ми можемо спостерігати тенденцію до гібридних конструкцій. Далі представлено кілька верстатів з паралельною кінематикою, призначених для 5-осьової обробки.



Рис. 1.10. Верстат з паралельною кінематикою COSMO CENTER PM-600

Верстат з паралельною кінематикою COSMO CENTER PM-600 фірми Okuma (рис. 1.10, 1.11) - це верстат з паралельною кінематикою, розроблений для досягнення високоефективного виробництва алюмінієвих деталей, а також штампів і прес-форм, які потребують менше полірування та інтегрують операції з різання складних форм.

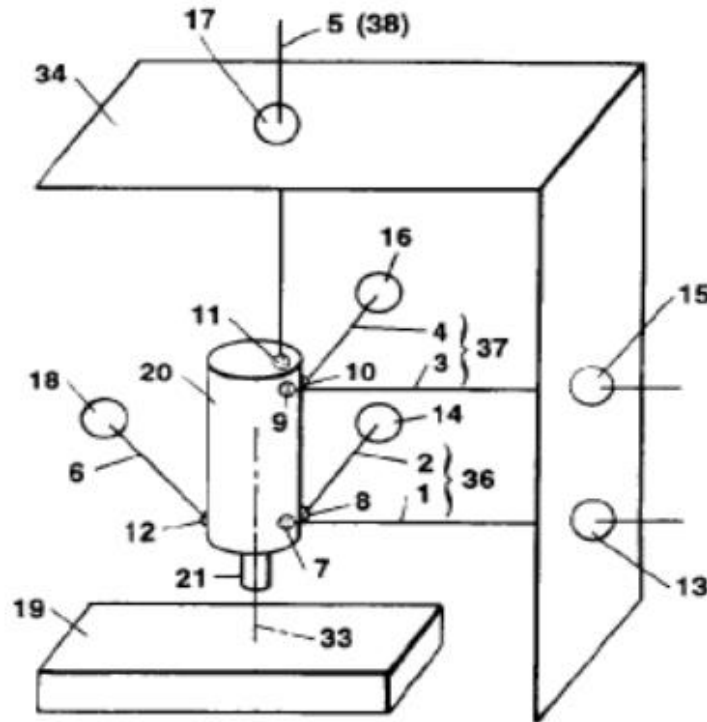


Рис. 1.11. Верстат з паралельною кінематикою (Патент US 6 203 254)

Верстат здатний обробляти зі швидкістю до 100 м/хв з прискоренням 1,5 g. Максимальний кут нахилу шпинделя $\pm 30^\circ$. Рух виконавчого органу здійснюється за допомогою кінематичних ланок (кульково-гвинтових передач з інтегрованим серводвигуном). Універсальні шарніри використовують комбінацію роликів підшипників з попереднім натягом. Інші характеристики: стіл 750×750 мм, робоча зона: 420×420×400 мм (циліндр висотою 400 мм і діаметр 600 мм), частота обертання шпинделя 50-12000/30000 хв⁻¹, робоча площа 2405×2830 мм. Автоматичний пристрій для зміни інструменту вміщує до 20 інструментів.

Насправді це шестикоординатний верстат, заснований на стандартній архітектурі платформи Стюарта, але він використовується для

п'ятикоординотної обробки. Цей верстат також може бути запрограмований на трикоординатне фрезерування, утримуючи головку нерухомою у вертикальній площині.

П'ятикоординатні обробні центри ECOSPEED та ECOLINER від Dörties Scharmann Technologie GmbH - це гібридні конструкції, оснащені інструментальною головкою Sprint Z3. Обробні центри ECOSPEED та ECOLINER призначені для високошвидкісної обробки великих алюмінієвих конструкційних деталей (ECOSPEED, ECOSPEED F та ECOLINER) і для виробництва малих і середніх деталей, орієнтованих на застосування в аерокосмічній промисловості, автомобілебудуванні та виробництві інструментів і штамів (ECOSPEED F HT) (рис. 1.12). Обробні центри реалізовані як гібридні системи з 3-координатною інструментальною головкою Sprint Z3 з паралельною кінематикою (рис. 1.13), яка може рухатися по осі Z і нахилитися в усіх напрямках, і яка переміщується по послідовних осях X і Y як поперечний супорт.

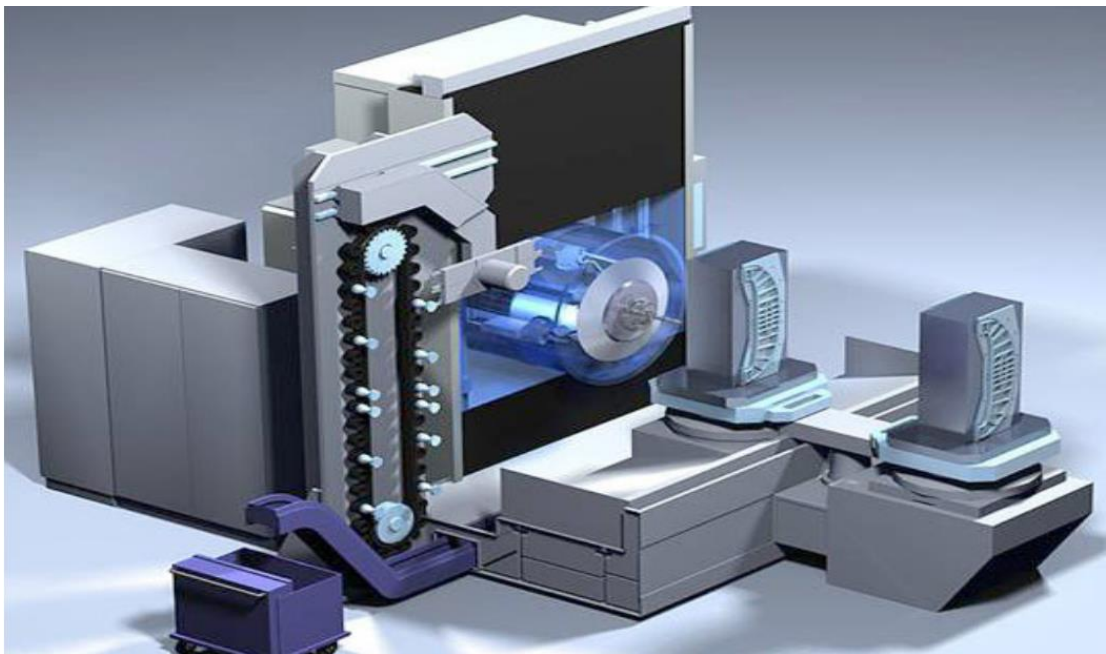


Рис. 1.12. П'ятикоординатний обробний центр ECOSPEED F HT з інструментальною головкою Sprint Z3

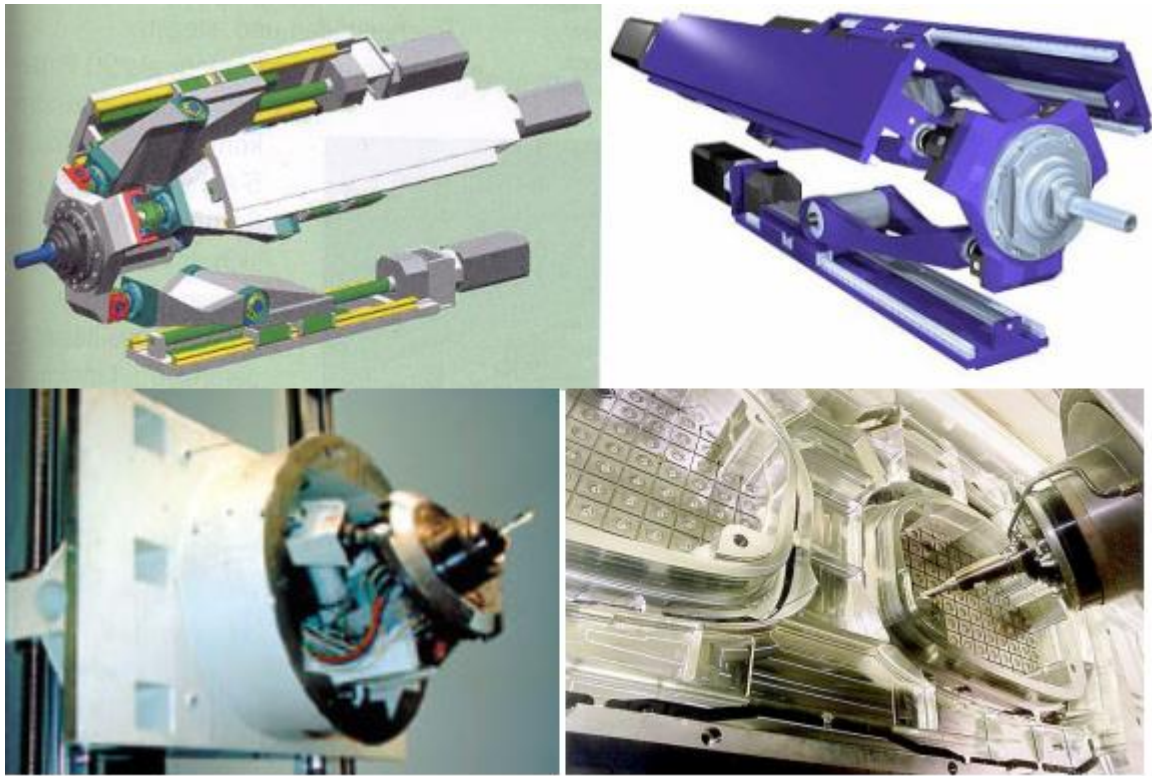


Рис. 1.13. Інструментальна головка Sprint Z3 з паралельною кінематикою

Головка Sprint Z3 виконана по схемі трипода з трьома паралельними лінійними напрямними і кульково-гвинтовими парами, прикріпленими до шпинделя. Пристрій призначений для досягнення практично будь-якої комбінації лінійних і обертальних рухів в робочій зоні головки. Три паралельні горизонтальні опори (рис. 1.13), прикріплені одним кінцем до корпусу шпинделя. Кожна з кінематичних ланок кріпиться до корпусу за допомогою кульового шарніра. Інші кінці кінематичних ланок шарнірно з'єднані з блоком, який переміщується в напрямку плюс і мінус осі 2 по фіксованому набору паралельних лінійних напрямних. Під блоком закріплена кулькова гайка, через яку обертаються кулькова пара. Кожна з трьох кульково-гвинтових пар приводиться в дію власним серводвигуном. При обертанні кожного з них відповідний блок переміщує корпус шпинделя. Коли всі три кульково-гвинтові пари спрацьовують одночасно, корпус шпинделя рухається по осі Z прямолінійно в той чи інший бік. Якщо запрограмувати кінематичні ланки на незалежний рух, тримач зі шпинделем зможе створювати рухи по осях X і Y. Діапазон цих рухів становить плюс-мінус 10 градусів навколо осей.

Тріангуляція з використанням паралельних зв'язків забезпечує шпинделю високі характеристики жорсткості як в динамічному, так і в статичному режимах. Завдяки зменшеній масі конструкції, осьове прискорення і гальмування для головки Z3 становить $1g$. Швидкість швидкісної подачі досягає 50 м/хв. Максимальний хід головки Z3 по осі Z обмежений до 670 мм. Цей обмежений хід забезпечує жорсткість головки для кращої обробки тонкостінних секцій в алюмінієвих аерокосмічних конструкціях.

Нова головка Z3 вміщує моторизований шпиндель з діапазоном швидкостей від 7 500 до 40 000 об/хв. Конструкція головки Z3 дозволяє встановлювати шпинделі потужністю до 30 кВт. Три різні марки шпинделів, що пропонуються для використання, дають користувачам можливість вибору комбінацій швидкості та крутного моменту для різних завдань обробки, інші характеристики головки Z3: прискорення обертання – $685^{\circ}/c^2$, швидкість позиціонування при обертанні – $80^{\circ}/c$.

Більше 20 обробних центрів ECOSPEED вже використовуються в авіабудуванні.

П'ятикоординатний обробний центр DECKEL MAHO Pfronten TriCenter DMT100 має гібридну структуру (трипод з регульованими по довжині стійками плюс двохкоординатна фрезерна головка) (рис. 1.14).

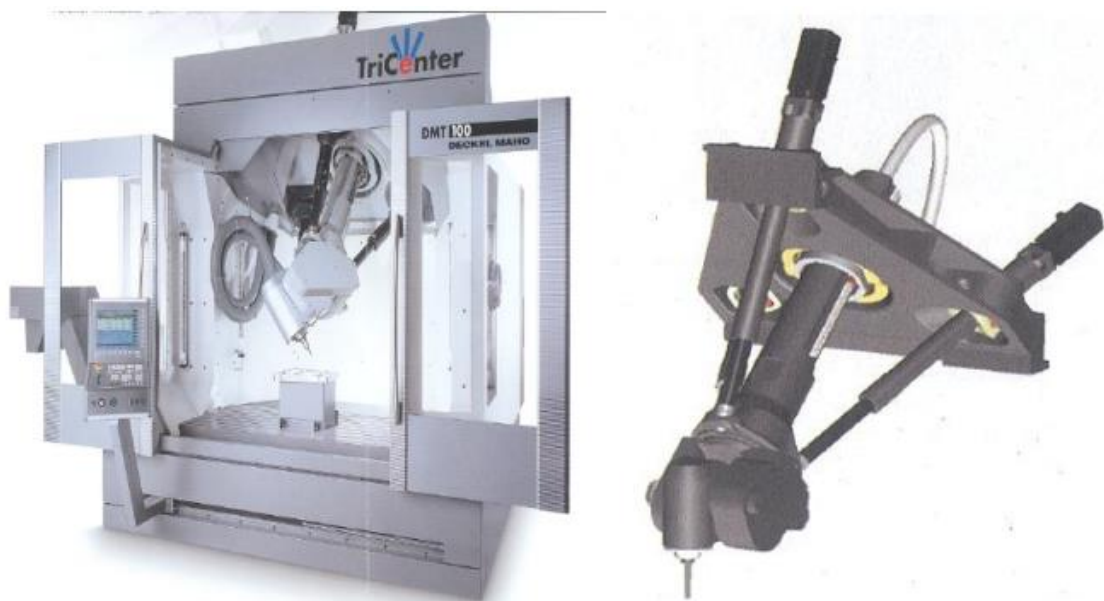


Рис. 1.14. П'ятикоординатний обробний центр
DECKEL MAHO TriCenter DMT100

TriCenter фокусується на спритності інструменту. Заснований на кінематиці трипода, TriCenter повністю перероблений для поліпшення жорсткості і запатентований (рис. 1.15). Передсерійний прототип був показаний на виставці ЕМО 2001.

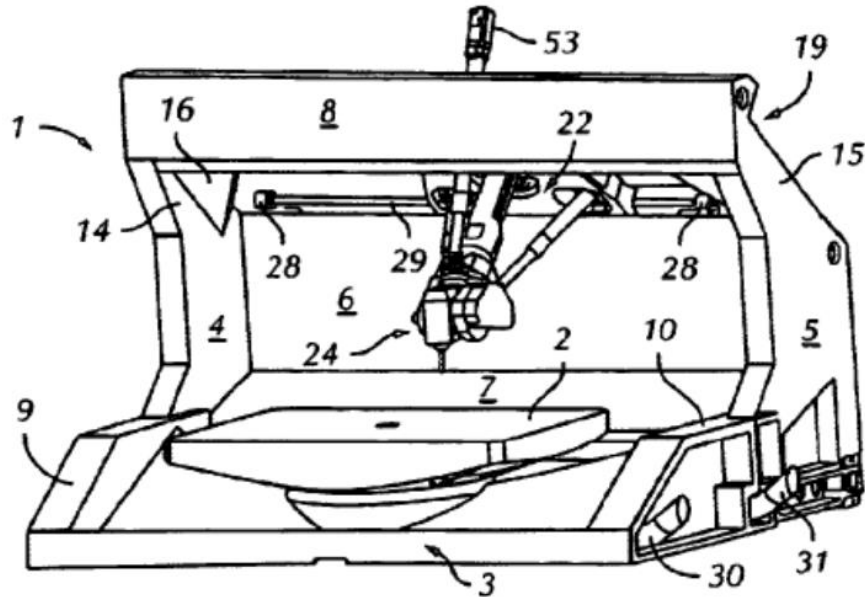


Рис. 1.15. Універсальний фрезерний верстат (Патент US 6682278)

Верстат використовує три приводи для переміщення центральної труби, на якій встановлена спеціально розроблена двокоординатна фрезерна головка для серійного фрезерування. Верстат може працювати в робочому просторі розміром $1500 \times 500 \times 700$ мм зі швидкістю переміщення до 100 м/хв і прискоренням 2g. Завдяки великому діапазону кутового положення інструменту, конструкція дозволяє обробляти всі типи складних заготовок за одне переналагодження. Привід складається з кульково-гвинтових передач. Система управління Siemens 840 D. Цільове застосування - авіаційна промисловість, і цей верстат забезпечує високу продуктивність обробки алюмінієвих сплавів і сталі.

Гібридний п'ятикоординатний верстат з паралельною кінематикою TRICEPT існує в трьох варіантах (рис. 1.16).

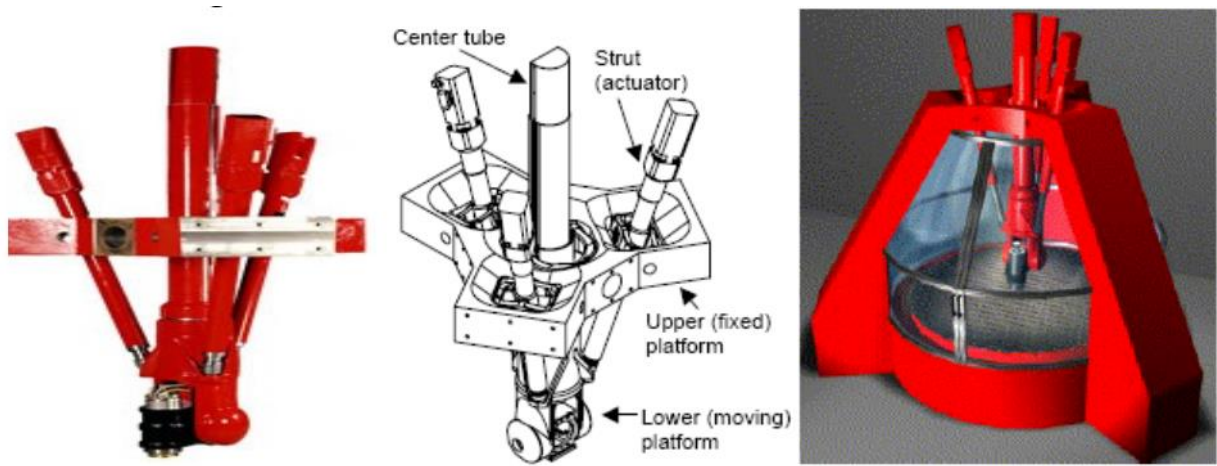


Рис. 1.16. П'ятикоординатний верстат з паралельною кінематикою Tricert

Найбільша модель Tricert 845 оснащена унікальною запатентованою **системою прямого вимірювання** (Direct Measuring System - DMS). Ця система базується на поєднанні стандартної системи позиціонування верстатів з паралельною кінематикою і традиційної декартової системи позиціонування, встановленої на центральній трубі та підвісці. Ці дві системи порівнюють значення позиціонування X-Y-Z під час роботи в режимі реального часу. Система DMS збільшує жорсткість і точність, а також компенсує вплив сил різання і перепадів температури.

Система вимірювання зап'ястя (Wrist Measuring System - WMS) контролює фактичне положення осей обертання за допомогою зовнішніх датчиків, встановлених безпосередньо на рухомих частинах осей.

Конструкція стійки верстата, заснована на **системі модульних елементів** (Modular Element System - MES), забезпечує гнучкість у налаштуванні верстата під різними кутами (0° , 45° , 90°) і реконфігурацію на місці.

Модульна система налаштування (Modular Setup System - MSS) пропонує прості то економічні засоби зміни налаштування, коли клієнт бажає змінити технологічний процес (або застосування) верстата. У виробника доступна серія змінних модулів.

Області застосування варіюються від легкої до важкої п'ятикоординатної обробки алюмінієвих і пластмасових деталей, виготовлення моделей, обробки інструментів і штампів тощо.

Нижче наведені деякі технічні характеристики Tricert TMC 845: об'ємна точність ± 50 мкм; повторюваність ± 10 мкм; максимальна швидкість подачі 90 м/хв; максимальне прискорення 2g; система прямого вимірювання (DMS): енкодери високої роздільної здатності; система керування: Siemens SINUMERIK 840D; шпиндель 30/45 кВт, 24000 - 30000 об/хв; пристрій для зміни інструменту: стелажний тип, 13 інструментів; площа верстата $3,7 \times 3,6$ м; площа підлоги (включаючи шафу управління та конвеєр стружки) $7,1 \times 5,8$ м; загальна вага верстата 30 т.

Продано понад 200 машин, в основному автомобільним та аерокосмічним компаніям, таким як BMW, Peugeot, Citroën, Boeing, Airbus, Volvo, Scania, SAAB Aerospace, Renault, Volkswagen.

Останнім часом верстати з паралельною кінематикою починають використовуватись не лише для фрезерування, але й для токарної, клепальної та формоутворювальної обробки, а також для обробки деревини.

Вертикальний токарний верстат INDEX V100. З метою скорочення непродуктивного часу при багатосерійному виробництві компанія INDEX-Werke розробила вертикальний токарний верстат V100 (рис. 1.17) на основі лінійної дельта-кінематики. Шпиндельний блок здатний здійснювати 3-осьові рухли, що забезпечує рух подачі для обробки та переміщення деталей. Верстат в основному призначений для токарної обробки, а також фрезерування, шліфування, лазерного загартування, лазерного зварювання, складання, операцію можна виконувати за допомогою додаткових приводних інструментів.



Рис. 1.17. Вертикальний токарний верстат з паралельною кінематикою V100

Нижче наведені деякі технічні характеристики токарного верстата INDEX-Werke V100: робоча зона: 250×256×150 мм; максимальна швидкість переміщення: 50 м/хв; максимальне прискорення: 1 g; робочий шпиндель: максимальна частота обертання 10000 об/хв; потужність при 100% 10,5 кВт; крутний момент при 100% 50 Нм; розмір патрона макс. 150 мм; розміри 2106×2106×2300 мм.

1.5. Перспективи розвитку верстатів з паралельною кінематикою

Якщо розглянути успішні практичні застосування верстатів з паралельною кінематикою у серійному виробництві за останні 25 років досліджень і розробок, ми прийдемо до невтішного результату [21].

Насправді можна навести 3 успішних приклади:

- Трісерт для видалення задирок, фрезерування та свердління (не дуже точного) простих автомобільних деталей;
- обробні центри ECOSPEED для фрезерування то свердління легованих інтегральних аерокосмічних деталей;

- INDEX V100 для токарної обробки та додаткових операцій точіння деталей.

Проаналізувавши переваги кожної концепції, можна виділити 3 загальні причини успіху:

- правильна концепція дизайну, адаптована до конкретного застосування;
- використання специфічних переваг паралельної кінематики;
- уникнення недоліків, використовуючи, відповідно, свої сильні сторони з правилом «настільки добре, наскільки це необхідно».

Ось приклади:

- Високошвидкісне/низькоточне видалення задирок, фрезерування та свердління – достатньо верстата Tricert;
- Вирішення поточної проблеми 5-координатної високошвидкісної обробки, обмеженої динаміки поворотної осі інструменту та необхідних компенсаційних лінійних рухів – інструментальна головка з паралельною кінематикою Z3 Sprint вбудована в обробний центр ECOSPEED;
- вертикальний токарний верстат на основі лінійного принципу Дельта з обмеженою робочою зоною для високоточного точіння і розширеною робочою зоною для інших застосувань, що не вимагають високої жорсткості (вимірювання, завантаження і розвантаження) – INDEX V100 є оптимальним рішенням.

Спільними проблемами для вищезгаданих концепцій верстатів є: обмежена універсальність, орієнтованість на конкретні технологічні застосування (технологія і заготовка) і, як наслідок, висока продуктивність обробки.

Для більш успішного впровадження верстатів з паралельною кінематикою на практиці в майбутньому слід зосередитися на двох основних цілях:

- характеристики верстатів з паралельною кінематикою повинні бути співставні з верстатами з традиційною послідовною кінематикою;
- верстати з паралельною кінематикою не повинні ускладнювати життя оператора більше, ніж верстати традиційної послідовної компоновки.

Верстати з паралельною кінематикою після більш ніж 20 років інтенсивних досліджень і розробок повільно, але впевнено виходять на комерційний ринок в різних галузях промисловості, забезпечуючи переваги для клієнтів.

Ті верстати, які користуються успіхом на ринку, були розроблені для вирішення певної проблеми (вузького місця) в застосуванні серійних верстатів і дозволяють найбільш ефективно використовувати концептуальні переваги паралельною кінематики, і в той же час уникати концептуальних недоліків за рахунок концептуального підходу або передових технологічних рішень.

Якщо порівняти близько 20 років досліджень верстатів з паралельною кінематикою і понад 200 років досвіду і досліджень традиційних верстатів для досягнення їх сучасного рівня, легко зробити висновок, що для вирішення проблем паралельної кінематики знадобиться час.

Для отримання більш широкого практичного застосування верстатів з паралельною кінематикою необхідні подальші інтенсивні дослідження і розробки.

Можна визначити кілька відкритих проблем і потреб:

- В області проектування і прогнозування продуктивності верстатів з паралельною кінематикою дуже важливим є створення ефективних інструментів для оптимального топологічного і розмірного синтезу і загального проектування механізмів паралельної структури для спеціального застосування з метою найбільш ефективного використання концептуальних переваг цих механізмів.
- Верстати з паралельною кінематикою складаються з таких компонентів, як шарніри та штанги, які мають ключове значення для

загальних експлуатаційних характеристик верстата. Необхідне подальше вдосконалення та доопрацювання компонентів. Наприклад, створення з'єднань з високою жорсткістю, високим демпфуванням і широкими кутами повороту; розробка компонентів, пристосованих до спеціальної кінематичної структури; полегшена конструкція вузлів, що піддаються впливу крутного моменту, тощо.

- Точність і контролер. Аналіз показав, що більше 70% помилок на виготовлених деталях спричинені контролером, CAD/CAM система відповідає за приблизно 20% помилок, а паралельний механізм (якщо він оптимально спроектований) - менше 10% [13]. Таким чином, дослідження повинні бути зосереджені в основному на контролері. Апаратне забезпечення контролера повинно підтримувати: можливість застосування відповідних законів керування, здатних впоратися з нелінійностями, притаманними верстатам з паралельною кінематикою; паралельні обчислення (що значно скоротить час дискретизації); створення автоматизованих алгоритмів калібрування для забезпечення високої точності позиціонування; створення інтерфейсів для моделей компенсації (пружні та теплові деформації в контролері; активна компенсація сил збурення тощо).

- Питання технічного обслуговування, такі як калібрування верстата та оцінка геометричної точності, повинні бути розроблені та орієнтовані на застосування на рівні цеху. Це дозволить користувачам верстатів вирішувати ці питання відповідно до їхнього попереднього досвіду роботи з класичними верстатами.

РОЗДІЛ 2

КІНЕМАТИЧНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ВЕРСТАТА З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ

Проектування механізмів (в тому числі з паралельною кінематикою) починають з проведення кінематичного аналізу, який дає можливість у подальшому перейти до дослідження динаміки та синтезу систем управління обладнанням. Виконання кінематичного аналізу передбачає розв'язання прямої та зворотної задач кінематики.

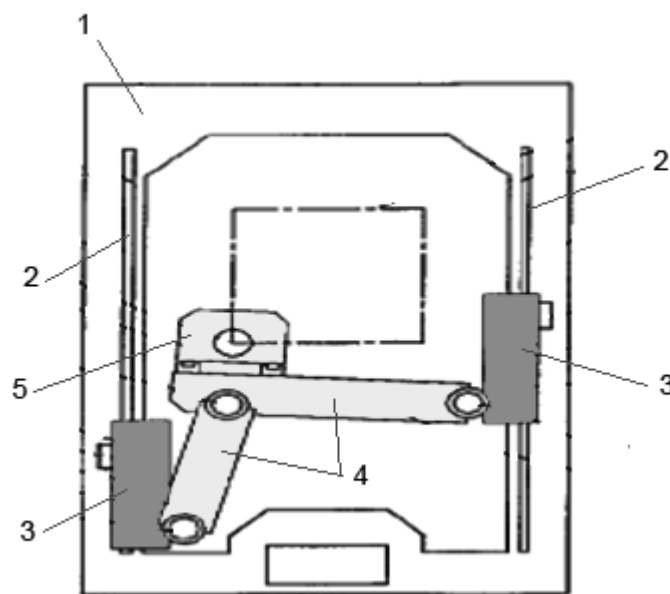


Рис. 2.1. Верстат з паралельною кінематикою типу ножиці: 1 – станина; 2 – напрямні; 3 – повзуни; 4 – кінематичні ланки; 5 – виконавчий орган

Результатом вирішення **прямої задачі** для верстата з паралельною кінематикою типу «ножиці» (рис. 2.1) є визначення абсолютних координат виконавчого органу 5 по заданим узагальненим координатам (тобто положенню повзунів 3 на напрямних 4). Розв'язок прямої задачі завжди однозначний і його можна знайти для будь-якої кількості ланок, що утворюють механізм.

Зворотна задача кінематики полягає у визначенні значень узагальнених координат за заданим положенням виконавчого органу.

2.1. Вирішення прямої задачі кінематики

Пряма задача кінематики для заданого механізму (рис. 2.2) заключається у визначенні координат т. $M(x_M, y_M)$ виконавчого органу залежно від заданого положення повзунів на напрямних (тобто, від заданих координат точок $E(x_E, y_E)$ та $L(x_L, y_L)$). Довжини кінематичних ланок $EF(l_3)$, $ML(l_4)$ та $FL(l_5)$ – наперед задані і незмінні.

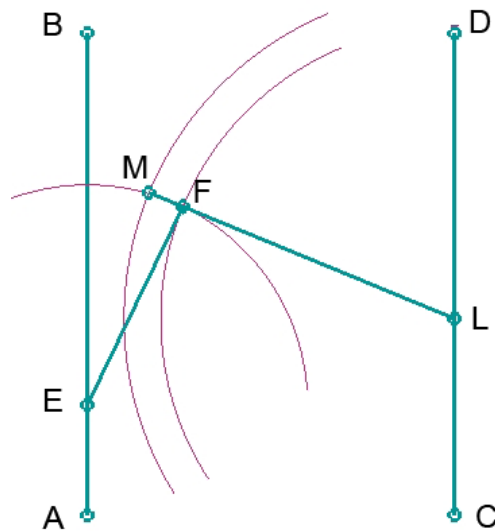


Рис. 2.2. Розрахункова схема механізму

Ланки AB і CD - вертикальні напрямні, вздовж яких рухаються шарніри кінематичних ланок (т. E і L). Кінематичні ланки EF і ML з'єднані між собою в т. F .

Відрізок ML розглянемо як радіус кола з центром в т. L . Рівняння цього кола буде мати вигляд:

$$(x_M - x_L)^2 + (y_M - y_L)^2 = l_4^2 \quad (2.1)$$

Аналогічне рівняння можемо записати для відрізка EF :

$$(x_F - x_E)^2 + (y_F - y_E)^2 = l_3^2 \quad (2.2)$$

Оскільки т. F належить також відрізку ML , можемо записати

$$\frac{x_F - x_L}{x_M - x_L} = \frac{y_F - y_L}{y_M - y_L} \quad (2.3)$$

Також, враховуючи, що т. F знаходиться від т. L на відстані l_5 , запишемо рівняння:

$$(x_F - x_L)^2 + (y_F - y_L)^2 = l_5^2 \quad (2.4)$$

Таким чином, для визначення координат т. M необхідно вирішити систему рівнянь

$$\begin{cases} (x_M - x_L)^2 + (y_M - y_L)^2 = l_4^2 \\ (x_F - x_E)^2 + (y_F - y_E)^2 = l_3^2 \\ \frac{x_F - x_L}{x_M - x_L} = \frac{y_F - y_L}{y_M - y_L} \\ (x_F - x_L)^2 + (y_F - y_L)^2 = l_5^2 \end{cases}$$

Спочатку визначимо координати т. F . Для цього від рівняння (2.4) віднімемо рівняння (2.2):

$$(x_F - x_L)^2 - (x_F - x_E)^2 + (y_F - y_L)^2 - (y_F - y_E)^2 = l_5^2 - l_3^2$$

$$\begin{aligned} x_F^2 - 2x_Fx_L + x_L^2 - x_F^2 + 2x_Fx_E - x_E^2 + \\ + y_F^2 - 2y_Fy_L + y_L^2 - y_F^2 + 2y_Fy_E - y_E^2 = l_5^2 - l_3^2 \end{aligned}$$

$$-2x_Fx_L + x_L^2 + 2x_Fx_E - x_E^2 - 2y_Fy_L + y_L^2 + 2y_Fy_E - y_E^2 = l_5^2 - l_3^2$$

$$x_F(2x_E - 2x_L) = l_5^2 - l_3^2 - x_L^2 + x_E^2 + 2y_Fy_L - y_L^2 - 2y_Fy_E + y_E^2$$

$$x_F = \frac{l_5^2 - l_3^2 - x_L^2 + x_E^2 + 2y_Fy_L - y_L^2 - 2y_Fy_E + y_E^2}{2(x_E - x_L)}$$

$$x_F = y_F \frac{y_L - y_E}{x_E - x_L} + \frac{l_5^2 - l_3^2 - x_L^2 + x_E^2 - y_L^2 + y_E^2}{2(x_E - x_L)}$$

Таким чином,

$$x_F = y_F n + m$$

де:

$$n = \frac{y_L - y_E}{x_E - x_L}$$

$$m = \frac{l_5^2 - l_3^2 - x_L^2 + x_E^2 - y_L^2 + y_E^2}{2(x_E - x_L)}$$

Підставимо x_F в рівняння (2.4)

$$(y_F n + m - x_L)^2 + (y_F - y_L)^2 = l_5^2$$

$$y_F^2 n^2 + 2y_F n(m - x_L) + (m - x_L)^2 + y_F^2 - 2y_F y_L + y_L^2 = l_5^2$$

$$(n^2 + 1)y_F^2 + 2y_F(n(m - x_L) - y_L) + (m - x_L)^2 + y_L^2 - l_5^2 = 0$$

Отримуємо, таким чином, квадратне рівняння вигляду

$$ay_F^2 + by_F + c = 0,$$

де:

$$a = (n^2 + 1)$$

$$b = 2(n(m - x_L) - y_L)$$

$$c = (m - x_L)^2 + y_L^2 - l_5^2$$

Отже,

$$y_{F1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

По розрахунковій схемі видно, що координата у т. F не може бути від'ємною, тому

$$y_F = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Отже, оскільки значення x_F та y_F вже відомі, можемо рухатись далі. З рівняння (2.3) визначаємо x_M :

$$x_M = \frac{(x_F - x_L)(y_M - y_L)}{y_F - y_L} + x_L$$

Підставимо в рівняння (2.1)

$$\left(\frac{(x_F - x_L)(y_M - y_L)}{y_F - y_L} + x_L - x_L \right)^2 + (y_M - y_L)^2 = l_4^2$$

$$\frac{(x_F - x_L)^2 (y_M - y_L)^2}{(y_F - y_L)^2} + (y_M - y_L)^2 = l_4^2$$

$$(y_M - y_L)^2 \frac{(x_F - x_L)^2}{(y_F - y_L)^2} + (y_M - y_L)^2 = l_4^2$$

$$(y_M - y_L)^2 \left(\frac{(x_F - x_L)^2}{(y_F - y_L)^2} + 1 \right) = l_4^2$$

$$(y_M - y_L)^2 \left(\frac{(x_F - x_L)^2 + (y_F - y_L)^2}{(y_F - y_L)^2} \right) = l_4^2$$

З рівняння (2.4)

$$(x_F - x_L)^2 + (y_F - y_L)^2 = l_5^2$$

тому,

$$(y_M - y_L)^2 \frac{l_5^2}{(y_F - y_L)^2} = l_4^2$$

$$(y_M - y_L)^2 = \frac{l_4^2}{l_5^2} (y_F - y_L)^2$$

$$y_M = \frac{l_4}{l_5} (y_F - y_L) + y_L$$

Таким чином, вирішенням прямої задачі кінематики в загальному вигляді для заданого механізму паралельної структури будуть рівняння:

$$x_M = \frac{(x_F - x_L)(y_M - y_L)}{y_F - y_L} + x_L$$

$$y_M = \frac{l_4}{l_5} (y_F - y_L) + y_L$$

де:

$$x_F = y_F n + m$$

$$y_F = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

де:

$$n = \frac{y_L - y_E}{x_E - x_L}$$

$$m = \frac{l_5^2 - l_3^2 - x_L^2 + x_E^2 - y_L^2 + y_E^2}{2(x_E - x_L)}$$

$$a = (n^2 + 1)$$

$$b = 2(n(m - x_L) - y_L)$$

$$c = (m - x_L)^2 + y_L^2 - l_5^2$$

2.3. Вирішення зворотної задачі кінематики

Зворотна задача кінематики для заданого механізму (рис. 2.2) заключається у визначенні положення повзунів на напрямних (тобто, координат точок $E (x_E, y_E)$ та $L (x_L, y_L)$) залежно від заданого положення т. $M (x_M, y_M)$ виконавчого органу. Довжини кінематичних ланок $EF (l_3)$, $ML (l_4)$ та $FL (l_5)$ – наперед задані і незмінні.

Відрізок ML розглянемо як радіус кола з центром в т. L . Тоді можемо записати рівняння кола:

$$(x_M - x_L)^2 + (y_M - y_L)^2 = l_4^2 \quad (2.5)$$

Оскільки т. L знаходиться на вертикальній прямій CD , її координата x_L відома:

$$x_L = x_c = x_D$$

Таким чином, маємо тільки одну невідому, яку визначимо з рівняння (2.5). Розкриємо дужки і виконаємо перетворення:

$$y_M^2 - 2y_M y_L + y_L^2 + (x_M - x_L)^2 - l_4^2 = 0$$

Згрупувавши окремо відомі і невідомі складники, отримаємо квадратне рівняння:

$$y_L^2 - by_L + c = 0,$$

де:

$$b = 2y_M,$$

$$c = y_M^2 + (x_M - x_L)^2 - l_4^2$$

Вирішуємо отримане рівняння

$$y_{L_1} = \frac{b + \sqrt{b^2 - 4c}}{2}$$

$$y_{L_2} = \frac{b - \sqrt{b^2 - 4c}}{2}$$

Отримані значення y_L симетричні відносно т. M (рис. 2.3). Але аналіз схеми (рис. 2.2) показує, що конструкція механізму не допускає ситуації, коли шарнір L знаходиться вище точки M інструменту.

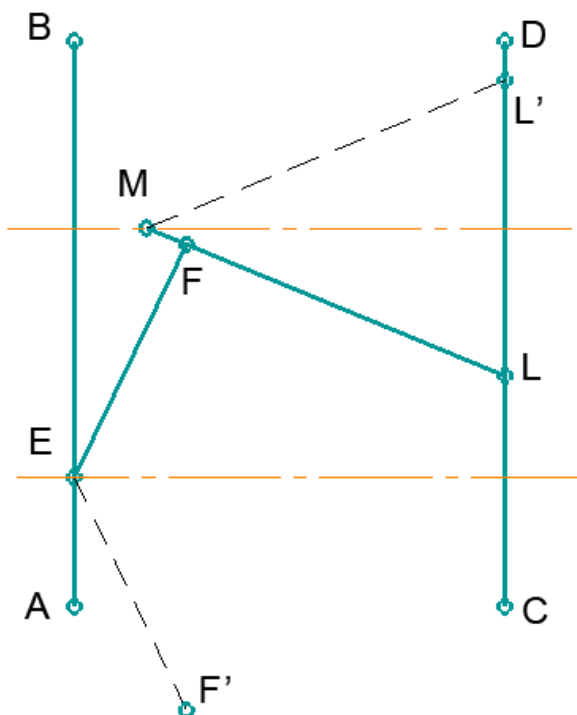


Рис. 2.3. Можливі симетричні положення точок F (F') та L (L')

Тому з двох значень координат y_L вибираємо найменше. Таким чином,

$$\begin{aligned}
 y_L &= \frac{b - \sqrt{b^2 - 4c}}{2} = \frac{2y_M - \sqrt{4y_M^2 - 4(y_M^2 + (x_M - x_L)^2 - l_4^2)}}{2} = \\
 &= \frac{2y_M - \sqrt{4y_M^2 - 4y_M^2 + 4((x_M - x_L)^2 - l_4^2)}}{2} = \\
 &= \frac{2y_M - \sqrt{4((x_M - x_L)^2 - l_4^2)}}{2} = \frac{2y_M - 2\sqrt{(x_M - x_L)^2 - l_4^2}}{2} = \\
 &= y_M - \sqrt{(x_M - x_L)^2 - l_4^2}
 \end{aligned}$$

Отже,

$$y_L = y_M - \sqrt{(x_M - x_L)^2 - l_4^2}$$

Для визначення координат т. E , спочатку необхідно визначити координати т. F .

Оскільки т. F знаходиться на прямій, що проходить через точки M та L , можемо записати:

$$\frac{x_F - x_L}{x_M - x_L} = \frac{y_F - y_L}{y_M - y_L} \quad (2.6)$$

Враховуючи, що т. F знаходиться на відстані l_5 від т. L , можемо записати:

$$(x_F - x_L)^2 + (y_F - y_L)^2 = l_5^2 \quad (2.7)$$

Таким чином, для визначення координат т. F , необхідно вирішити систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{x_F - x_L}{x_M - x_L} = \frac{y_F - y_L}{y_M - y_L} \\ (x_F - x_L)^2 + (y_F - y_L)^2 = l_5^2 \end{cases}$$

Перетворимо рівняння (2.6):

$$x_F - x_L = \frac{(y_F - y_L)(x_M - x_L)}{y_M - y_L} \quad (2.8)$$

Результат підставимо в рівняння (2.7) і виконаємо перетворення:

$$\left(\frac{(y_F - y_L)(x_M - x_L)}{y_M - y_L} \right)^2 + (y_F - y_L)^2 = l_5^2$$

$$(y_F - y_L)^2 \cdot \frac{(x_M - x_L)^2}{(y_M - y_L)^2} + (y_F - y_L)^2 = l_5^2$$

$$(y_F - y_L)^2 \cdot \frac{(x_M - x_L)^2 + (y_M - y_L)^2}{(y_M - y_L)^2} = l_5^2$$

Використавши рівняння (2.5), отримаємо:

$$(y_F - y_L)^2 \cdot \frac{l_4^2}{(y_M - y_L)^2} = l_5^2$$

$$y_F - y_L = \frac{l_5}{l_4} (y_M - y_L)$$

Таким чином,

$$y_F = \frac{l_5}{l_4} (y_M - y_L) + y_L$$

Підставимо значення y_F в (2.8) і знайдемо x_F

$$\begin{aligned} x_F - x_L &= \frac{\left(\frac{l_5}{l_4} (y_M - y_L) + y_L - y_L \right) (x_M - x_L)}{y_M - y_L} = \\ &= \frac{\frac{l_5}{l_4} (y_M - y_L) (x_M - x_L)}{y_M - y_L} = \frac{l_5}{l_4} (x_M - x_L) \end{aligned}$$

Таким чином,

$$x_F = \frac{l_5}{l_4}(x_M - x_L) + x_L$$

Відрізок EF будемо розглядати як радіус кола з центром в т. E . Рівняння цього кола буде мати вид:

$$(x_F - x_E)^2 + (y_F - y_E)^2 = l_3^2 \quad (2.9)$$

Оскільки т. E знаходиться на вертикальній прямій AB , її координата x_E відома:

$$x_E = x_A = x_B$$

Таким чином, маємо тільки одну невідому, яку визначимо з рівняння (2.9). Розкриємо дужки і виконаємо перетворення:

$$y_F^2 - 2y_F y_E + y_E^2 + (x_F - x_E)^2 - l_3^2 = 0$$

Згрупувавши окремо відомі і невідомі складники, отримаємо квадратне рівняння:

$$y_E^2 - m y_E + n = 0,$$

де:

$$m = 2y_F,$$

$$n = y_F^2 + (x_F - x_E)^2 - l_3^2$$

Рішення отриманого рівняння буде мати вигляд:

$$y_E = \frac{m \pm \sqrt{m^2 - 4n}}{2}$$

Як вже вказувалось вище, точки E та L не можуть бути вищими за т. M , тому треба взяти найменші їх значення, тобто

$$y_E = \frac{m - \sqrt{m^2 - 4n}}{2}$$

$$\begin{aligned} y_E &= \frac{m - \sqrt{m^2 - 4n}}{2} = \frac{2y_F - \sqrt{4y_F^2 - 4(y_F^2 + (x_F - x_E)^2 - l_3^2)}}{2} = \\ &= \frac{2y_F - \sqrt{4y_F^2 - 4y_F^2 + 4((x_F - x_E)^2 - l_3^2)}}{2} = \\ &= \frac{2y_F - \sqrt{4((x_F - x_E)^2 - l_3^2)}}{2} = \frac{2y_F - 2\sqrt{(x_F - x_E)^2 - l_3^2}}{2} = \\ &= y_F - \sqrt{(x_F - x_E)^2 - l_3^2} \end{aligned}$$

Отже, рішенням зворотної задачі кінематики заданого механізму паралельної структури будуть наступні рівняння:

$$y_L = y_M - \sqrt{(x_M - x_L)^2 - l_4^2}$$

$$y_E = y_F - \sqrt{(x_F - x_E)^2 - l_3^2}$$

де:

$$y_F = \frac{l_5}{l_4} (y_M - y_L) + y_L$$

$$x_F = \frac{l_5}{l_4} (x_M - x_L) + x_L$$

РОЗДІЛ 3

УЗГОДЖЕНІСТЬ РУХІВ КІНЕМАТИЧНИХ ЛАНОК ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ ТИПОВИХ РУХІВ ВИКОНАВЧОГО ОРГАНУ

Переміщення робочого органу верстата з паралельною кінематикою (рис. 2.1) здійснюється при переміщенні повзунів 3 вздовж напрямних 2. Очевидно, що на величину переміщень впливають: довжина (висота) напрямних 2, довжини кінематичних ланок 4, положення точки F з'єднання кінематичних ланок (рис. 3.1).

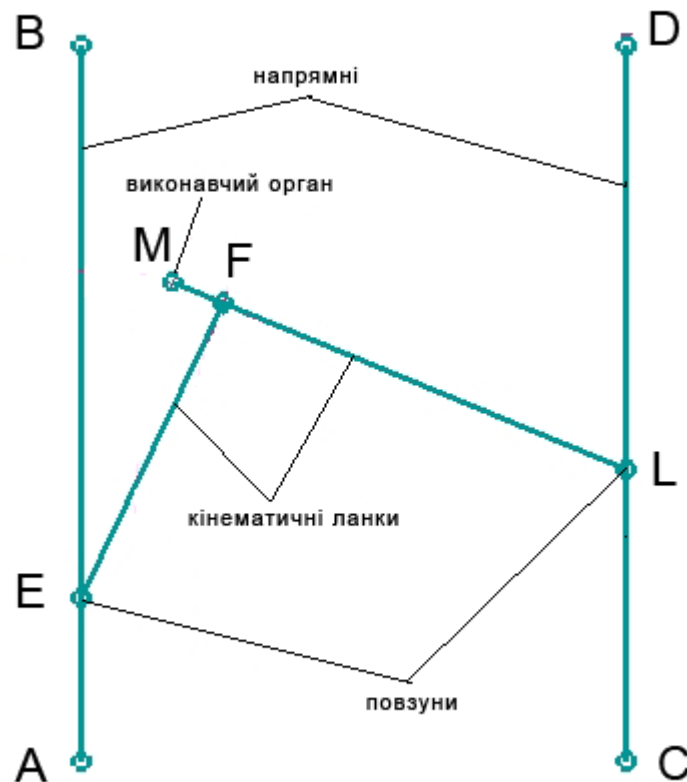


Рис. 3.1. Розрахункова схема верстата

Дослідження впливу вказаних параметрів будемо виконувати із застосування рівнянь, отриманих в результаті вирішення зворотної задачі кінематики.

Визначимо вихідні данні.

Напрямна АВ співпадає з віссю Y системи координат. Напрямна CD паралельна напрямній АВ і зміщена вздовж осі X на 50 см (оскільки проводимо дослідження не конкретних розмірів, а їх відносних співвідношень, то можна використовувати будь-які одиниці довжини – міліметри, сантиметри, метри тощо).

Висота напрямних в даному випадку не задається, оскільки очевидно, що є пряма залежність між висотою напрямних і висотою робочого простору (максимального вертикального переміщення робочого органу).

Мінімальні довжини кінематичних ланок повинні бути такими, щоб їх сума була більша за відстань між напрямними, тобто повинна виконуватись умова:

$$EF + FL > AC \quad (3.1)$$

Якщо ця умова не виконується ($EF + FL < AC$), то такий механізм взагалі не може існувати, а при $EF + FL = AC$ механізм буде знаходитись в так званому «особливому» положенні, при якому подальший рух виконавчого органу неможливий без втручання додаткової зовнішньої сили, що виведе механізм з цього «особливого» положення.

З урахуванням умови (3.1) приймаємо параметри кінематичних ланок і точки їх перетину:

$$EF = 30 \text{ см}$$

$$ML = 45 \text{ см}$$

$$FL = 40 \text{ см}$$

Рухаючи виконавчий орган *M* вздовж осі X в межах 5-45 см, можна побачити, що найнижча точка, в яку можна перемістити робочий орган буде мати координати (14; 27) (рис. 3.2).

З графіка (рис. 3.2) видно, що при переміщенні т. *M* вздовж осі X в діапазоні 5-14 см т. *E* знаходиться нижче початку напрямної (т. *A*), що не дозволяється конструкцією верстата. В діапазоні 14-27 см вже інший повзун

(т. L) знаходиться нижче початку напрямної (т. В). Таким чином, найнижче положення т. М буде мати координати (14; 27). При цьому повзуни знаходяться на початку напрямних (тобто, $Y_E=Y_L=0$).

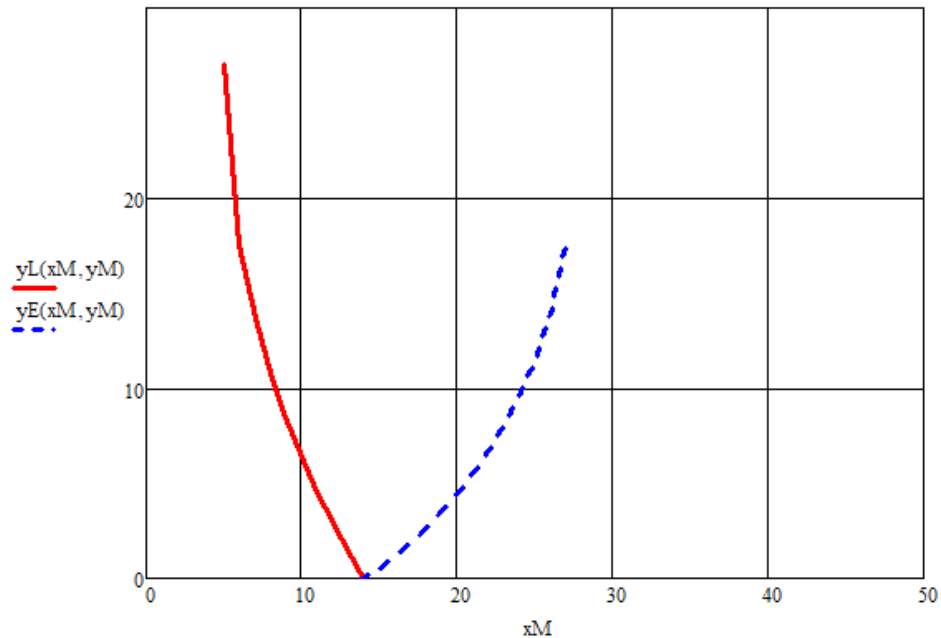


Рис. 3.2. Зміна положення повзунів при переміщенні робочого органу вздовж осі X при $Y_M = 27$ см

Якщо встановити виконавчий орган вище ($Y_M=37$) і знов рухатись вздовж осі X в діапазоні 5-45 см, можна побачити (рис. 3.3), що т. L, починаючи рух від $Y_L=37$ см поступово переміщається вздовж напрямної вниз і при $X_M=24$ см досягає своєї найнижчої точки. Далі рух виконавчого органу неможливий, оскільки повзун не може рухатись ще нижче. Повзун Е при цьому рухається вздовж напрямної вгору. При $X_M=14$ см обидва повзуни будуть на одному рівні ($Y_E=Y_L=10$).

При встановленні виконавчого органу ще вище ($Y_M=47$) і знов рухатись вздовж осі X в діапазоні 5-45 см, то на графіку видно (рис. 3.4), що, хоча т. L поступово переміщується вздовж напрямної вниз і не перетинає нульову точку, рух виконавчого органу вздовж осі X після $X_M=27$ см неможливий, оскільки переміщення повзуна Е такому русі виконавчого органу не існує.

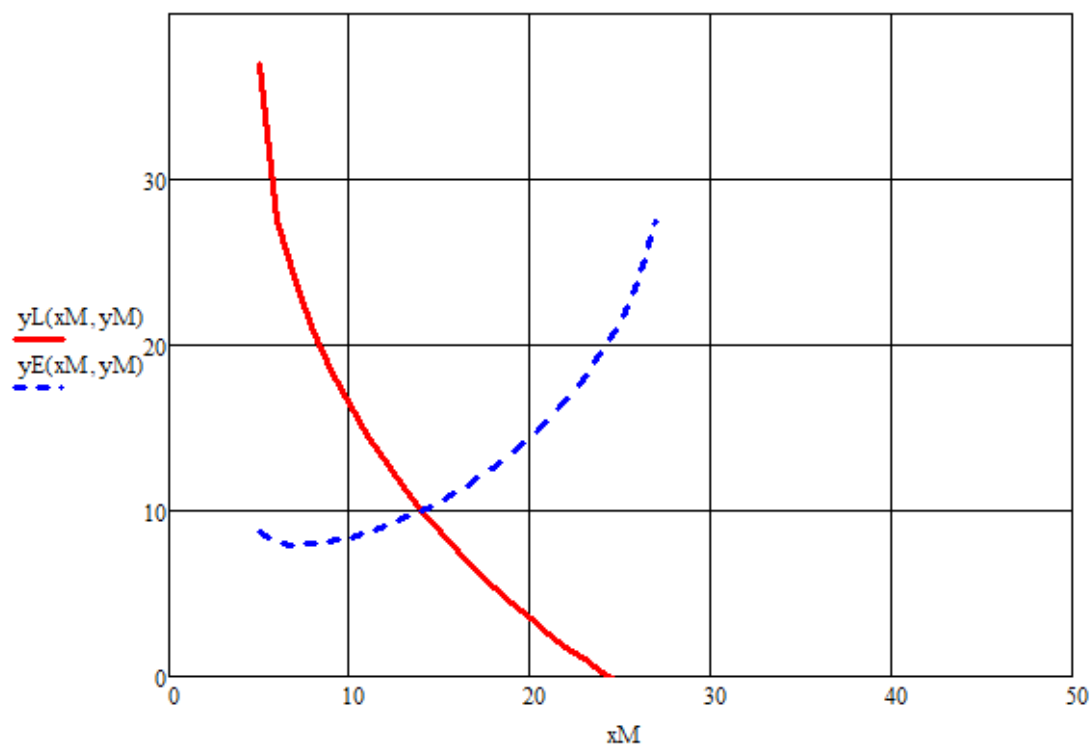


Рис. 3.3. Зміна положення повзунів при переміщенні робочого органу вздовж осі X при $Y_M = 37$ см

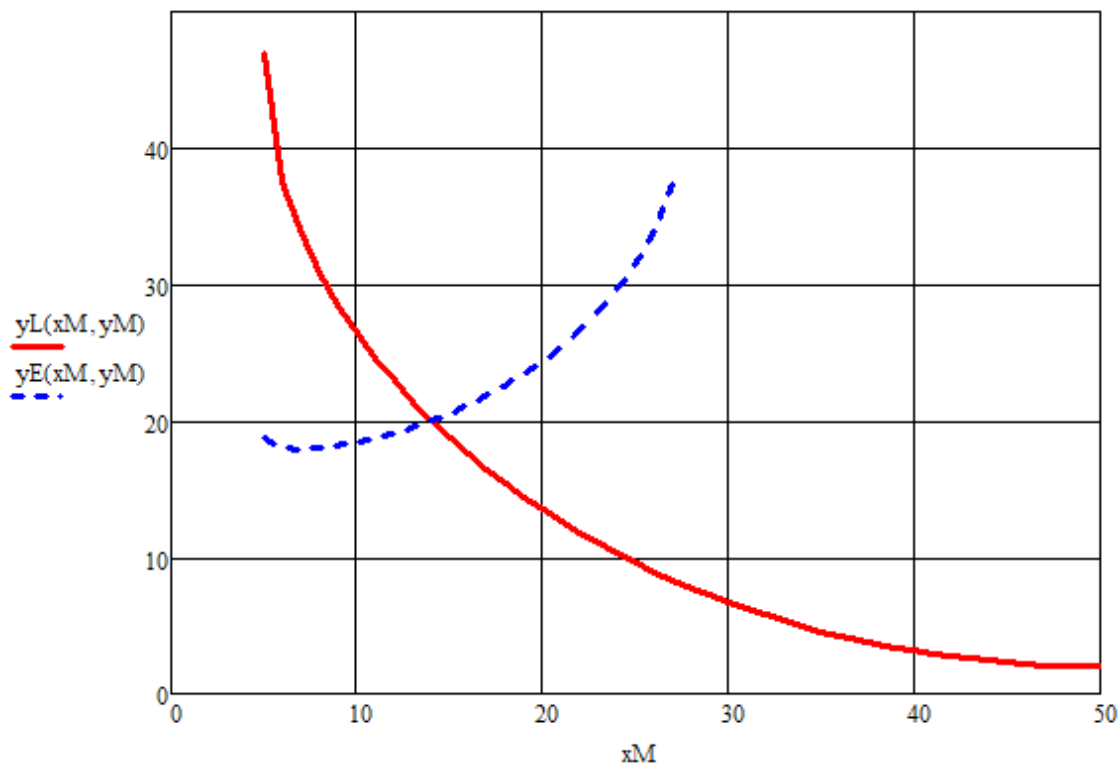


Рис. 3.4. Зміна положення повзунів при переміщенні робочого органу вздовж осі X при $Y_M = 47$ см

Аналогічні дослідження при $Y_M = 57$ см, показують (рис. 3.5), що подальша зміна висоти виконавчого органу не змінює загальної картини і переміщення т. М вздовж осі X можливе тільки в діапазоні 5-27 см.

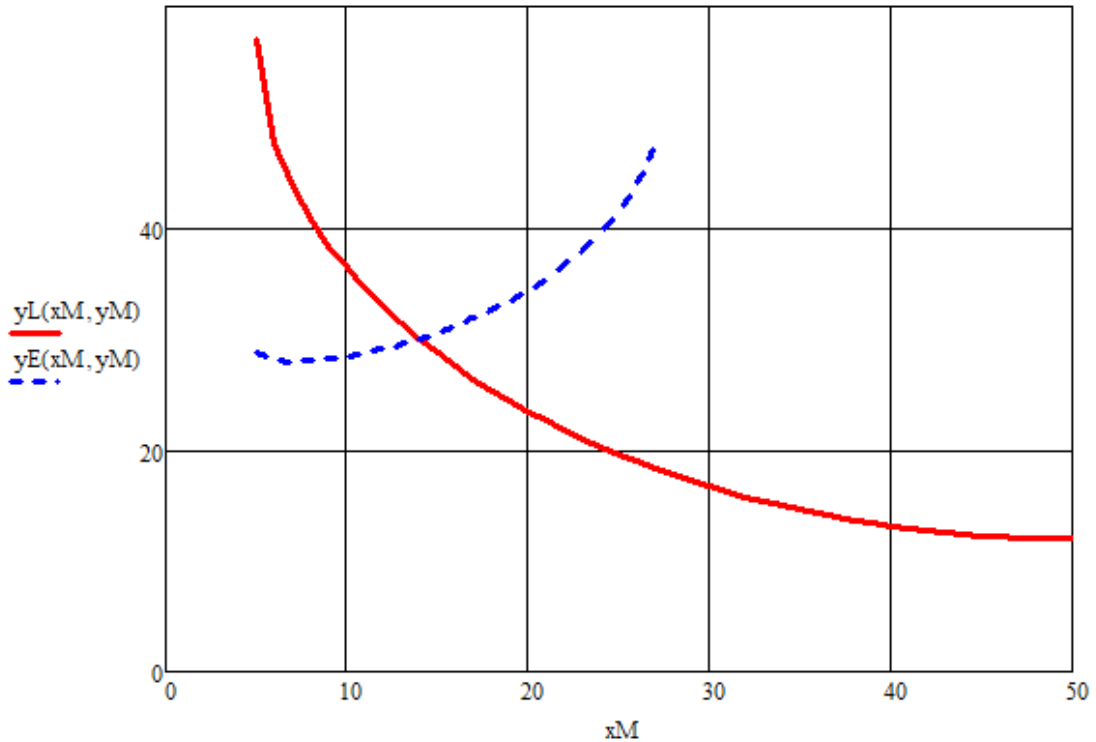


Рис. 3.5. Зміна положення повзунів при переміщенні робочого органу вздовж осі X при $Y_M = 57$ см

Для дослідження переміщення виконавчого органу вздовж вертикальної осі, встановлюємо $X_M = 5$ см і змінюємо Y_M в діапазоні 0-50 см. З графіку (рис. 3.6) видно, що при заданих розмірах кінематичних ланок найнижча точка виконавчого органу буде $Y_M = 27$. При менших значеннях повзун Е буде знаходитись нижче початку напрямної, що неможливо.

При встановлені $X_M = 14$ см і зміні Y_M в діапазоні 27-50 см обидва повзуни будуть рухатись однаково, перебуваючи на однаковій висоті (тобто, $Y_E = Y_L$) (рис. 3.7).

Подальші дослідження показують, що при збільшенні X_M , початкова точка вертикального руху змінюється, тобто найнижче можливе положення виконавчого органу Y_M збільшується при збільшенні значення X_M , і при

$X_M > 27$, вертикальний рух виконавчого органу взагалі неможливий (рис. 3.8-3.10).

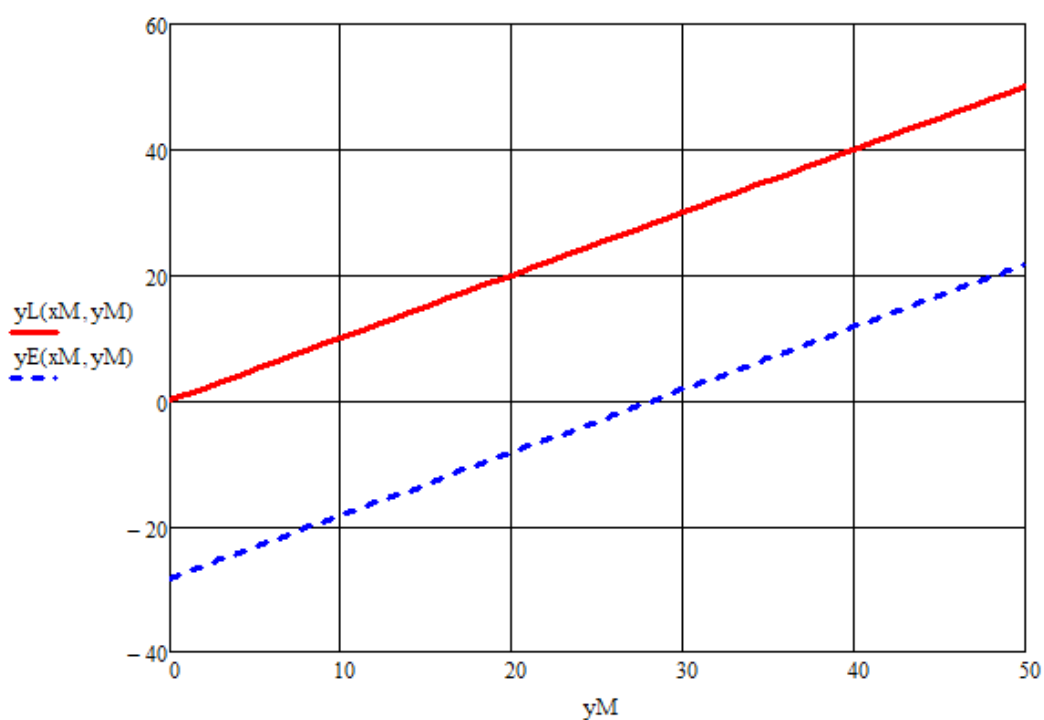


Рис. 3.6. Зміна положення повзунів при переміщенні робочого органу вздовж осі Y при $X_M = 5$ см

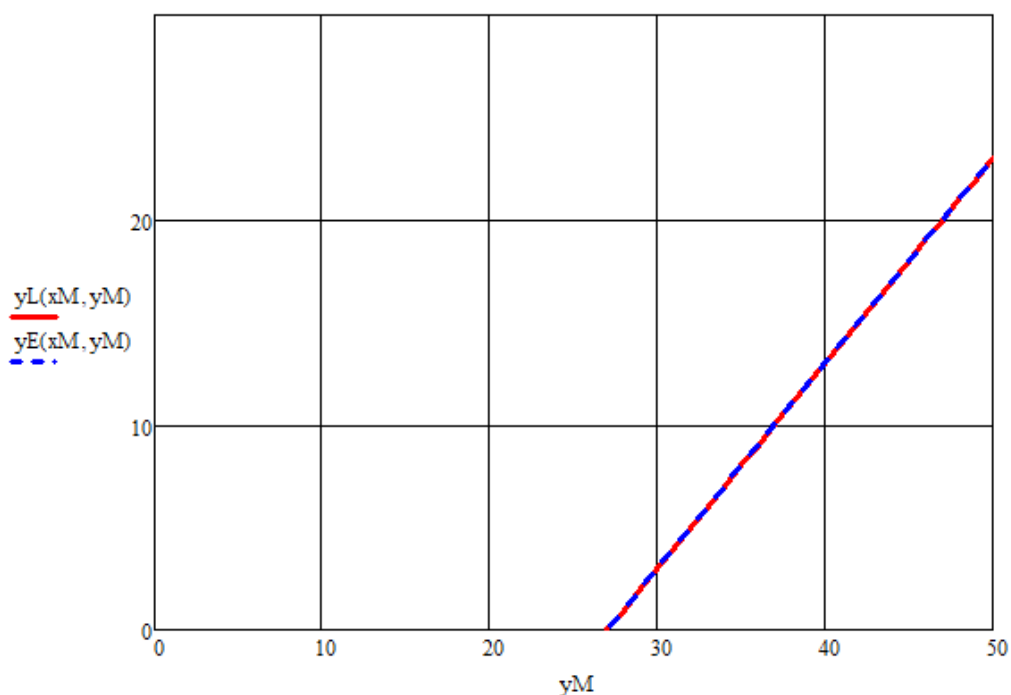


Рис. 3.7. Зміна положення повзунів при переміщенні робочого органу вздовж осі Y при $X_M = 14$ см

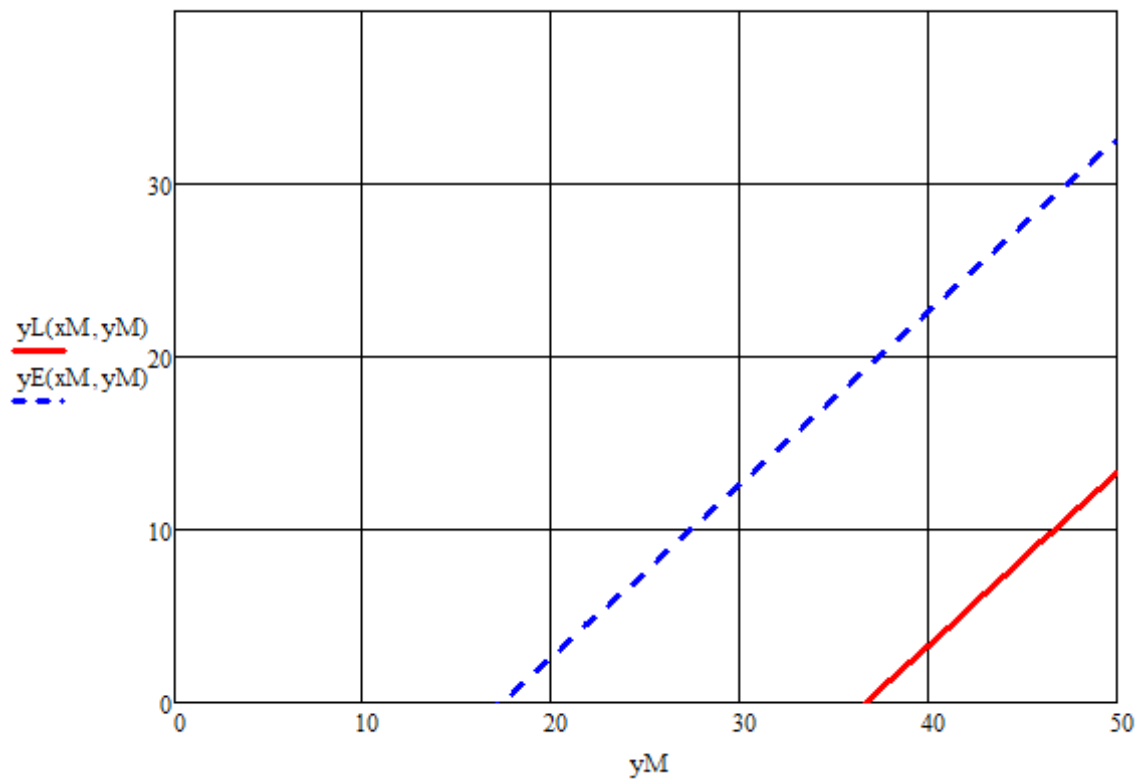


Рис.3.8. Зміна положення повзунів при переміщенні робочого органу вздовж осі Y при $X_M = 24$ см

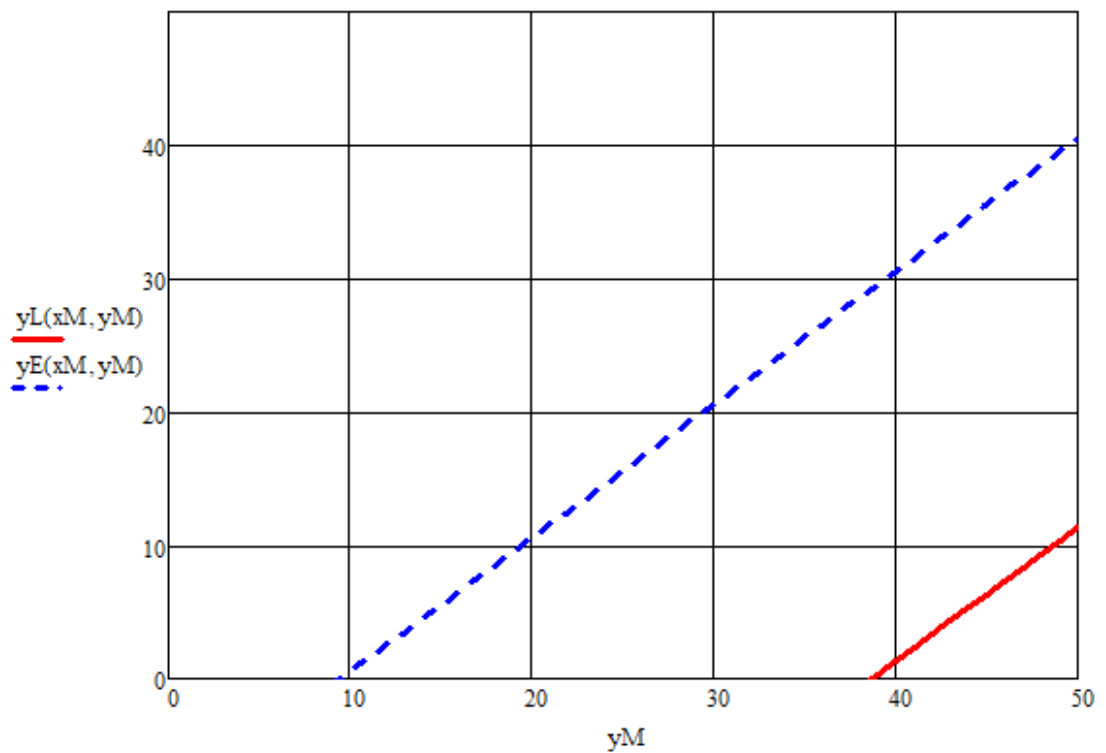


Рис. 3.9. Зміна положення повзунів при переміщенні робочого органу вздовж осі Y при $X_M = 27$ см

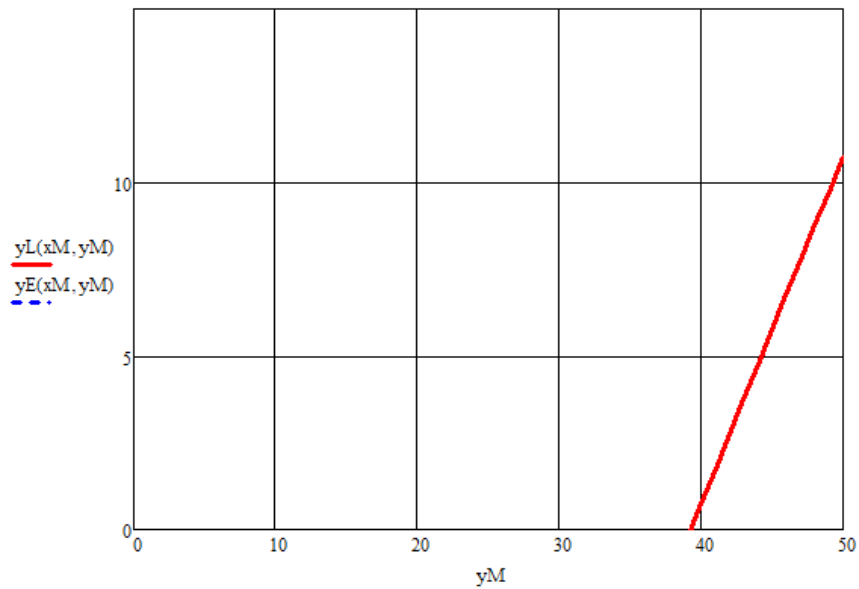


Рис. 3.10. Зміна положення повзунів при переміщенні робочого органу
вздовж осі Y при $X_M = 28$ см

Дослідимо вплив довжини кінематичної ланки EF на величину переміщень виконавчого органу. Встановимо $EF = 35$ см.

При цьому найнижча точка виконавчого органу буде (18;32) (рис. 3.11). При цьому діапазон переміщення вздовж осі X збільшується і становить 5-32 см (рис. 3.12).

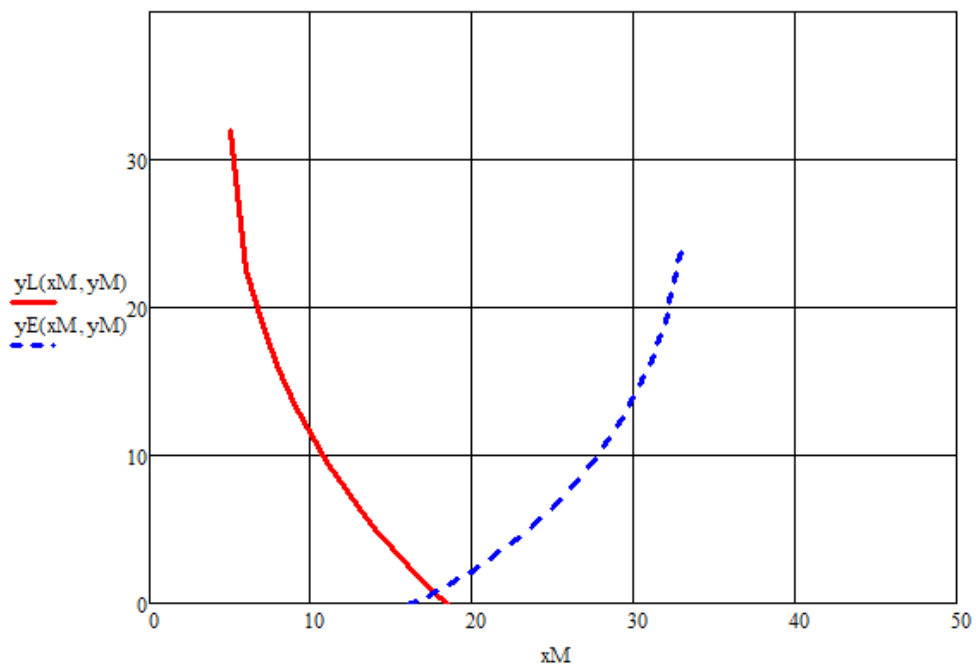


Рис. 3.11. Зміна положення повзунів при переміщенні робочого органу
вздовж осі X при $Y_M = 32$ см ($EF = 35$ см)

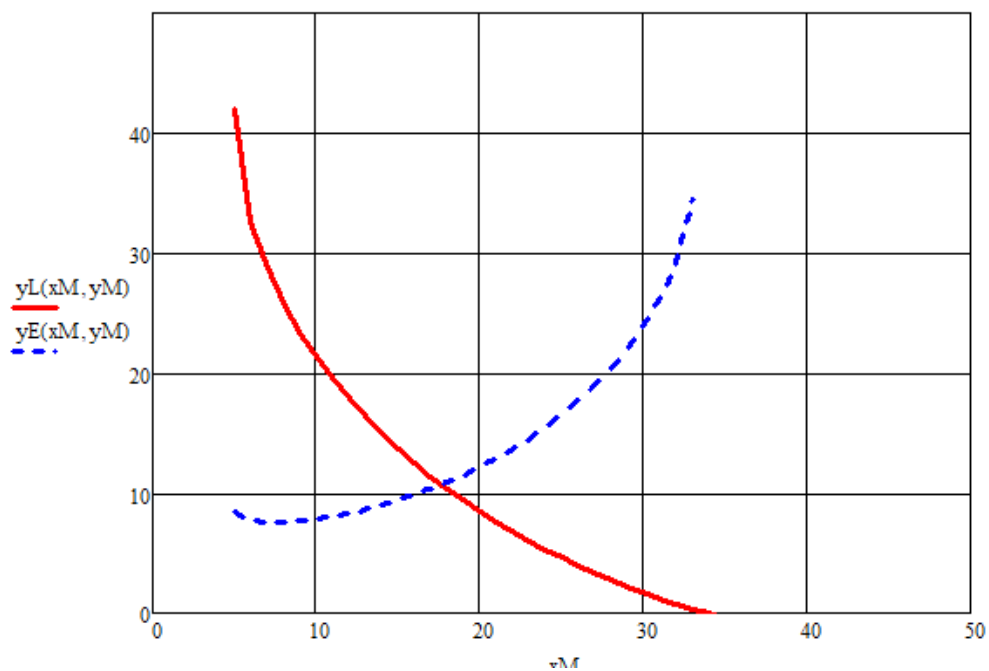


Рис. 3.12. Зміна положення повзунів при переміщенні робочого органу
вздовж осі X при $Y_M = 42$ см ($EF = 35$ см)

Зміну положення найнижчої точки переміщення виконавчого органу до $Y_M = 32$ см, також підтверджується графіком (рис. 3.13).

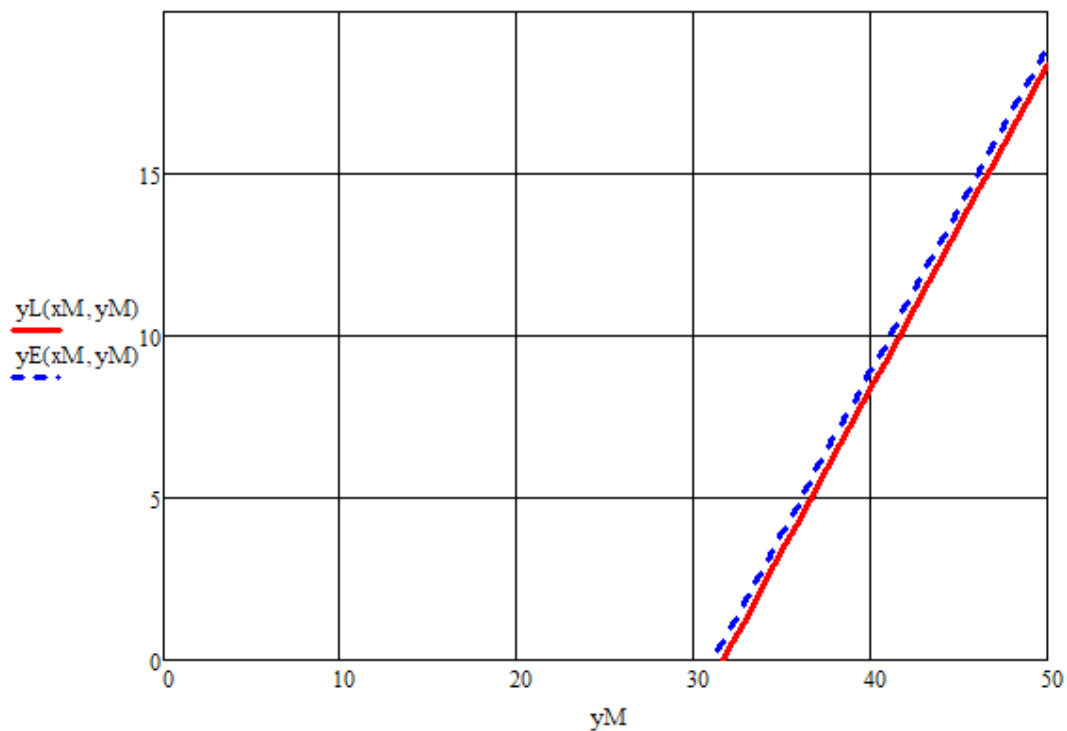


Рис. 3.13. Зміна положення повзунів при переміщенні робочого органу
вздовж осі Y при $X_M = 18$ см ($EF = 35$ см)

Розглянемо вплив положення точки з'єднання кінематичних ланок (т. F).
Приймаємо вихідні параметри:

$$x_E = 0$$

$$x_L = 50 \text{ см}$$

$$EF = 30 \text{ см}$$

$$ML = 45 \text{ см}$$

$$FL = 35 \text{ см}$$

Як видно з графіків (рис. 3.14-3.16) при зменшенні відстані від шарніру до точки з'єднання кінематичних ланок (FL) координата Y найнижчої точки положення виконавчого органу майже не змінюється. А діапазон найбільшого переміщення виконавчого органу в горизонтальному напрямку зменшується.

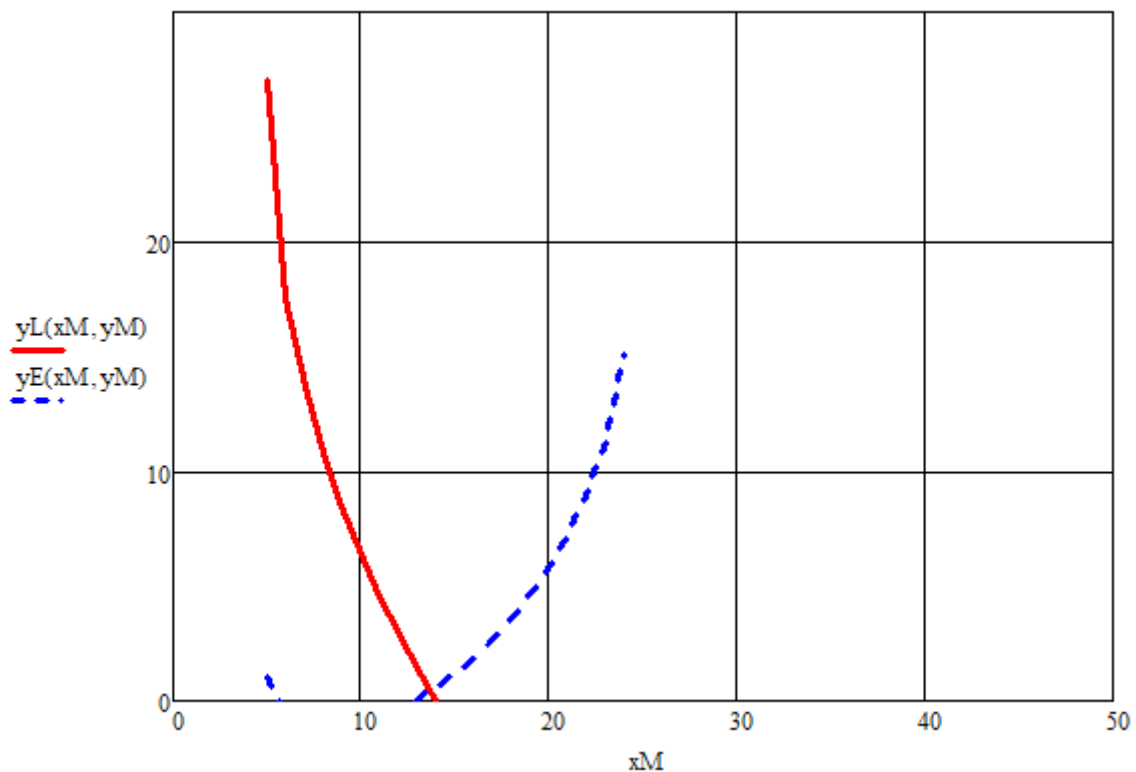


Рис. 3.14. Зміна положення повзунів при переміщенні робочого органу
вздовж осі X при $Y_M = 27 \text{ см}$ ($FL = 35 \text{ см}$)

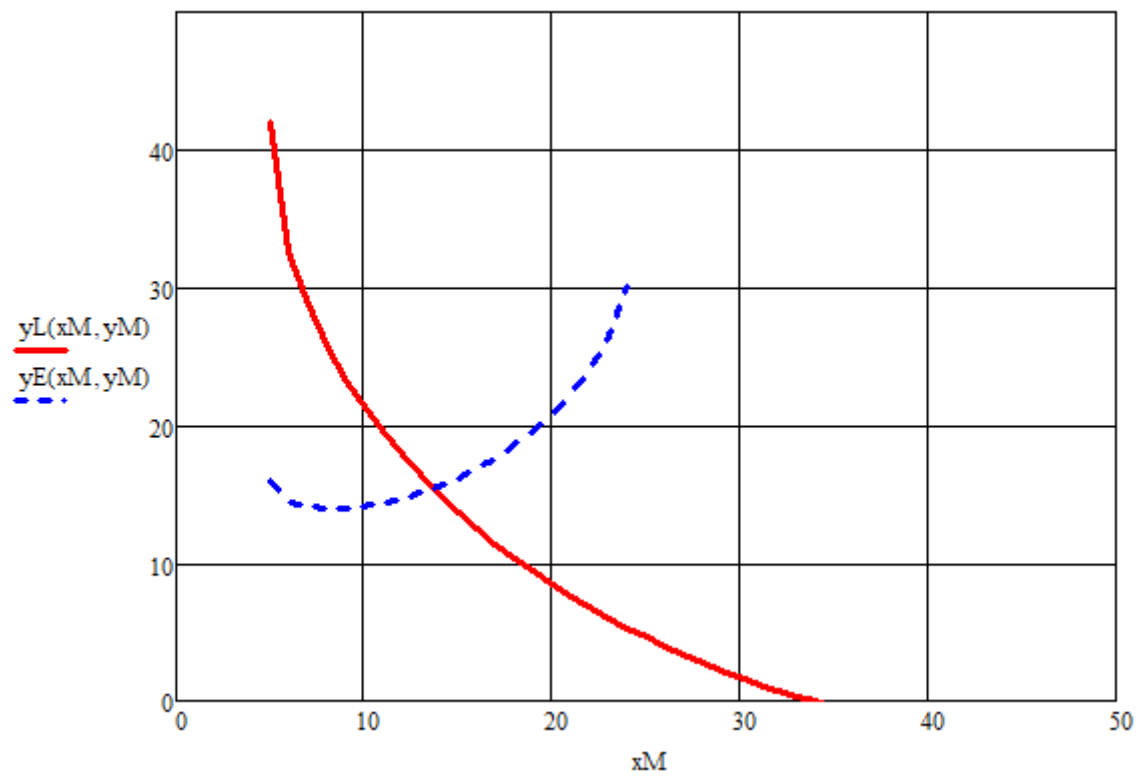


Рис. 3.15. Зміна положення повзунів при переміщенні робочого органу
вздовж осі X при $Y_M = 42$ см (FL = 35 см)

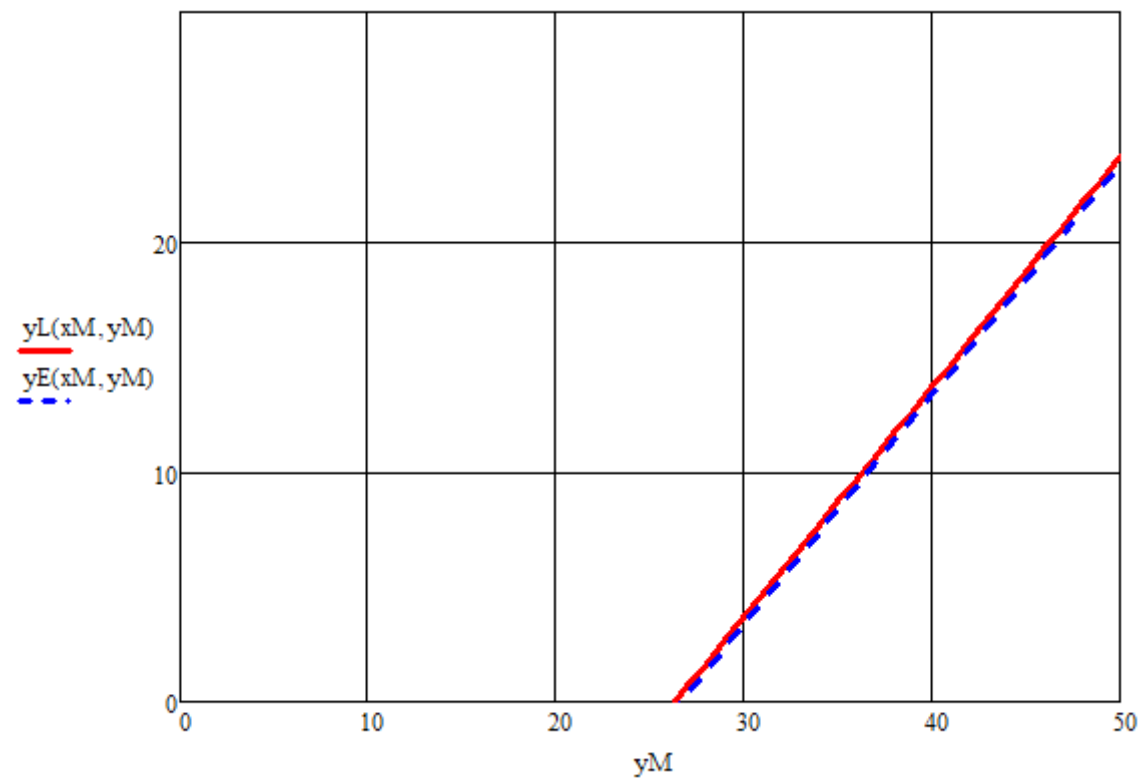


Рис. 3.16. Зміна положення повзунів при переміщенні робочого органу
вздовж осі Y при $X_M = 13.5$ см (FL = 35 см)

Отже, можна зробити наступні висновки:

1. Мінімальні довжини кінематичних ланок повинні бути такими, щоб їх сума була більша за відстань між напрямними, тобто повинна виконуватись умова:

$$EF + FL > AC,$$

де: EF – довжина першої кінематичної ланки; FL – на другій кінематичній ланці відстань від повзуна до точки з'єднання кінематичних ланок; AC – відстань між напрямними.

2. Діапазон горизонтальних переміщень виконавчого органу залежить від довжин кінематичних ланок і положення точки з'єднання кінематичних ланок між собою.

РОЗДІЛ 4

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ОБГРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Загальні вихідні дані

Метою даної випускної кваліфікаційної роботи є вдосконалення фрезерного верстата за допомогою механізму паралельної структури для підвищення його рухомості й коефіцієнту використання робочого простору. А саме, ми замінюємо механізми переміщення інструмента послідовної дії на механізми паралельної структури, тим самим збільшуючи його загальну продуктивність і точність. Для отримання економічного ефекту приймаємо базу для порівняння – трьохкоординатний фрезерний верстат мод. 6Б75ВФ1. На відміну від базового, проектний має менші розміри, та більшу продуктивність.

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

Таблиця 4.1

Загальні вихідні техніко-економічні показники базового та нового верстатів

№ п/п	Показник	Одиниця	Варіанти	
			базовий	проект
1	2	3	4	5
1.	Програма виробництва деталей	шт./рік	10000	10000
2.	Штучний час обробки деталі	хв.	2,4	1,22
3.	Площа, яку займає верстат	м ²	7,03	6,1

1	2	3	4	5
4.	Встановлена потужність електродвигунів верстата	кВт	1,5	1,6
6.	Категорія ремонтної складності: механічної/електричної частин	УРО	13/7	4/12
7.	Розряд роботи: - верстатника - наладчика	розряд розряд	4 5	4 6
8.	Оптова ціна верстата, який модернізується	грн.	120000	
9.	Балансова вартість верстата 6Б75ВФ1	грн.	152500	-

4.2 Визначення витрат на підготовку виробництва

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

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

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

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

$Z_{сг}^{\kappa}$ – середньогодинна заробітна плата конструктора, грн./год.;

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

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

H_e – накладні витрати, грн. (визначаються в процентах від основної заробітної плати конструктора).

$$B_{mk} = 2 \cdot 19 \cdot 85,227 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) + 2 \cdot 19 \cdot 85,227 \cdot \frac{45}{100} = 5803,5 \text{ грн.}$$

4.2.2 Витрати на технологічну підготовку виробництва інструменту:

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

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

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

$$B_m = 2 \cdot 21 \cdot 83,523 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) + 2 \cdot 21 \cdot 83,523 \cdot \frac{55}{100} = 6638,7 \text{ грн.}$$

4.3. Визначення витрат на проведення модернізації верстата

Після визначення трудомісткості модернізації розраховуємо:

а) основну заробітну плату виробничих робітників:

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

де n – кількість i -тих видів робіт;

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

Так, основна заробітна плата виробничих робітників на механічних роботах:

$$Z_{\text{op}} = 96,6 \cdot 77,979 = 7532,77 \text{ грн.}$$

б) витрати на утримання та експлуатацію обладнання:

$$B_o = \sum_{i=1}^n Z_{\text{op}_i} \cdot \frac{P_{\text{pp}_i}}{100}, \quad (4.4)$$

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

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

$$B_o = 7532,77 \cdot \frac{385}{100} = 29001,17 \text{ грн.}$$

в) цехові витрати:

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

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

Для механічних робіт:

$$K_{\text{цех}} = 7532,77 \cdot \frac{232}{100} = 17476,03 \text{ грн.}$$

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

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

Види робіт	Трудомісткість робіт н-год	Середній розряд	Середньогодинна тарифна ставка робітників, грн/год	Основна заробітна плата робітників $З_{ор}$, грн.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання, B_o , грн.		Загальноцехові витрати $K_{цех}$, грн.	
					%	грн.	%	грн.
Ливарні	5,2	3	87,048	452,65	350	1584,27	242	1095,41
Механічні	4,6	4	77,979	358,70	385	1381,01	232	832,19
Слюсарсько- складальні	2,3	4	77,979	179,35	210	376,64	242	434,03
Всього	12,1	-	-	990,70	-	3341,92	-	2361,64

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

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

де M_o, M_d – відповідно витрати на основні та допоміжні матеріали, грн.;
 Π_n – покупні напівфабрикати, комплектуючі вироби та послуги сторонніх підприємств, грн.;

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

T_v – транспортно-заготівельні витрати, грн.;

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

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

$Z_{др}$ – допоміжна заробітна плата виробничих робітників, грн.;
 B_c – відрахування у соціальні фонди (єдиний соціальний внесок), грн.;
 $Z_{щп}$ – відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення та інші спеціальні витрати, грн.;
 $K_{зав}$ – загальнозаводські витрати, грн.;
 $B_{ін}$ – інші виробничі витрати, грн.

Таблиця 4.3

Склад матеріальних витрат на модернізацію верстата

№ п/п	Матеріали, покупні напівфабрикати та комплектуючі вироби	Оди- ниця	Витрат и (шт., кг)	Ціна, грн.	Витрати на виріб, грн.
Основні матеріали					
1.	Чавун СЧ15	кг	90,0	65,00	5850,00
2.	Сталь 45	кг	20,0	43,50	870,00
	Всього основних матеріалів				6720,00
Покупні комплектуючі вироби					
1.	Шарніри	шт.	3	1020,00	1000,00
2.	Метизи	кг	8,2	1124	148,80
3.	Механізм лінійних переміщень	шт.	2	16000,0	30000,00
4.	Мотор-шпиндель	шт.	1	16300	
	Всього покупних комплектуючих				31148,80

Розрахунок собівартості зводимо до табл. 4.4.

Виробнича собівартість модернізації

№ з/п	Стаття калькуляції	Коротке позначення	Метод розрахунку, джерело інформації	Результат, сума, грн.
1	2	3	4	5
1.	Матеріали основні	M_o	табл. 4.3	6720,00
2.	Матеріали допоміжні	M_d	4% від M_o	268,80
3.	Покупні напівфабрикати, комплектуючі вироби та послуги підприємств	$П_n$	табл. 4.3	31148,80
4.	Зворотні відходи	$-B_{зв}$	5% від M_o	403,20
5.	Транспортно-заготівельні витрати	T_v	6% від $(M_o + M_d)$	1525,50
6.	Паливо та енергія на технологічні цілі	$П_{тех}, E_{тех}$	78,8% від $З_{ор}$	772,75
7.	Всього матеріальні витрати			40032,65
8.	Основна заробітна плата виробничих робітників	$З_{ор}$	табл. 4.2	990,70
9.	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	$З_{др}$	10% від $З_{ор}$	99,07
10.	Відрахування на соціальні заходи	B_{cc}	22% від $(З_{ор} + З_{др})$	239,75
11.	Відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення	$З_{уп}$	8,5% від $З_{ор}$	84,21
12.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання	B_o	табл. 4.2	3341,92
13.	Цехові витрати	$K_{цех}$	табл. 4.2	2361,64
14.	Загальнозаводські витрати	$K_{зав}$	185% від $З_{ор}$	1832,80
15.	Інші виробничі витрати	$B_{ін}$	2,5% від $З_{ор}$	24,77
16.	Виробнича собівартість	$C_{вир}$	$\Sigma(7 \div 15)$	49007,52

Балансову вартість модернізованого верстата визначаємо за формулою:

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

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

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

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

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

$$\Phi_{\text{бал.б}} = 120000 \cdot (1 + 0,08 + 0,06 + 0,05) = 142800 \text{ грн.}$$

m – кількість анульованих у процесі модернізації деталей та вузлів;

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

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

$$\Phi_{\text{бал.пр}} = 142800 - 0 + 49008 = 191808 \text{ грн.}$$

4.4. Визначення експлуатаційних витрат (собівартості обробки)

Розрахунок виконуємо за формулою:

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

де $B_{\text{м}}$ – витрати на основні матеріали, грн. (не розраховуються, оскільки співпадають у базовому та проектному варіантах);

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

B_e – витрати на силову електроенергію, грн.;

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

B_p – витрати на ремонт обладнання, грн.;

B_n – витрати на утримання приміщення, грн.;

B_a – витрати на амортизацію обладнання, грн.

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

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

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

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

В базовому варіанті:

$$B_{зб} = 77,979 \cdot \frac{2,1}{60} \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) = 3,663 \text{ грн.};$$

В проектному варіанті:

$$B_{зн} = 77,979 \cdot \frac{1,44}{60} \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) = 2,551 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію силову:

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

де $N_{\text{в}}$ – встановлена потужність електродвигунів силового вузла, кВт;

$K_{\text{о}}$ – коефіцієнт одночасної роботи моторів ($K_{\text{о}}=0,65...0,8$);

K_{N} – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за потужністю (для свердлильних верстатів $K_{\text{N}}=0,5...0,6$);

$K_{\text{д}}$ – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів верстата за часом ($K_{\text{д}}=0,3...0,5$);

$\eta_{\text{с}}$ – середній коефіцієнт корисної дії електродвигунів ($\eta_{\text{с}}=0,86...0,9$);

$\eta_{\text{м}}$ – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі підприємства ($\eta_{\text{м}}=0,92...0,96$);

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

$$B_{\text{ел}}^{\text{баз}} = \frac{1,5 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 0,3}{0,87 \cdot 0,95} \cdot \frac{2,1}{60} \cdot 4,50 = 0,036 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{ел}}^{\text{пр}} = \frac{1,5 \cdot 0,7 \cdot 0,7 \cdot 0,4}{0,87 \cdot 0,95} \cdot \frac{1,44}{60} \cdot 4,50 = 0,039 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжні матеріали:

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

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

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

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

$$B_{\text{дм}}^{\text{баз}} = \frac{79,5 \cdot 13,0 \cdot 2,1}{60 \cdot 100} \cdot 1,0 = 0,362 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{дм}}^{\text{пр}} = \frac{79,5 \cdot 3,0 \cdot 1,44}{60 \cdot 100} \cdot 1,0 = 0,057 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт обладнання:

$$B_p = \frac{R_m \cdot \Gamma_{\text{вм}} + R_e \cdot \Gamma_{\text{вс}}}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \quad (4.13)$$

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

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

$$B_p^{\text{баз}} = \frac{13 \cdot 880 + 7 \cdot 720}{3950} \cdot \frac{2,1}{60} = 0,146 \text{ грн.},$$

$$B_p^{\text{пр}} = \frac{3 \cdot 880 + 12 \cdot 720}{3950} \cdot \frac{1,44}{60} = 0,069 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання приміщення:

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

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

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

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

$$B_{\text{уп}}^{\text{баз}} = \frac{7,03 \cdot 2,5 \cdot 2,1}{3950 \cdot 60} \cdot 780 = 0,065 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{уп}}^{\text{пр}} = \frac{5,6 \cdot 3,0 \cdot 1,44}{3950 \cdot 60} \cdot 780 = 0,042 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію верстата:

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

де H_a – норма амортизації, %;

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

$$B_a^{\delta} = \frac{152500 \cdot 20 \cdot 2,1}{3950 \cdot 60 \cdot 100} = 0,270 \text{ грн.},$$

$$B_a^{\text{пр}} = \frac{191808 \cdot 20 \cdot 1,44}{3950 \cdot 60 \cdot 100} = 0,233 \text{ грн.}$$

Витрати на налагодження верстата:

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

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

A – кількість налагоджень за рік;

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

N_{δ} – річна програма випуску деталей, шт./рік.

$$B_n^{\text{баз}} = 88,375 \cdot (1 + 0,10) \cdot (1 + 0,22) \cdot \frac{30 \cdot 12}{60 \cdot 10000} = 0,071 \text{ грн.}$$

$$B_n^{\text{пр}} = 103,972 \cdot (1 + 0,10) \cdot (1 + 0,22) \cdot \frac{35 \cdot 12}{60 \cdot 10000} = 0,098 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків зводимо до табл. 4.5.

Експлуатаційні витрати (собівартість обробки)

№ п/п	Експлуатаційні витрати	Умовне познач.	Варіанти	
			Базовий	Проектний
1.	Заробітна плата основна, додаткова з відрахуваннями на соціальні заходи	B_z	3,663	2,551
2.	Силова електроенергія	$B_{ел}$	0,036	0,039
3.	Допоміжні матеріали	$B_{дм}$	0,362	0,057
4.	Ремонт обладнання	B_p	0,146	0,069
5.	Утримання приміщення	$B_{ун}$	0,065	0,042
6.	Амортизація обладнання	B_a	0,270	0,233
7.	Налагодження обладнання	B_n	0,071	0,098
Загальна сума		B_e	6,8751	3,2740

4.5 Розрахунок показників економічної ефективності

Річний економічний ефект від проведеної модернізації розрахуємо за формулою:

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

де N_d – річна програма випуску деталі на модернізованому верстаті, шт.;

K_d – додаткові капітальні витрати, грн.

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

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

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

$Q_{пр}$, $Q_{б}$ – потреба у верстатах відповідно в проектному і базовому варіантах.

Потребу в обладнанні визначаємо за формулою:

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

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

Так потреба в проектному варіанті:

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

$$K_{\partial} = 5803,5 + 6638,7 + 191808 \cdot 1 - 152500 \cdot 1 = 51750 \text{ грн.}$$

$$E_p = (4,613 - 3,089) \cdot 10000 - 0,16 \cdot 51750 = 6960 \text{ грн.}$$

Строк окупності додаткових капітальних вкладень:

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

$$T_{ок} = \frac{51750}{(4,613 - 3,089) \cdot 10000} = 3,4 \text{ роки}$$

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

Таблиця 4.6

Підсумкові техніко-економічні показники базового та проектного варіантів

№ п/п	Показники	Оди- ниця	Базовий варіант	Проект	Зміна, % (+,-)
1.	Потреба у верстатах	шт./рік	1	1	–
2.	Програма виробництва деталей	шт./рік	10000	10000	–
3.	Штучний час обробки деталі	хв.	2,1	1,44	–31,4
4.	Оптова ціна верстата, який модернізується	грн.	120000	–	–
5.	Виробнича собівартість модернізації	грн.	–	49007	–
7.	Балансова вартість порівнюваних верстатів	грн.	152500	191800	+25,8
8.	Собівартість одиниці обробки	грн.	4,613	3,089	–33,0
9.	Додаткові капітальні витрати у тому числі на конструкторську та технологічну підготовку виробництва	грн.	–	152500	–
		грн.	–	12442	–
10.	Строк окупності додаткових капітальних витрат	років	–	3,4	–
11.	Річний економічний ефект	грн.	–	6960	–

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі на тему: «Дослідження верстата з паралельною кінематикою» виконано дослідження впливу геометричних параметрів кінематичних ланок верстата з паралельною кінематикою типу «ножиці» на переміщення його виконавчого органу.

В роботі проведено аналіз компоновок верстатів з паралельною кінематикою, їх переваг і недоліків. Також вирішено пряму і зворотну задачу кінематики для верстата з паралельною кінематикою типу «ножиці».

Розглянуто узгодженість рухів кінематичних ланок при реалізації типових рухів виконавчого органу. Проаналізовано можливість здійснення виконавчим органом вертикальних і горизонтальних рухів при різних геометричних параметрах кінематичних ланок. Визначено, що мінімальні довжини кінематичних ланок повинні бути такими, щоб їх сума була більша за відстань між напрямними, тобто повинна виконуватись умова:

$$EF + FL > AC,$$

де: EF – довжина першої кінематичної ланки; FL – на другій кінематичній ланці відстань від повзуна до точки з'єднання кінематичних ланок; AC – відстань між напрямними. Діапазон горизонтальних переміщень виконавчого органу залежить від довжин кінематичних ланок і положення точки з'єднання кінематичних ланок між собою.

Виконано необхідні економічні розрахунки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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
2. Валявський, І. А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою : навч. посіб. / І. А. Валявський, О. В. Лисенко, І. А. Лисенко ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький: ЦНТУ, 2023. - 281 с.
3. Валявський І.А., Крижанівський В.А. Математичне моделювання положення вихідного органу І-координатного механізму. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : збірник наук. праць. Кіровоград:КДТУ, 2003. Вип. 12. С. 223-229.
4. Валявський І.А., Кулешков Ю.В. Дослідження впливу компоновальної схеми та діапазону зміни довжини кінематичних ланок на просторові рухові характеристики гексаподів. Конструювання, виробництво та експлуатація сільсько-господарських машин. Загально-державний міжвідомчий науково-технічний збірник. Кіровоград: КНТУ, 2015. Вип. 45, ч. 1. С. 115-120.
5. Економічні та організаційно-планові розрахунки при обґрунтуванні доцільності розробки нових виробів // Укладачі: Журило І.В., Полтавець М.М. Кропивницький: ЦНТУ, 2017. 40 с.
6. Кузнєцов Ю. М. Світові тенденції і перспективи розвитку верстатобудування в Україні / Ю. М. Кузнєцов // Зб. наук. праць за матеріалами науково-методичної конф. «Вища освіта – 2006». – 2007. – С. 45–55.
7. Кузнєцов Ю.М. Сучасний стан, перспективи розвитку і виробництва металорізальних верстатів в Україні. Вісті Академії інженерних наук України, 2011. №1(41). С.2-10.

8. Методичні рекомендації до кваліфікаційної роботи : освітньо - професійна програма «Прикладна механіка», рівень вищої освіти другий (магістерський) : спец. 131 Прикладна механіка, галузь знань 13 Механічна інженерія / [уклад. : І. І. Павленко, В. А. Мажара, К. К. Щербина, О. І. Скібінський] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т., каф. машинобуд., механіки і робототехніки. - Кропивницький : ЦНТУ, 2021. - 42 с.

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

10. Струтинський В.Б., Кириченко А.М. Кінематичні залежності верстата з механізмом паралельної структури «біглайд». Вібрації в техніці та технологія. Вінниця : ВНАУ, 2008. № 1. С. 45-50.

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

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

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

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

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

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

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