

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

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
для освітнього ступеня «МАГІСТР»
за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»

на тему:

Дослідження верстата з паралельною кінематикою

Study of a machine with parallel kinematics

Виконавець: здобувач гр. ГМ-22М-3

_____ Сергій ГАВАКА

Керівник: к.т.н., доцент

_____ Іван ВАЛЯВСЬКИЙ

Рецензент: к.т.н., доцент

Завідувач кафедри ММР

_____ Андрій ГРЕЧКА

Кропивницький – 2024

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет Механіко-технологічний

Кафедра Машинобудування, мехатроніки і робототехніки

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри, голова циклової комісії _____

« ____ » _____ 2024 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧЕВІ

Гавака Сергій Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження верстата з паралельною кінематикою

Керівник роботи Валявський Іван Анатолійович, канд. техн. наук

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від « ____ » _____ 2024 р. № _____

2. Строк подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до роботи

3.1. Поставлена наукова задача керівником; 3.2. Аналіз компонок багатокординатного технологічного обладнання; 3.3. Вимоги до результатів досліджень;

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

4.1. Аналіз компонок технологічного обладнання з паралельною кінематикою

4.2. Визначення просторових функціональних залежностей верстатів з паралельною кінематикою

4.3. Дослідження параметрів робочого простору верстатів типу дельта

4.4. Техніко-економічні розрахунки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Дослідження верстата з паралельною кінематикою (1 арк.); 2. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою (1 арк.); 3. Просторові функціональні залежності (2 арк.); 4. Узгодженість рухів кінематичних ланок при реалізації типових рухів виконавчого органу (1 арк.); 5. Вплив конструктивних параметрів верстатів типу дельта на геометричні параметри робочого простору (2 арк.); 6. Параметри робочого простору (2 арк.)

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Економічна частина	к.е.н., доц. Журило І.В.		

Дата видачі завдання

« ____ » _____ 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд літературних джерел	Лютий 2024	вик.
2.	Вступ, мета та задачі роботи	Лютий - березень 2024	вик.
3.	Визначення просторових залежностей	Березень - квітень 2024	вик.
4.	Дослідження робочого простору	Квітень 2024	вик.
5.	Висновки	Квітень – травень 2024	вик.
6.	Визначення економічної ефективності	Травень 2024	вик.
7.	Оформлення роботи	Червень 2024	вик.

Здобувач _____ Гавака С.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____ Валявський І.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Анотація

Гавака С.В. Дослідження верстата з паралельною кінематикою. Випускна кваліфікаційна робота для освітнього ступеня «магістр» – ЦНТУ, 2024. – 73 с., 9 слайдів презентації, 8 бібліогр.

У випускній кваліфікаційній роботі розглянуто існуючі схеми механізмів паралельної структури типу дельта. Визначено показники, які впливають на форму та розміри робочого простору. Розв'язано зворотну задачу кінематики для технологічного обладнання типу дельта. Визначено вплив на робочий простір кутів повороту кінематичних ланок при типових рухах виконавчого органу. Побудовано робочий простір для верстата "Дельта". Проведено теоретичні дослідження впливу конструктивних параметрів верстата на геометричні характеристики його робочого простору.

Розраховано річний економічний ефект впровадження запропонованого верстата типу дельта, який у споживача складає 10500 грн.

Ключові слова: верстат, верстат-дельта, паралельна кінематика, робочий простір.

Annotation

Havaka S.V. Study of a machine with parallel kinematics. Graduation qualification thesis for the educational degree "master" - Central Ukrainian National Technical University, 2024. - 73 pp., 9 illustrations, 8 bibliographies.

In the graduation qualification work, existing schemes of delta-type parallel structure mechanisms are examined. The indicators affecting the shape and size of the working space are determined. The inverse kinematics problem for delta-type technological equipment is solved. The impact of the rotational angles of the kinematic links on the working space during typical movements of the executive body is analyzed. The working space for the "Delta" machine is constructed. Theoretical studies on the influence of the machine's structural parameters on the geometric characteristics of its working space are conducted.

The annual economic effect of implementing the proposed delta-type machine for the user is calculated to be 10500 UAH.

Keywords: machine tools, delta machine tools, parallel kinematics, working space.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ	
1.1. Основні напрямки розвитку технологічного обладнання з паралельною кінематикою	9
1.2. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою типу «дельта»	16
1.3. Аналіз схем обладнання з паралельною кінематикою	19
1.4. Конструкції технологічного обладнання типу «дельта»	26
РОЗДІЛ 2 ПРОСТОРОВІ ФУНКЦІОНАЛЬНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ВЕРСТАТІВ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ ТИПУ ДЕЛЬТА	
2.1. Просторові функціональні залежності верстатів з лінійним приводом	30
2.2. Просторові функціональні залежності верстатів з обертальним приводом кінематичних ланок	36
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО ПРОСТОРУ ВЕРСТАТІВ ТИПУ ДЕЛЬТА	
3.1. Узгодженість рухів кінематичних ланок при реалізації типових рухів виконавчого органу	42
3.2. Вплив конструктивних параметрів верстатів типу дельта на геометричні параметри робочого простору	50
РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ ВЕРСТАТА ПАРАЛЕЛЬНОЇ КІНЕМАТИКИ	55
ВИСНОВКИ	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	73

ВСТУП

Актуальність роботи. Досвід конструкторсько-технологічних розробок останнього десятиліття демонструє, що традиційні підходи, принципи та критерії вибору рішень не є ефективними в нових ринкових умовах.

Одним з ключових завдань, від вирішення якого залежить ефективність виробництва, є розвиток науково-технічного прогресу шляхом раціонального використання прогресивних ідей, відкриттів, винаходів, концепцій та результатів наукових досліджень. Сучасне машинобудування стикається з двома актуальними проблемами:

- автоматизація виробництва, включно із створенням гнучких виробничих систем, властивості яких дозволяють адаптуватися до поточних виробничих умов та забезпечувати задані параметри функціонування виробничого процесу;
- підвищення точності, продуктивності, надійності та довговічності технологічного обладнання при розширенні його функціональних можливостей.

У 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:

- високим рівнем гнучкості виробництва та переналагодження обладнання при переході на іншу номенклатуру виробів;

- реалізацією надвисоких швидкостей робочих, допоміжних та установчих переміщень рухомих виконавчих органів;
- модульною конструкцією технологічного обладнання;
- геометричною симетрією побудови;
- замкненістю кінематичних ланцюгів, що створюють жорстку конструкцію;
- 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 даної роботи є дослідження впливу конструктивних параметрів верстатів типу «Дельта» на геометричні характеристики робочого простору.

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

- аналіз існуючих схем побудови механізмів типу «Дельта» і визначення параметрів, які впливають на геометрію робочого простору;
- постановка і розв’язок зворотної задачі кінематики для механізмів типу дельта;
- виконано моделювання робочого простору верстата та визначено вплив конструктивних параметрів на геометрію робочого простору;
- розраховано техніко-економічні показники ефективності проектування та використання верстатів типу дельта.

Об’єкт дослідження – верстат з паралельною кінематикою типу «Дельта».

Предмет дослідження – конструктивні параметри верстатів типу «Дельта».

Практичне значення – визначено параметри, що впливають на робочий простір верстатів «Дельта», та досліджено їх вплив на геометричні характеристики робочого простору.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ

1.1. Основні напрямки і тенденції розвитку обладнання з паралельною кінематикою

Сучасний розвиток нових технологій нерозривно пов'язаний з урахуванням вимог ринкової економіки. Підвищення конкурентоспроможності продукції вимагає постійного вдосконалення конструкцій і їх технічних характеристик.

Ключовим напрямком автоматизації багатомоделного серійного виробництва є створення швидкопереналаджуваного технологічного обладнання на основі механізмів паралельної структури. Таке обладнання слід розглядати не як модернізацію існуючого, а як принципово новий клас верстатних систем, здатних виконувати різноманітні технологічні операції – обробку, складання, випробування та вимірювання виробів.

Завдяки своїм унікальним властивостям, технологічне обладнання з паралельною кінематикою може вирішити більшість задач, що постають перед сучасним багатомоделним серійним виробництвом:

- забезпечити високий рівень гнучкості виробництва та швидкопереналадженість при зміні номенклатури виробів;
- реалізувати надвисокі швидкості робочих, допоміжних та установчих переміщень рухомих виконавчих органів;
- мати модульну конструкцію;
- геометричну симетрію конструкції;
- замкнені жорсткі кінематичні ланцюги;
- високу точність позиціонування та динамічні характеристики.

Для створення сучасного високопродуктивного технологічного обладнання, здатного реалізовувати високі технології та високошвидкісну багатокоординатну обробку, першочергово необхідно орієнтуватися на

використання механізмів паралельної кінематичної структури. Саме такі механізми на даний момент можуть забезпечити необхідний технічний рівень та високу конкурентоспроможність обладнання.

Однак, на сьогодні існує надзвичайно широкий спектр робототехнічних систем, які класифікуються за призначенням, конструктивними особливостями схемних та принципових рішень, що лише частково висвітлено в монографічній літературі, навчальних матеріалах та стандартах. Більшість маніпуляторів роботів мають незамкнені кінематичні ланцюги, тобто використовують механізми послідовної структури.

Механізми з паралельними кінематичними ланцюгами (паралельної структури) мають низку важливих переваг, таких як висока жорсткість, точність, надійність та компактність. Існують вдалі приклади конструкцій верстатів, стендів та іншого обладнання різного призначення, побудованих на механізмах паралельної структури. Однак, на сьогодні вони ще недостатньо широко використовуються через певні причини.

Серед цих причин – складність керування такими маніпуляторами та недостатня розробленість методик, які дозволяли б отримувати оптимальні конструктивні варіанти та найбільш відповідні алгоритми автоматичного або автоматизованого керування приводами для обраної конструкції. Недостатні дослідження механіки маніпуляторів з паралельними ланцюгами пояснюються високою складністю і, в загальному випадку, неоднозначністю аналітичного розв'язання оберненої задачі геометрії та кінематики. Проте, сучасний рівень розвитку комп'ютерних технологій дозволяє застосовувати ефективні чисельні методи для вирішення багатьох задач розрахунку та оптимізації при проектуванні таких маніпуляторів.

У зв'язку з цим, особливої актуальності набуває завдання дослідження можливості оптимізації геометричних, кінематичних, силових і динамічних параметрів роботів з маніпуляторами паралельної структури та розробка наукових основ методик їх розрахунку і проектування.

Концепція розвитку багатономенклатурного виробництва конкурентоспроможної машинобудівної продукції в умовах жорсткої боротьби за ринки збуту вимагає широкого використання нових високоефективних технологій та створення гнучких автоматизованих верстатних систем для їх реалізації. Аналіз традиційного технологічного обладнання на основі послідовних приводів та механізмів показує, що воно не завжди відповідає вимогам сучасного виробництва через вузькоспеціалізовані конструкторсько-технологічні особливості та обмежене практичне застосування.

Верстати традиційної компоновки історично створювалися для реалізації специфічних видів обробки з високим рівнем диференціації операцій. Проте сучасне серійне виробництво вимагає переходу до ширшої інтеграції операцій із застосуванням комплексу різноманітних технологічних методів обробки. Майже все існуюче верстатне обладнання та його елементи є однофункціональними й однопотоковими, що ускладнює їх функціональну структуру, збільшує матеріалоемність та витрати на проектування і виготовлення, обмежуючи функціональні можливості.

Більшість верстатних систем мають довгі розімкнені кінематичні ланцюги з нераціональним розміщенням центрів мас, що створює додаткові навантаження на рухомі елементи, зменшує точність позиціонування робочого органу та не забезпечує необхідний рівень динамічних характеристик. Крім того, структура їх приводів не дозволяє реалізувати потрібну гнучкість функціонування технологічних процесів.

Особливість сучасного виробництва полягає у переході до обробки деталей складнішої форми з невеликими припусками, що потребує висококомбінованого, багатокоординатного та швидкопереналагоджуваного технологічного обладнання.

Підвищення ефективності парку технологічного обладнання повинне здійснюватися шляхом усунення зазначених недоліків та пошуку нових

нетрадиційних рішень його вдосконалення на основі узагальнених особливостей будови високоефективних верстатних механізмів та систем.

Еволюція верстатобудування свідчить, що час від часу з'являлися нові ідеї та розробки елементів верстатних систем, на основі чого сформувалася нова тенденція розподілу функцій і перерозподілу навантажень між окремими механізмами та системами технологічного обладнання. Основні тенденції створення технологічного обладнання нового покоління такі:

- багатфункціональність (забезпечення можливості виконання різноманітних технологічних, транспортних, вимірювальних та інших операцій одним робочим органом);
- високорухомість (здатність робочого органу виконувати різні просторові переміщення та зміну орієнтації);
- гнучкість (забезпечення швидкого переналагодження для виконання інших рухів чи операцій робочим органом);
- багатопоточність (забезпечення раціонального перерозподілу навантажень та енергетичних потоків між механізмами верстатної системи).

Критеріям багатфункціональності, високої рухомості, гнучкості та багатопоточності відповідають високомобільні механізми паралельної структури, створені на основі просторових стрижневих конструкцій. При передачі енергетичних потоків паралельними шляхами вони забезпечують жорстку просторову конструкцію верстатної системи.

Технологічне обладнання, побудоване на механізмах паралельної структури, отримало назву «обладнання з паралельною кінематикою». Воно втілює нетрадиційний підхід до проектування технологічних процесів з високим рівнем інтеграції операцій, а також нові принципи проектування сучасних верстатних систем.

Верстати з паралельною кінематикою мають значно ширший спектр технологічних та функціональних можливостей порівняно з традиційними верстатами. Забезпечення виконавчого органу шістьма ступенями свободи дозволяє реалізовувати різноманітні схеми формоутворення складних

фасонних поверхонь деталей, а також виконувати інші процеси виготовлення продукції (складання, вимірювання, зварювання) на одному робочому місці. Концепція проектування таких верстатів передбачає виконання кінематичних ланок у вигляді просторових стрижневих ферм з незначною масою рухомих елементів, що уможливорює застосування надвисоких швидкостей та прискорень виконавчого органу (частота обертання шпинделя досягає $120000-150000 \text{ хв}^{-1}$; швидкість лінійних переміщень – до 100 м/хв. , а прискорень – до 30 м/с^2).

Таким чином, використання багаторухомих верстатів з паралельною кінематикою, які мають високий рівень мобільності зміни технологічних функцій, є принципово новим вирішенням для підвищення якості та продуктивності виготовлення багатомоделіної серійної машинобудівної продукції.

Зазначеним критеріям повною мірою відповідають механізми паралельної структури, основні властивості яких:

- раціональний перерозподіл рухів та енергетичних потоків шляхом їх передачі паралельними шляхами;
- використання кінематичних ланок у вигляді стрижневих просторових ферм, елементи яких працюють лише на розтягування та стискання без згинальних напружень, що підвищує жорсткість технологічної системи;
- мінімізація мас рухомих елементів обладнання, кількості з'єднань складових компонентів та їх кінематичних ланок, що обумовлює підвищення точності позиціонування виконавчих органів та поліпшення динамічних характеристик;
- геометрична симетрія компоновки, модульна побудова та розміщення приводів на нерухомій несучій системі зменшує витрати на виробництво та впровадження обладнання нового покоління.

Технологічні можливості верстатних систем визначаються їх кінематичною структурою, компонованням, конструктивним виконанням, рівнем автоматизації та технічними характеристиками.

Обладнання з паралельною кінематикою має ширший спектр технологічних можливостей порівняно з традиційними верстатами завдяки забезпеченню виконавчого органу шістьма ступенями свободи. Це дозволяє здійснювати його переміщення відносно всіх осей координатної системи та реалізовувати майже всі схеми формоутворення поверхонь деталей, а також інші процеси виготовлення продукції за одну установку деталі з усіх сторін, крім базових.

Практична реалізація різних схем формоутворення поверхонь деталей визначає ключову особливість такого обладнання – поєднання методів обробки та процесів з різним фізичним впливом: лезову, абразивну, електрофізикохімічну обробку, пластичне деформування та зварювання, а також процеси складання машин, фарбування, випробування та вимірювання. Це забезпечує значно вищий рівень інтеграції операцій порівняно з іншим технологічним обладнанням. Автоматизація операцій складання вузлів, особливо коли вони виконуються в одному місці з обробкою деталей, значно підвищує продуктивність процесу виготовлення машин і покращує їх якість через відсутність транспортних операцій, а також підвищує загальний рівень виробництва.

Таке технологічне обладнання може виконувати майже всі складальні операції, включаючи підготовчі (підготовка деталей, складальних одиниць і комплектуючих виробів до подальших операцій складання), допоміжні (змащування, маркування та інше) та складальні операції (з'єднання деталей у складальні одиниці, вузли та машини), а також обкатку, випробування та вимірювання складальних одиниць.

Концепція проектування технологічного обладнання з паралельною кінематикою передбачає конструктивне виконання кінематичних ланцюгів у вигляді просторових стрижневих ферм, які мають невелику масу рухомих

елементів. Це дозволяє досягати надвисоких швидкостей та прискорень виконавчого органу: частота обертання шпинделя може досягати 120 000 обертів на хвилину, а в окремих випадках – майже 180 000 обертів на хвилину (при шліфуванні), швидкість лінійних переміщень сягає 100 м/хв., а прискорень – 50 м/с^2 .

Подібні режими переміщень виконавчих органів значно скорочують основний час виконання операцій і підвищують продуктивність обладнання. На технологічному обладнанні з паралельною кінематикою автоматично керується перехід з прискореного переміщення на уповільнене при наближенні інструменту до заданої координатної точки. Також передбачена можливість чергування установчих та допоміжних переміщень з робочими подачами виконавчого органу, що реалізується через стандартні цикли виконання операцій.

Отже, технологічне обладнання з паралельною кінематикою має значно ширші технологічні можливості порівняно з традиційними верстатними системами завдяки впровадженню нових концепцій:

- використання багатофункціональних і багатопоточних стрижневих механізмів паралельної структури, що дозволяють одному механізму виконувати транспортні, установчі та технологічні операції;
- застосування вбудованих високомоментних приводів і швидкодіючої обчислювальної техніки для управління технологічними переміщеннями виконавчого органу механізму та компенсації пружних переміщень під дією сил різання, що забезпечує стійку роботу технологічної машини при нестабільному положенні механізмів;
- використання вбудованих систем контролю, що дозволяють створювати технологічні системи з елементами штучного інтелекту, які автоматизують операції, що зазвичай виконуються вручну (наприклад, обробка та виготовлення художніх виробів, фінішна обробка турбінних лопатей, граверні роботи та інше).

Крім того, нова концепція розвитку технологічного обладнання передбачає впровадження сучасних технологічних процесів обробки великогабаритних деталей.

1.2. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою

Сучасні верстати, засновані на механізмах паралельної кінематики, не є модифікацією чи удосконаленням існуючого металообробного устаткування, а являють собою нетрадиційний підхід до проектування новітнього технологічного обладнання.

З початку 1990-х років у провідних країнах світу розпочалися розробки технологічного обладнання з паралельною кінематикою. Протягом двох десятиліть було створено численні зразки такого устаткування з використанням механізмів паралельної структури, зокрема роботизовані обробні центри, вимірювальні системи, пристрої для позиціонування, маніпулювання та орієнтації.

Більшість методів формоутворення фасонних поверхонь потребують трьох, чотирьох або п'яти ступенів рухливості. Тому необхідно розробляти технологічне обладнання з паралельною кінематикою, яке забезпечує аналогічну кількість координатних переміщень робочого органу, використовуючи три-, чотири- та п'ятикоординатні механізми паралельної структури.

У 1987 році професор Раймонд Клавель з Лабораторії паралельної робототехніки Університету Лозани (Швейцарія) запатентував оригінальну конструкцію механізму паралельної структури під назвою «Дельта». Основна ідея полягала у застосуванні кінематичного ланцюга у формі паралелограмного механізму.

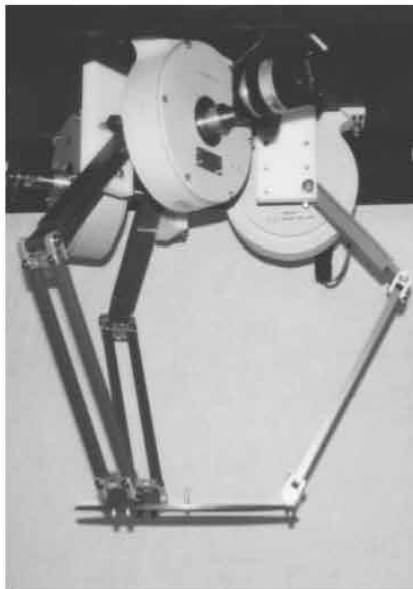
В таких механізмах приводи, що забезпечують переміщення кінематичних ланок, розміщені на нерухомій опорній системі. Це значно

зменшує рухомі маси механізму та дозволяє досягати прискорень до 50g (в експериментальних моделях) та 10-12g (у промислових технологічних системах).

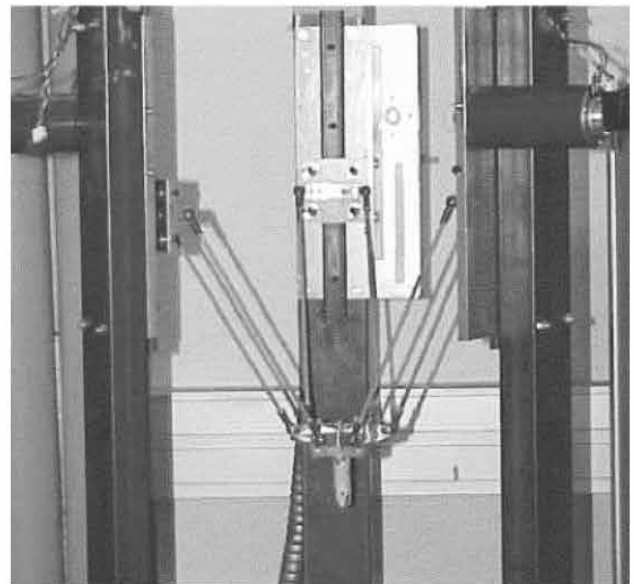
Паралелограмні кінематичні ланки механізму забезпечують точне просторове орієнтування робочого органу. Технологічне обладнання на основі таких механізмів має найпростішу форму робочого простору – циліндр.

Ці властивості механізмів «Дельта» зумовили їх активний розвиток протягом останніх двох десятиліть. Розробкою та дослідженням подібних механізмів займаються не лише виробничі компанії, а й наукові лабораторії університетів Мічигану, Мериленду, Генуї, Цюриха, Австрії, Токіо, Лозани та багатьох інших, які запропонували понад 30 різних конструктивних варіантів механізмів паралельної структури типу «Дельта».

Аналіз існуючих механізмів «Дельта» показує, що всі вони поділяються на дві групи: ті, що мають обертальні приводи (рис. 1.1, а), і ті, що мають лінійні приводи (рис. 1.1, б).



а



б

Рис. 1.1. Механізми «Дельта» з обертальним (а) та поступальним (б) приводами

Механізми паралельної структури типу «Дельта» з обертальними приводами (рис. 1.1, а) складаються з нерухокої основи, на якій встановлені відповідні приводи, рухомого робочого органу та кінематичних ланок у формі паралелограмів, що їх з'єднують. При одночасній роботі приводів кожний шарнірний вузол та пов'язаний з ним паралелограмний механізм змінюють своє кутове положення, що зумовлює переміщення робочого органу в просторі.

Механізми «Дельта» з лінійними приводами (рис. 1.1, б) мають складнішу конструкцію порівняно з обертальними, через використання напрямних, розташованих у різних просторових положеннях. Рух робочого органу здійснюється при переміщенні шарнірних вузлів вздовж цих напрямних.

Різне розташування напрямних у просторі (рис. 1.2) визначається технологічними завданнями та бажаною формою й розмірами робочого простору.

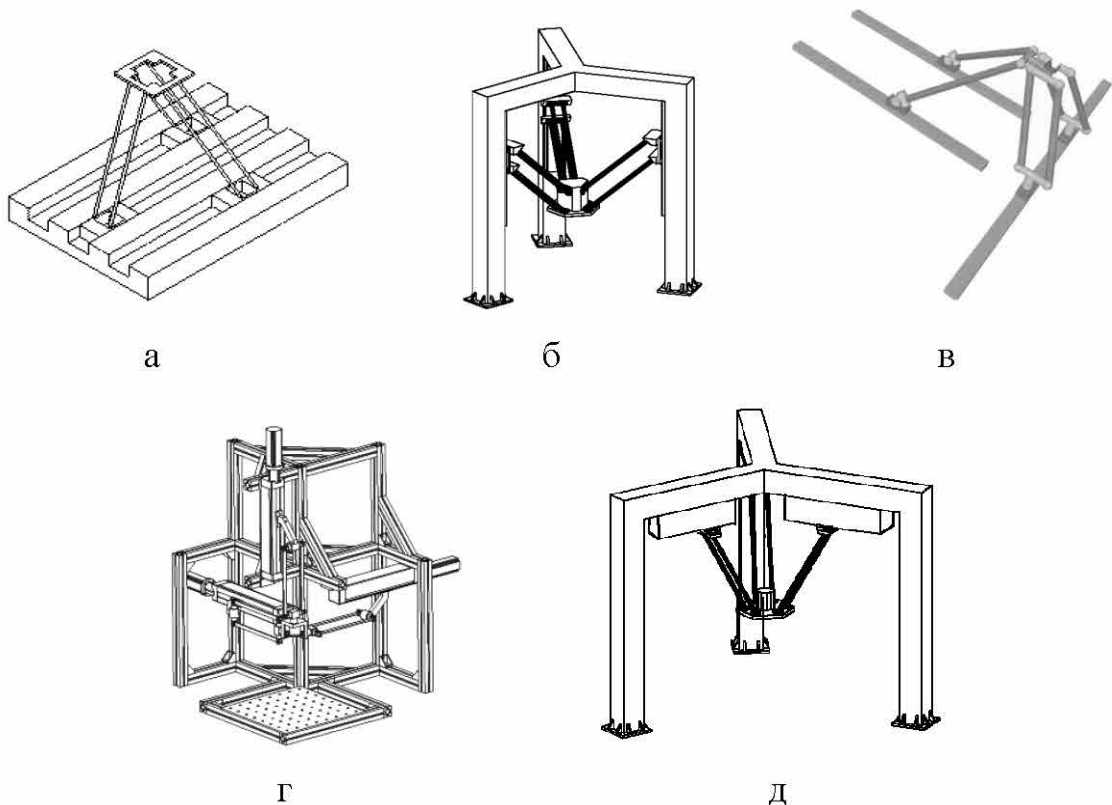


Рис. 1.2. Напрямні прямі паралельні горизонтальні (а) і вертикальні (б), перпендикулярні (в), ортогональні (г), зіркоподібні (ж)

Науковці Університету Монпельє (Франція) запропонували оригінальну конструкцію чотирикоординатного механізму паралельної структури (рис. 1.3, а). Цей механізм складається з двох двокоординатних механізмів, з'єднаних шарнірно (рис. 1.3, б, в).

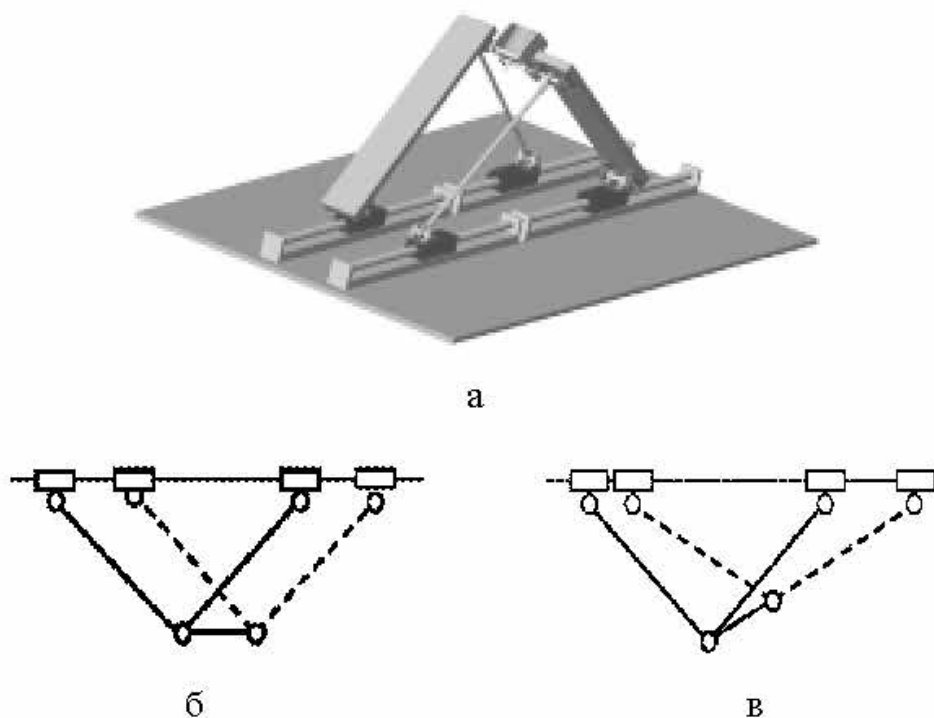


Рис. 1.3. Чотирьохкоординатний механізм паралельної структури (а) і його структурна схема в двох положеннях (б, в)

При одночасній роботі чотирьох приводів робочий орган здійснює три координатні переміщення: два поступальні вздовж осей X та Y , а також одне обертальне навколо осі Z .

1.3. Аналіз схем обладнання з паралельною кінематикою

На рис. 1.4 зображено верстат моделі URANE SX від компанії RENAULT AUTOMATION (Франція). Його характеристики швидкостей координатних переміщень та прискорень перевершують всі відомі на той час,

особливо щодо прискорень. Цей три координатний верстат з рухомою шпинделлю має швидкість переміщення робочого органу 100 м/хв та досягає прискорення 35 м/с² (можливо до 50 м/с²). Робочий простір верстата має розміри 500x500x200 мм.



Рис. 1.4. Верстат мод. URANE SX фірми
RENAULT AUTOMATION (Франція)

Аналіз показує, що близько половини часу роботи більшості технологічного обладнання припадає на різання, а інша половина – на допоміжні операції. Компанія RENAULT AUTOMATION вдосконалює це співвідношення на користь часу різання трьома шляхами:

- зменшення допоміжного часу без обмеження часу на заміну інструментів. Це можливо, оскільки обладнання з паралельною кінематикою типу «Дельта» спеціалізується на операціях, як-от свердління, обточування торців, нарізання різьби та розточування, які можуть виконуватися одним або кількома інструментами. Для цих операцій швидкість різання є найбільш обмежувальним фактором;

- покращення динамічних характеристик завдяки використанню механізмів паралельної структури, які мінімізують рухомі маси та забезпечують високу жорсткість конструкції;

- підвищення швидкості різання за рахунок використання електрошпинделів потужністю 15 кВт та частотою обертання 40 000 об/хв.

Моделювання обробки 16 невеликих отворів у картері коробки передач на верстаті моделі URANE SX показало, що на це витрачається 5.8 секунд, що менше, ніж при використанні багатошпиндельної головки.

Горизонтальний багатоцільовий верстат моделі QUICKSTEP HS 500 від компанії KRAUSECO&MAUSER (Австрія) (рис. 1.5) містить шість штанг однакової постійної довжини, попарно з'єднаних шарнірами між собою та зі шпиндельним вузлом. Робочі та установчі переміщення робочого органу здійснюються за допомогою трьох кульково-гвинтових пар зі швидкістю 80 м/хв та прискореннями понад 20 м/с².

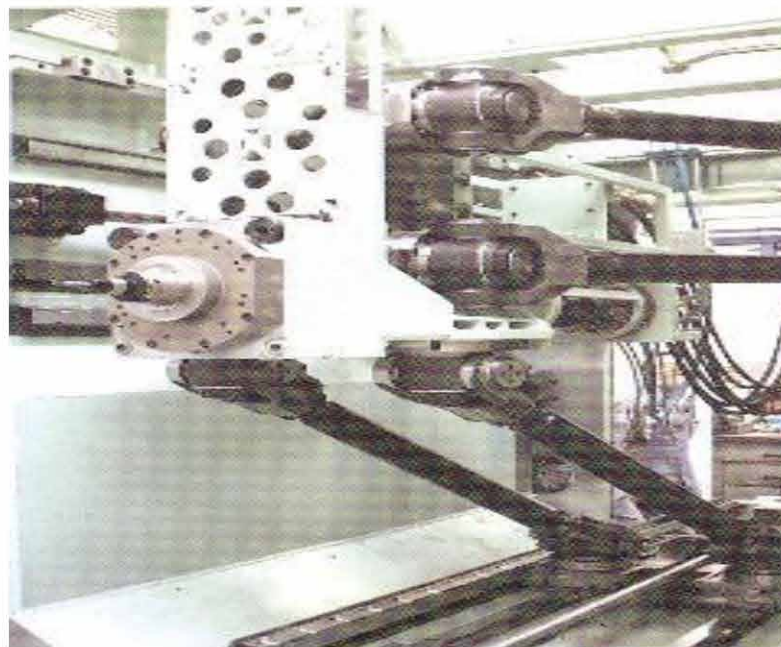


Рис. 1.5. Верстат мод. QUICKSTEP HS 500 фірми KRAUSECO&MAUSER (Австрія)

Цей верстат може здійснювати обробку складних крупних деталей (наприклад, корпуси компресорів, картери коробок передач), які можна розмістити в межах робочого простору 630x630x500 мм. В дисковому інструментальному магазині можна розмістити 12 інструментів. Обертання шпинделя з частотою 15000 об/хв забезпечує привод головного руху потужністю 45 кВт.

У 1998 році компанія REICHENBACHER (Німеччина) розпочала проектування нового технологічного обладнання для деревообробної галузі. У 2000 році вона представила свою розробку – верстат з паралельною кінематикою моделі PEGASUS (рис. 1.6), сконструйований за схемою «Дельта» з використанням лінійних двигунів.



Рис. 1.6. Верстат для деревообробки мод. PEGASUS
фірми REICHENBACHER (Німеччина)

Несуча система верстата вагою 26 т виготовлена з матеріалу з високими демпфувальними властивостями та стійкістю до високих температур. Шість штанг постійної довжини виконані з вуглецевого волокна, армованого пластмасою (CFK).

Теплове розширення матеріалу CFK приблизно в 60 разів менше, ніж у сталі, при такій самій жорсткості. Ці особливості забезпечують високі механічні та динамічні характеристики. Швидкість переміщення робочого органу досягає 120 м/хв, а прискорення – 10 м/с^2 . Частота обертання шпинделя становить 40000 об/хв. Розміри робочого простору $5000 \times 1400 \times 200$ мм і можуть бути незначно збільшені, а можливість збільшення довжини робочого простору необмежена.

Таким самим чином вирішується задача збільшення довжини робочого простору у верстатах моделей HEXAGLIDE (ETH, Німеччина) та TRIAGLIDE і LINAPOD (ISW, Німеччина) (рис. 1.7-1.10).

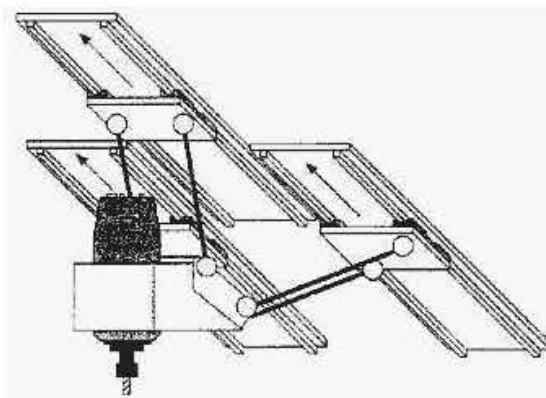
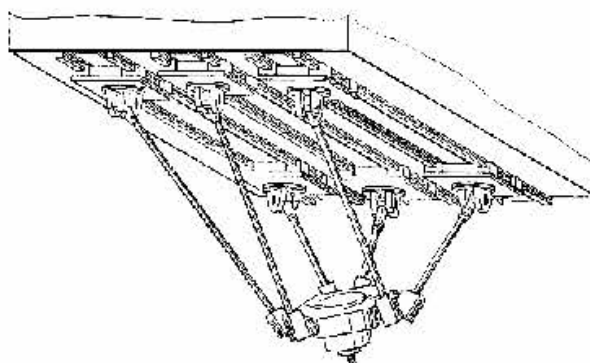


Рис. 1.7. Верстат мод. TRIAGLIDE фірми ISW (Німеччина)



а



б

Рис. 1.8. Верстат мод. HEXAGLIDE фірми ETH (Німеччина):

а – зовнішній вигляд, б – схема верстата

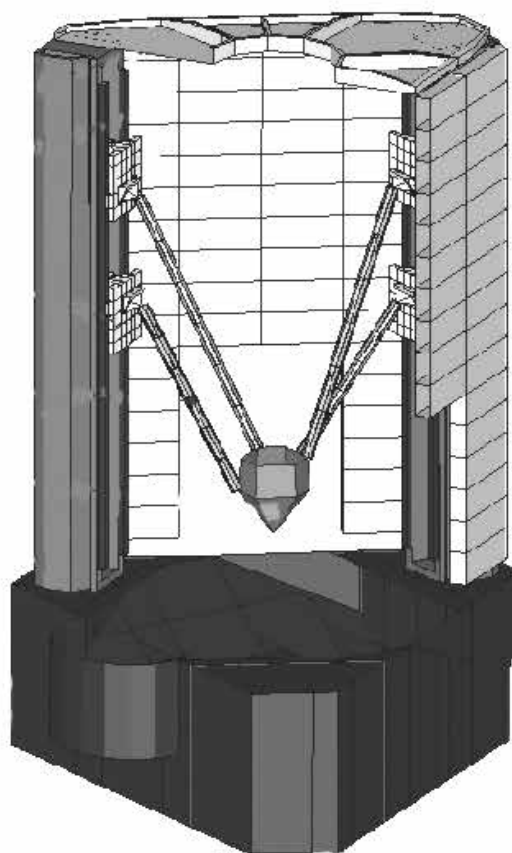


Рис. 1.9. Верстат мод. LINAPOD фірми ISW (Німеччина)

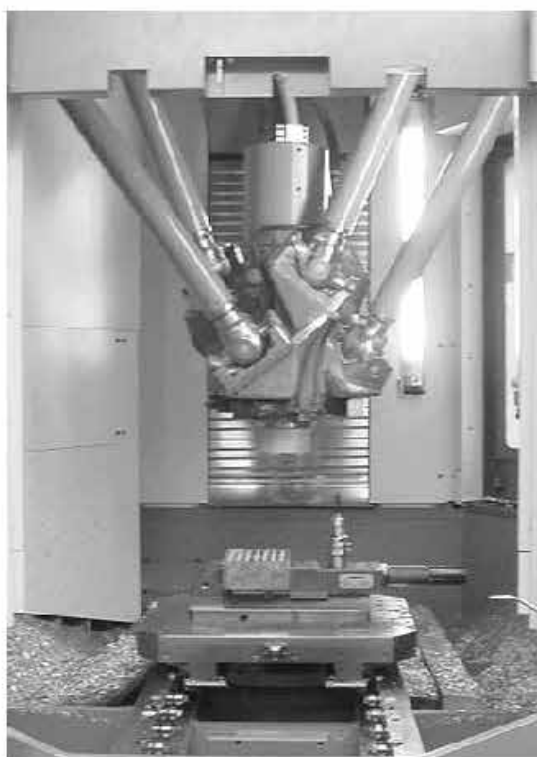


Рис. 1.10. Виконавчий орган верстата мод. LINAPOD

Трикоординатна фрезерна головка моделі SPRINT Z3 від компанії DS TECHNOLOGIE (Німеччина) (рис. 1.11) побудована за принципом трипода, що забезпечує можливість обробки складних поверхонь. Вбудований мотор-шпиндель може переміщатися в просторовому конусі з кутом 80° за допомогою трьох штанг сталої довжини.

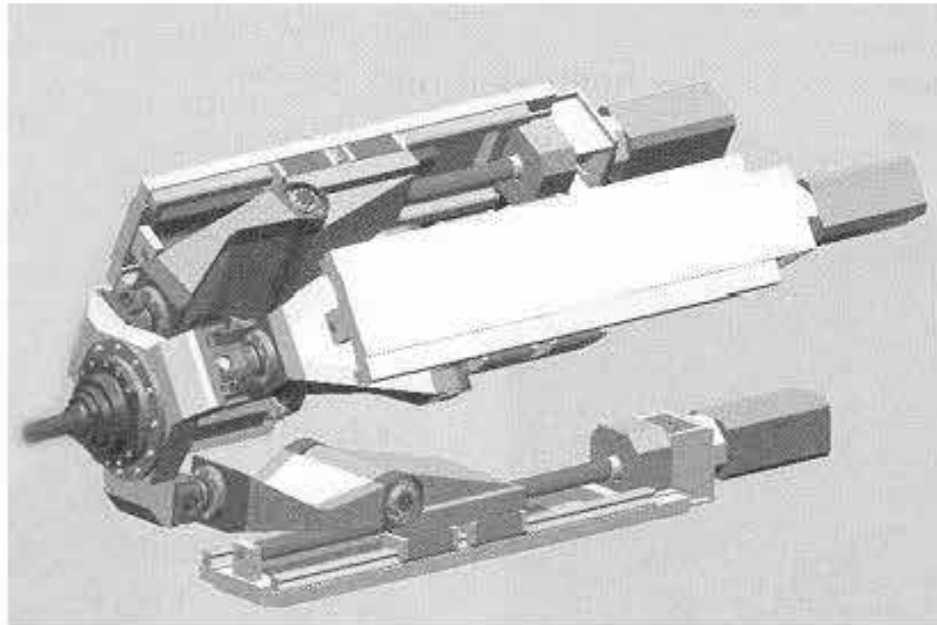
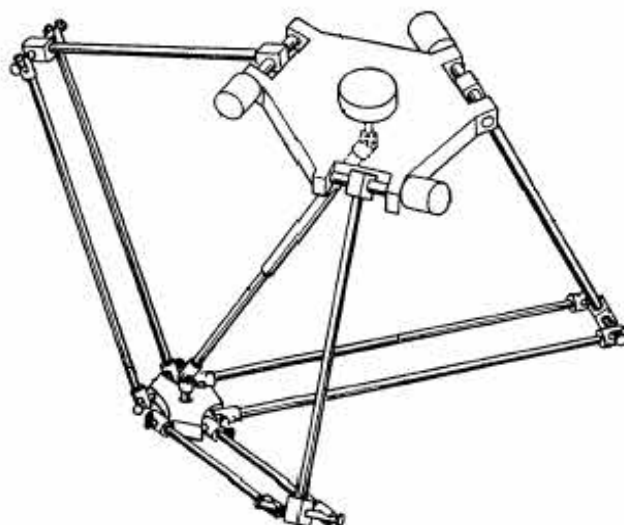


Рис. 1.11. Фрезерна головка мод. SPRINT Z3 фірми DS TECHNOLOGIE (Німеччина)

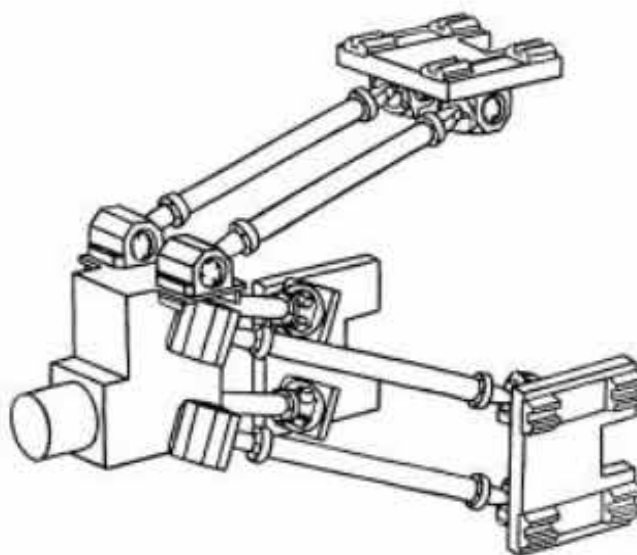
У циліндричному базовому корпусі головки розміщені три лінійні напрямні під кутом 120° , вздовж яких переміщуються три рухомі штанги, шарнірно з'єднані з мотор-шпинделем. Переміщення штанг забезпечується кульково-гвинтовими передачами та лінійними приводами. Максимальна швидкість переміщення робочого органу становить 50 м/хв . Частота обертання шпинделя до 24000 об/хв забезпечується приводом потужністю 72 кВт . Переміщення шпинделя вздовж осі Z у горизонтальному положенні складає 670 мм , а при встановленні під кутом 40° додатково збільшується на 350 мм .

1.4 Конструкції технологічного обладнання типу «Дельта»

Компоновки технологічного обладнання з паралельною кінематикою типу «Дельта» з'явилися на початку 1980-х років, коли професор Реймон Клавель (Федеральна політехнічна школа Лозанни) використав паралелограмні конструкції для створення механізму паралельної структури (рис. 1.12).



а



б

Рис. 1.12. Компоновка механізму паралельної структури типу «Дельта» з обертальним (а) і лінійним (б) приводом

Характерною особливістю механізму «дельта» є застосування паралелограмних конструкцій з двома попарно-паралельними шарнірно-з'єднаними штангами постійної довжини. Один кінець штанг з'єднаний з рухомою платформою (робочим органом), а інший – з приводом. Три такі паралелограмні кінематичні ланки забезпечують робочому органу три ступені свободи, високу точність позиціонування та жорсткість конструкції. Як приводи використовуються обертальні пристрої (рис. 1.12, а) та лінійні двигуни (рис. 1.12, б). Ще одна кінематична ланка передає рух від двигуна на нерухомій несучій системі до робочого органу на рухомій платформі. Це дозволяє зменшити рухомі маси кінематичних ланок та досягти швидкості руху робочого органу до 10 м/с та прискорень до 50 м/с².

Технологічне обладнання та роботизовані системи з паралельною кінематикою типу «Дельта» з обертальним приводом (рис. 1.13, 1.14) широко використовуються в харчовій, фармацевтичній промисловості та приладобудуванні.



Рис. 1.13. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою типу «Дельта» для складальних робіт (а) та свердління (б) фірми HITACHI SEIKI (Японія)



Рис. 1.14. Робот типу «Дельта» мод. IRB 340 FLEXPICKER фірми ABB
FLEXIBLE AUTOMATION (Швеція)

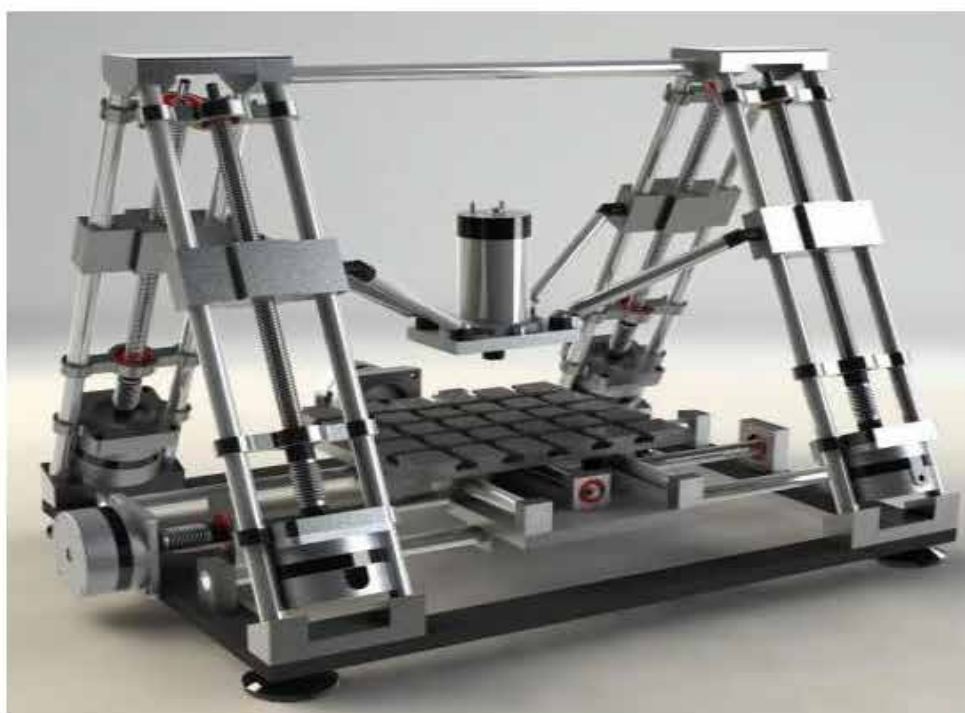


Рис 1.15 Настільний фрезерний верстат каркасного компонування з
паралельною кінематикою мод. НФС-ПК1

Верстат складається з верхньої та нижньої основ, жорстко з'єднаних між собою за допомогою механізмів поступального руху однакової довжини з опорами. Він також містить штанги постійної довжини, одні кінці яких шарнірно з'єднані з повзунами механізмів поступального руху, а інші – з платформою, на якій розміщений інструментальний робочий орган з приводом обертання інструменту.

Опори осей механізмів поступального руху утворюють на нижній основі прямокутник, а бічні грані разом з нижньою основою формують два рівнобедрені трикутники. Верхні вершини трикутників мають по одній точці перетину на протилежних кінцях верхньої основи, утворюючи разом з нею два прямокутники або дві рівнобічні трапеції з площинами, які мають спільну лінію перетину. Це перетворює верхню основу на балку-траверсу, що спирається на два трикутні опори.

Завдяки загальній верхній опорі у вигляді балки-траверси розміри верхньої основи можуть бути невеликими, що знижує металоємність конструкції при підвищенні її жорсткості.

Механізми паралельної структури типу «Дельта» широко поширені в наш час і використовуються в багатьох галузях.

РОЗДІЛ 2

ПРОСТОРОВІ ФУНКЦІОНАЛЬНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ВЕРСТАТІВ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ ТИПУ ДЕЛЬТА

2.1. Просторові функціональні залежності верстатів з лінійним приводом

Для керування верстатом необхідно знайти залежність між положенням робочого органу і узагальненими координатами. Тобто, необхідно вирішити зворотну задачу кінематики. Для верстата «Дельта» з лінійними приводами (рис. 2.1) результатом вирішення зворотної задачі кінематики є залежності, які дозволяють визначити положення повзунів на напрямних при заданому положенні виконавчого органу.

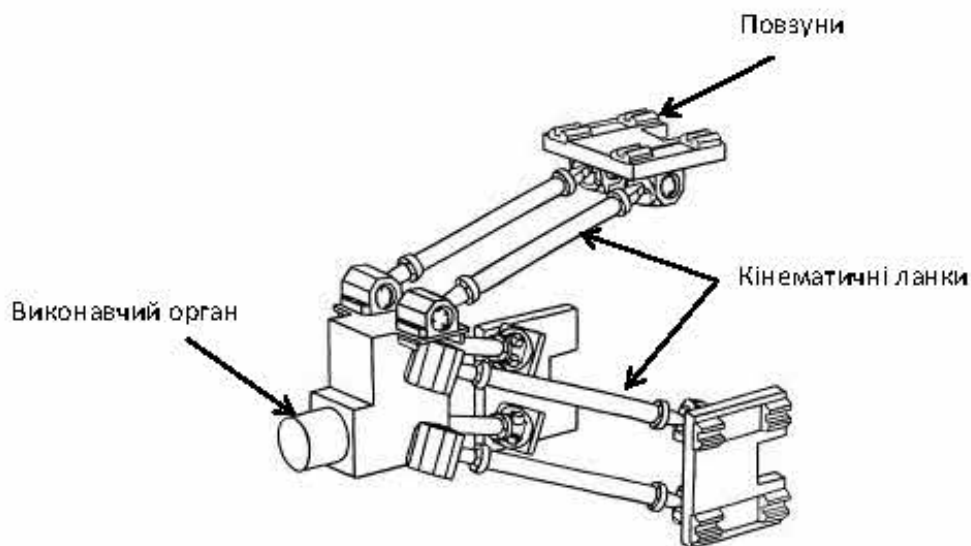


Рис. 2.1. Верстат «Дельта» з лінійними приводами

Введемо позначення (рис. 2.2). Нерухому систему координат (пов'язану зі станиною і напрямними) позначимо (X, Y, Z) . Напрямні позначимо літерами (початок напрямної і кінець): AB , EF , GH . Кінематичні ланки, які одним кінцем пов'язані з виконавчим органом, а іншим – з повзунами: CD , LK , JI .

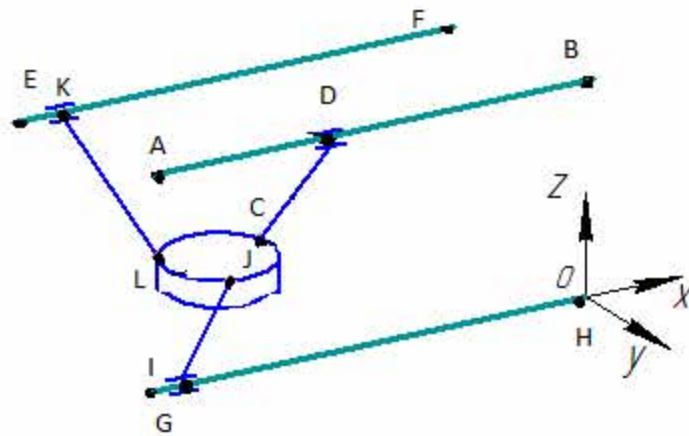


Рис. 2.2. Схема механізму паралельної структури типу дельта

Шарніри виконавчого органу C, L, J . Шарніри D, K, I – пов’язані з повзунами напрямних.

Розглянемо напрямну і кінематичну ланку окремо від інших ланок (рис. 2.3).

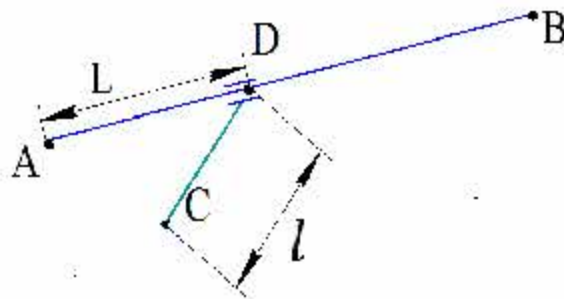


Рис 2.3 Розрахункова схема

На цій схемі позначено: AB – напрямна; DC – кінематична ланка (штанга) постійної довжини ($l_{DC} = \text{const}$); C – шарнір штанги (задана точка на рухомій платформі, для якої вирішується зворотна задача); D – шарнір штанги (точка, координати якої необхідно визначити).

Точка D є точкою перетину прямої AB та кола з центром в точці C та радіусом DC .

Рівняння прямої, яка проходить через точки A та B має вигляд:

$$\frac{X - X_B}{X_A - X_B} = \frac{Y - Y_B}{Y_A - Y_B} = \frac{Z - Z_B}{Z_A - Z_B}$$

де:

$(X_A, Y_A, Z_A), (X_B, Y_B, Z_B)$ – координати точок, через які проходить пряма АВ.

(X, Y, Z) – координати точки D, яка знаходиться на прямій АВ.

Рівняння кола визначається формулою

$$(X - X_C)^2 + (Y - Y_C)^2 + (Z - Z_C)^2 = l^2$$

Записавши рівняння прямої і кола у вигляді системи, можна визначити координати точки D:

$$\begin{cases} \frac{X - X_B}{X_A - X_B} = \frac{Y - Y_B}{Y_A - Y_B} \\ \frac{X - X_B}{X_A - X_B} = \frac{Z - Z_B}{Z_A - Z_B} \\ (X - X_C)^2 + (Y - Y_C)^2 + (Z - Z_C)^2 = l^2 \end{cases}$$

Визначимо Y та Z як функцію від X:

$$Y = f(X)$$

Для цього виконаємо перетворення

$$(X - X_B)(Y_A - Y_B) = (X_A - X_B)(Y - Y_B)$$

$$X_{YA} - X_B Y_B - X_{YB} + X_B Y_B = X_{AY} - X_A Y_B - X_{BY} + X_B Y_B$$

$$X_{AY} - X_A Y_B - Y_{XB} + X_B Y_B = X_{YA} - X_B A - X_{YB} + X_B Y_B$$

$$X_{AY} - X_{BY} = X_{YA} - X_B Y_A - X_{YB} + X_B Y_B + X_A Y_B - X_B Y_B$$

$$Y(X_A - X_B) = X(Y_A - Y_B) - X_B Y_A + X_A Y_B$$

Таким чином,

$$Y = X \frac{Y_A - Y_B}{X_A - X_B} \left(\frac{X_A Y_B}{X_A - X_B} - \frac{X_B Y_A}{X_A - X_B} \right)$$

$$Y = X \frac{Y_A - Y_B}{X_A - X_B} + \frac{X_A Y_B - X_B Y_A}{X_A - X_B}$$

Або

$$Y = XK + K_1$$

де:

$$K = \frac{Y_A - Y_B}{X_A - X_B}$$

$$K_1 = \frac{X_A Y_B - X_B Y_A}{X_A - X_B}$$

Аналогічно визначаємо $Z = f(X)$:

$$\frac{X - X_B}{X_A - X_B} = \frac{Z - Z_B}{Z_A - Z_B}$$

$$Z = X \frac{Z_A - Z_B}{X_A - X_B} \left(\frac{X_A Z_B}{X_A - X_B} - \frac{X_B Z_A}{X_A - X_B} \right)$$

$$Z = X \frac{Z_A - Z_B}{X_A - X_B} + \frac{X_A Z_B - X_B Z_A}{X_A - X_B}$$

або

$$Z = XM + M_1$$

де:

$$M = \frac{Z_A - Z_B}{X_A - X_B} \qquad M_1 = \frac{X_A Z_B - X_B Z_A}{X_A - X_B}$$

Підставивши отримані значення в рівняння кола, отримаємо

$$(X - X_C)^2 + (XK + N)^2 + (XM + P)^2 = l^2$$

$$(X - X_C)^2 + (XK + K_1 - Y_C)^2 + (XM + M_1 - Z_C)^2 = l^2$$

Введемо позначення:

$$N = K_1 - Y_C$$

$$P = M_1 - Z_C$$

Перетворимо рівняння, розкривши дужки

$$X^2 - 2XX_C + X_C^2 + X^2K^2 + 2XKN + N^2 + X^2M^2 + 2XMP + P^2 = l^2$$

$$(X_C^2 + X^2K^2 + X^2M^2)(-2XX_C + 2XKN + 2XMP) + X_C^2 + N^2 + P^2 - l^2 = 0$$

$$X^2(1 + K^2 + M^2) + X(2KN - 2X_C + 2MP) + X_C^2 + N^2 + P^2 - l^2 = 0$$

В результаті виконаних перетворень отримуємо рівняння

$$ax^2 + bx + c = 0$$

де:

$$a = 1 + K^2 + M^2$$

$$b = 2(KN - X_c + MP)$$

$$c = X_c^2 + N^2 + P^2 - l^2$$

Визначимо корні даного квадратного рівняння, які дорівнюють

$$X = \frac{-b + \sqrt{D}}{2a}$$

$$X' = \frac{-b - \sqrt{D}}{2a}$$

де:

$$D = b^2 - 4ac$$

Якщо напрямні паралельні одній з осей координат, рівняння прямої спрощується.

При $Z_A = Z_B = Z$ рівняння прямої має вигляд

$$\frac{X - X_B}{X_A - X_B} = \frac{Y - Y_B}{Y_A - Y_B}$$

При $Y_A = Y_B = Y$ рівняння прямої має вигляд

$$\frac{X - X_B}{X_A - X_B} = \frac{Z - Z_B}{Z_A - Z_B}$$

При $X_A = X_B = X$ рівняння прямої має вигляд

$$\frac{Y - Y_B}{Y_A - Y_B} = \frac{Z - Z_B}{Z_A - Z_B}$$

Визначаємо довжину переміщення повзуна вздовж напрямної від початкової точки:

$$L = \sqrt{(X - X')^2 + (Y - Y')^2 + (Z - Z')^2}$$

Для інших ланок розрахунки виконуються аналогічно.

2.2. Просторові функціональні залежності верстатів з обертальним приводом кінематичних ланок

Зворотна задача кінематики для верстатів «Дельта» (рис. 2.4) з обертальним приводом визначає зв'язок між положенням робочого органу і кутами повороту шарнірів кінематичних ланок.

Для переміщення виконавчого органу 5, необхідно за допомогою двигуна 9 повернути кінематичні ланки 7. При цьому паралелограмні механізми 3, шарнірно пов'язані з кінематичними ланками 7 діють на виконавчий орган 5, змінюючи його положення. Отже, для переміщення інструменту на задану величину необхідно лінійні параметри його переміщення перевести в кутові параметри повороту двигунів.

Таким чином, задача зводиться до знаходження кута повороту γ шарніра a , при заданих координатах точки M .

З розрахункової схеми (рис. 2.5) видно, що:

$$\alpha + \beta + \gamma = 180,$$

звідси $\gamma = 180 - (\alpha + \beta)$.

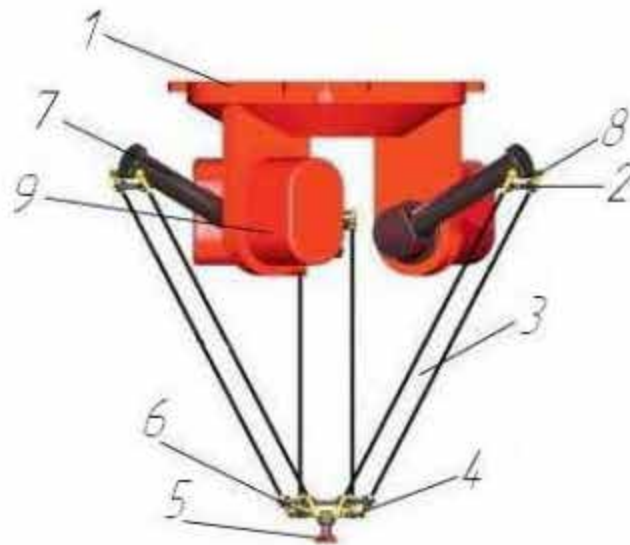


Рис. 2.4. Схема верстата з примусовим обертальним рухом опорного шарніру: 1 – нерухома платформа; 2 – пружина; 3 – паралелограм; 4 – кульовий шарнір; 5 – робочий орган; 6 – рухома платформа; 7 – штанга; 8 – кульовий шарнір; 9 – двигун

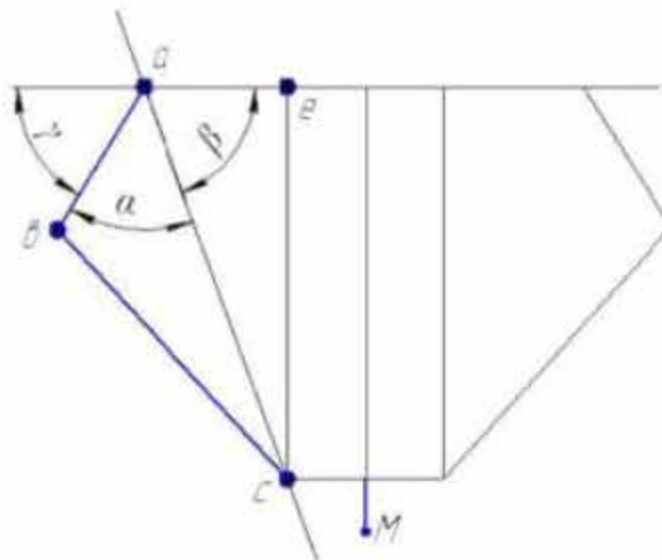


Рис. 2.5. Розрахункова схема

a – точка, в якій вал двигуна з'єднаний з кінематичною ланкою; b – шарнір;
c – шарнір, який з'єднаний з рухомою платформою; M – точка виконавчого органа, для якої вирішується зворотна задача

Згідно положень аналітичної геометрії можна записати:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{bc^2 + ab^2 - ac^2}{2 \cdot bc \cdot ab}\right),$$

В цій формулі величини ab та bc відомі (задані конструкцією). Величину ac можна визначити як довжину вектора Aa (рис. 2.6).

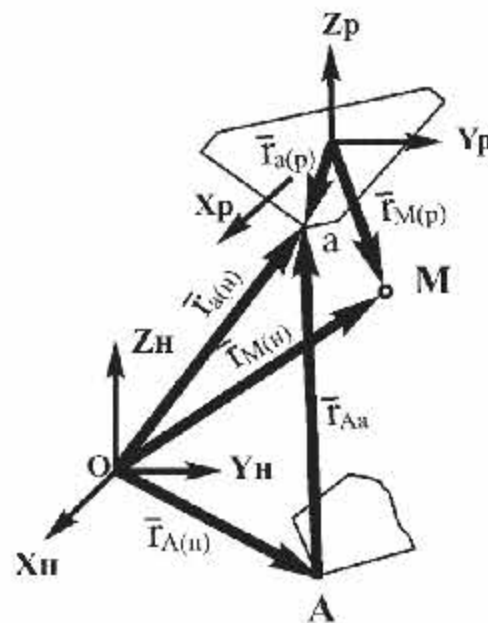


Рис. 2.6. Розрахункова схема для визначення довжини вектора Aa

Розрахуємо довжину вектора (кінематичної ланки) $\vec{r}_{Aa} = \overrightarrow{Aa}$

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

де $x_{Aa}^2, y_{Aa}^2, z_{Aa}^2$ – координати вектора $\vec{r}_{Aa}$

$$\vec{r}_{Aa} = \begin{bmatrix} x_{Aa} \\ y_{Aa} \\ z_{Aa} \end{bmatrix} = \vec{r}_{a(n)} - \vec{r}_{A(n)},$$

де $\vec{r}_{A(n)}$ – радіус-вектор, що визначає точку A несучої системи у

нерухомій системі координат

$$\bar{r}_{A(H)} = \begin{bmatrix} x_{A(H)} \\ y_{A(H)} \\ z_{A(H)} \end{bmatrix};$$

$\bar{r}_{a(H)}$ – радіус-вектор, що визначає точку a у нерухомій системі координат

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

Таким чином, можна записати

$$\bar{r}_{Aa} = M \cdot \bar{r}_{a(p)} + \bar{r}_{M(H)} - \bar{r}_{A(H)}, \quad (2.1)$$

де $\bar{r}_{M(H)}$ – радіус-вектор, що визначає задану точку M інструмента в нерухомій системі координат

$$\bar{r}_{M(H)} = \begin{bmatrix} x_{M(H)} \\ y_{M(H)} \\ z_{M(H)} \end{bmatrix};$$

M – матриця поворотів систем координат

$$M = \begin{bmatrix} \cos\phi_p^H \cdot \cos\psi_p^H & \cos\phi_p^H \cdot \sin\psi_p^H & \sin\phi_p^H \\ \cos\phi_p^H \cdot \sin\psi_p^H + & \cos\theta_p^H \cdot \cos\psi_p^H - & -\sin\theta_p^H \cdot \cos\phi_p^H \\ +\sin\theta_p^H \cdot \sin\phi_p^H \cdot \cos\psi_p^H & -\sin\theta_p^H \cdot \sin\phi_p^H \cdot \sin\psi_p^H & \\ \sin\theta_p^H \cdot \sin\psi_p^H - & \sin\theta_p^H \cdot \cos\psi_p^H - & \\ -\cos\theta_p^H \cdot \sin\phi_p^H \cdot \cos\psi_p^H & -\cos\theta_p^H \cdot \sin\phi_p^H \cdot \sin\psi_p^H & \cos\theta_p^H \cdot \cos\phi_p^H \end{bmatrix}$$

$\bar{r}_{a(p)}$ – радіус-вектор, що визначає точку a несучої системи верстата в рухомій системі координат

$$\bar{r}_{a(p)} = \begin{bmatrix} x_{a(p)} \\ y_{a(p)} \\ z_{a(p)} \end{bmatrix};$$

Підставивши координати векторів у рівняння (2.1), отримаємо

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

Звідки

$$\begin{aligned} r_{Aa} &= \begin{bmatrix} x_{Aa} \\ y_{Aa} \\ z_{Aa} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} x_{A(H)} - x_{M(H)} - \cos\phi_p^H \cdot \cos\psi_p^H \cdot (x_{a(p)} - x_{M(p)}) + \\ + \cos\phi_p^H \cdot \sin\psi_p^H \cdot (y_{a(p)} - y_{M(p)}) - \sin\phi_p^H \cdot (z_{a(p)} - z_{M(p)}) \\ y_{A(H)} - y_{M(H)} - (\cos\theta_p^H \cdot \sin\psi_p^H + \sin\theta_p^H \cdot \sin\phi_p^H \cdot \cos\psi_p^H) \cdot (x_{a(p)} - x_{M(p)}) - \\ - (\cos\theta_p^H \cdot \cos\psi_p^H - \sin\theta_p^H \cdot \sin\phi_p^H \cdot \sin\psi_p^H) \cdot (y_{a(p)} - y_{M(p)}) + \sin\theta_p^H \cdot \cos\phi_p^H \cdot (z_{a(p)} - z_{M(p)}) \\ z_{A(H)} - z_{M(H)} - (\sin\theta_p^H \cdot \sin\psi_p^H + \cos\theta_p^H \cdot \sin\phi_p^H \cdot \cos\psi_p^H) \cdot (x_{a(p)} - x_{M(p)}) - \\ - (\sin\theta_p^H \cdot \cos\psi_p^H - \cos\theta_p^H \cdot \sin\phi_p^H \cdot \sin\psi_p^H) \cdot (y_{a(p)} - y_{M(p)}) + \cos\theta_p^H \cdot \cos\phi_p^H \cdot (z_{a(p)} - z_{M(p)}) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Таким чином,

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

де:

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

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

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

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

Далі визначаємо кут β , який знаходиться між сторонами ac і ec , за формулою:

$$\beta = \arcsin \frac{ae}{ac}.$$

Тепер можемо записати формулу визначення кута γ повороту шарніру, приймаючи його як кут між прямою ab і площиною:

$$\gamma = 180 - \left[\arccos \left(\frac{bc^2 + ab^2 - ac^2}{2 \cdot bc \cdot ab} \right) + \left(\arcsin \frac{ae}{ac} \right) \right].$$

Кути повороту інших шарнірів визначаються аналогічно.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО ПРОСТОРУ ВЕРСТАТІВ ТИПУ ДЕЛЬТА

3.1. Узгодженість рухів кінематичних ланок при реалізації типових рухів виконавчого органу

Переміщення робочого органу верстата типу Дельта (рис. 3.1) відбувається при одночасному узгодженому повороті шарнірів всіх кінематичних ланок, з'єднаних з нерухомою платформою. З розрахункової схеми (рис. 3.2) видно, що при повороті кінематичної ланки АВ навколо точки А (тобто, зміні кута γ), координати точок В і С також змінюються. А, отже, змінюється і положення розрахункової точки М виконавчого органу.

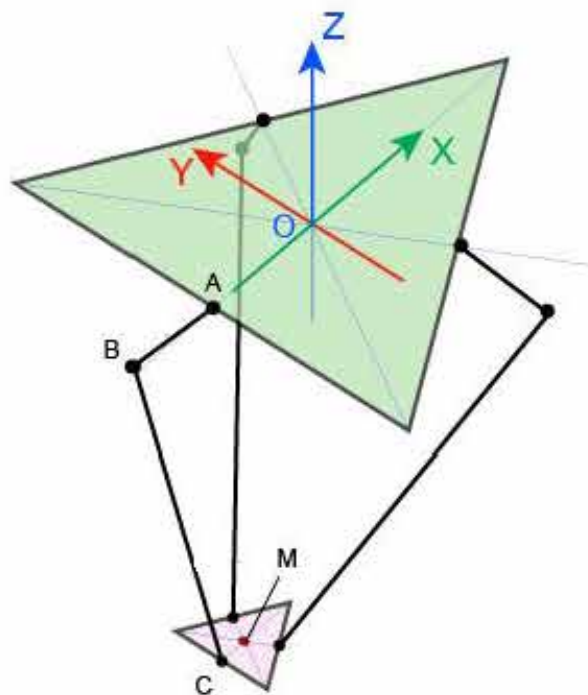


Рис. 3.1. Загальна розрахункова схема верстата типу дельта

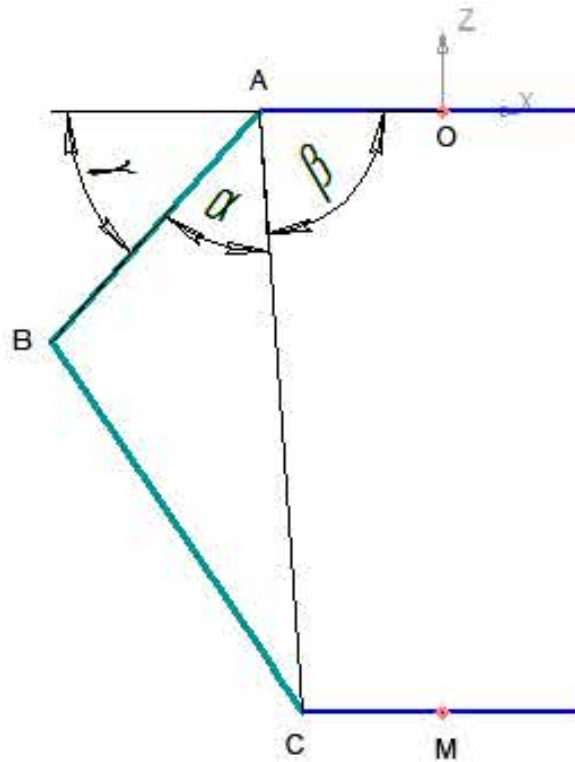


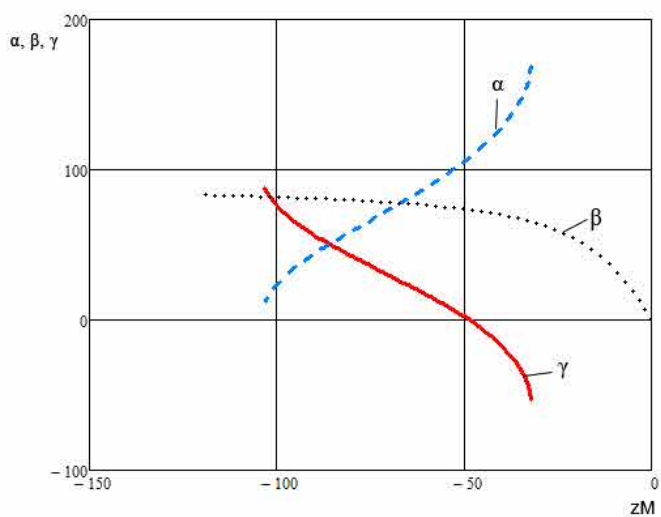
Рис. 3.2. Схема розрахунку кутів повороту

Основні геометричні параметри верстата типу «Дельта» показані на рис. 3.2:

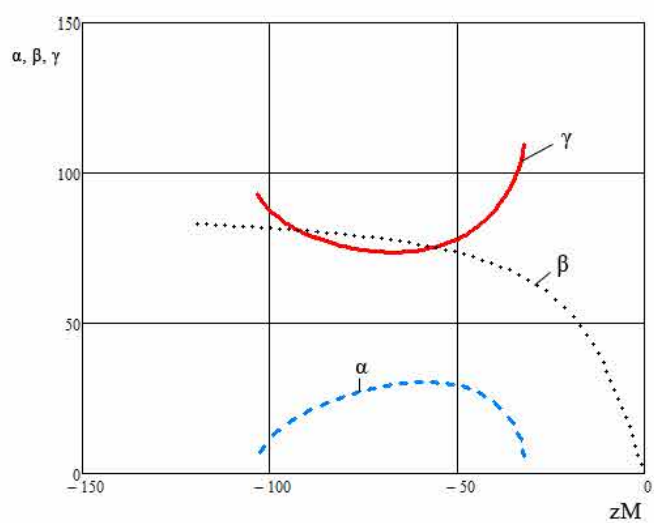
- радіус розташування шарнірів на нерухомій платформі ($R_n = OA$),
- радіус розташування шарнірів на виконавчому органі ($R_r = CM$),
- довжини кінематичних ланок, з'єднуючих нерухому платформу і виконавчий орган ($L_1 = AB$, $L_2 = BC$).

Розглянемо вплив зазначених параметрів на кут повороту кінематичних ланок та на геометричні параметри робочого простору.

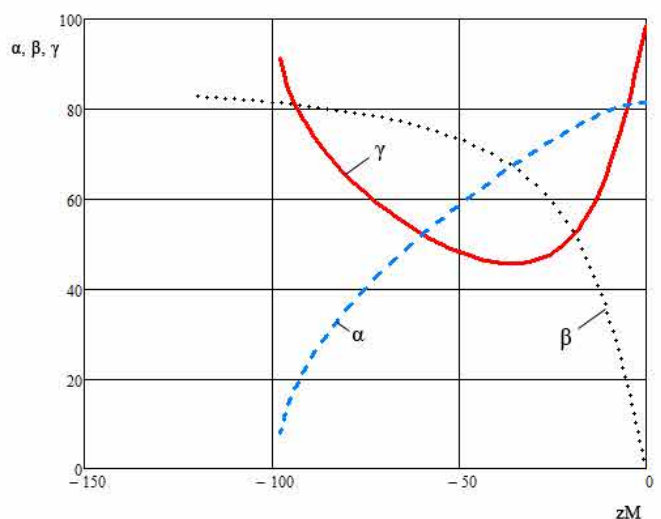
Зміна кутів α , β , γ при різних типових рухах виконавчого органу для різних значень конструктивних параметрів та показана на рис. 3.3 (переміщення вздовж осі Z), 3.4 (переміщення вздовж осі X), 3.5 (переміщення вздовж осі Y).



а

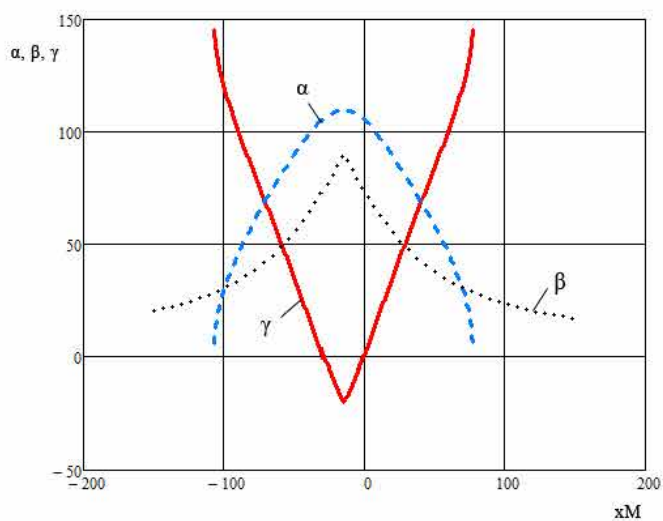


б

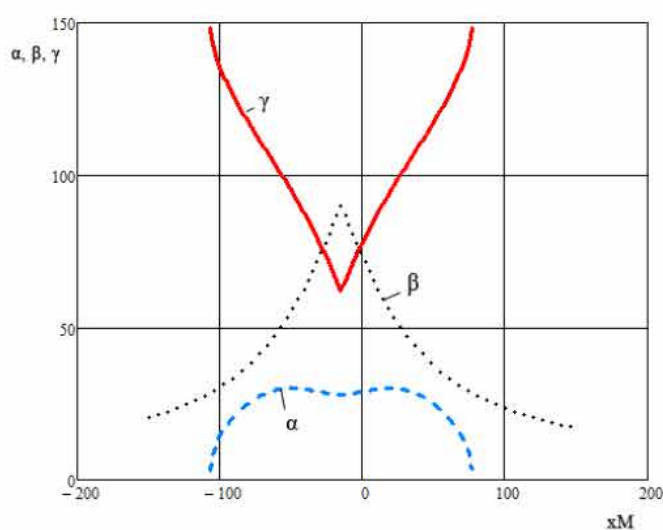


в

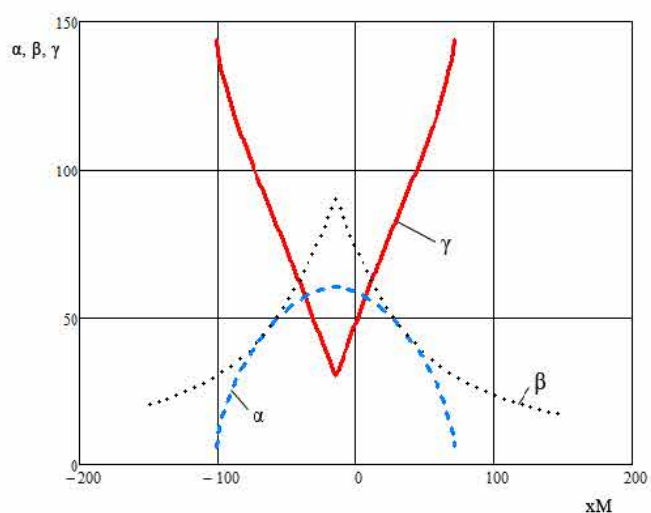
Рис. 3.3. Зміна кутів при переміщенні робочого органу вздовж осі Z в діапазоні 0..-120: а) $R_n=45$; $R_r=30$; $L_1=35$; $L_2=70$; б) $R_n=45$; $R_r=30$; $L_1=70$; $L_2=35$; в) $R_n=45$; $R_r=30$; $L_1=50$; $L_2=50$



а

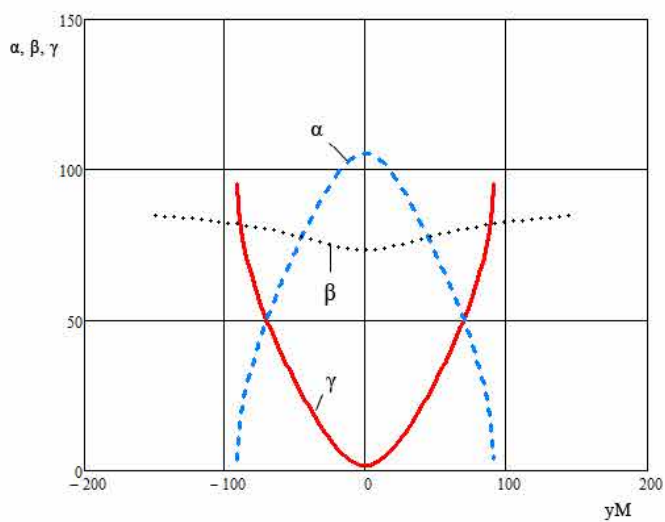


б

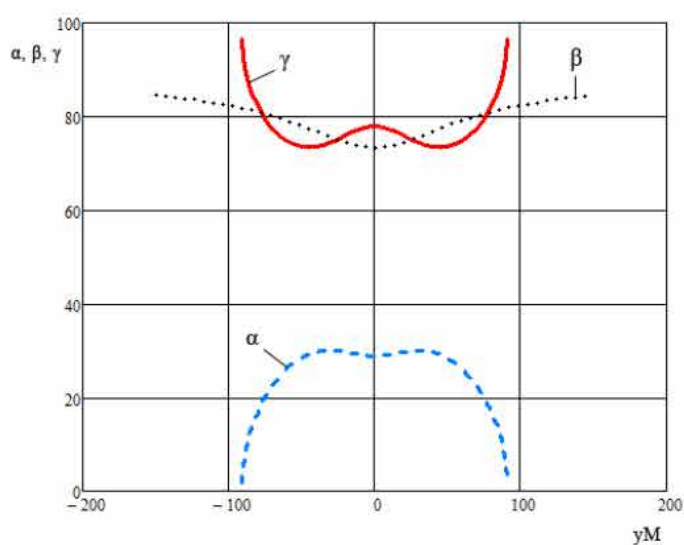


в

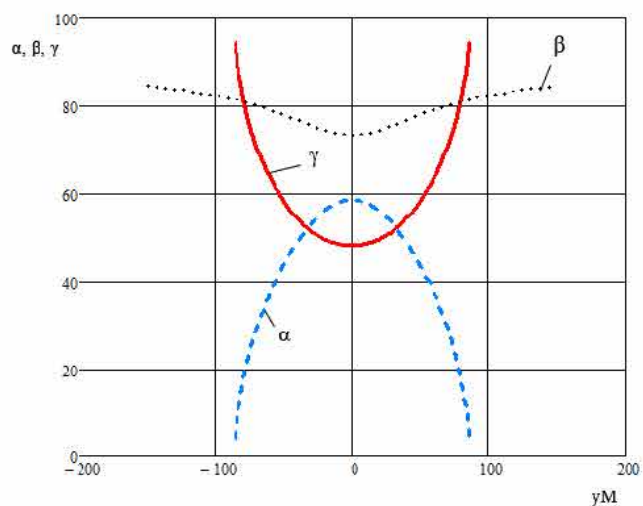
Рис. 3.4. Зміна кутів при переміщенні робочого органу вздовж осі X в діапазоні -150..-150: а) $z_M=-50$; $R_n=45$; $R_r=30$; $L_1=35$; $L_2=70$; б) $z_M=-50$; $R_n=45$; $R_r=30$; $L_1=70$; $L_2=35$; в) $z_M=-50$; $R_n=45$; $R_r=30$; $L_1=50$; $L_2=50$



а



б

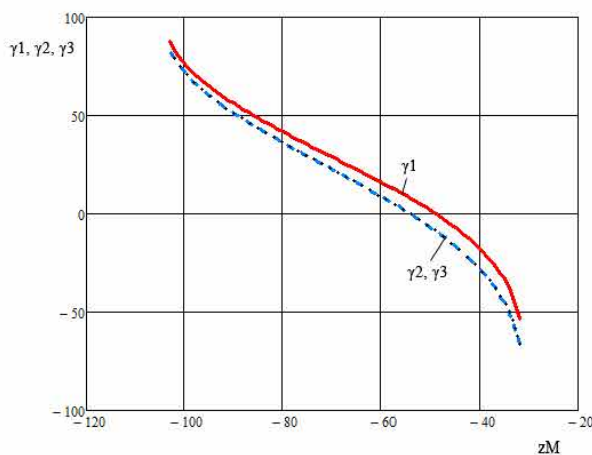


в

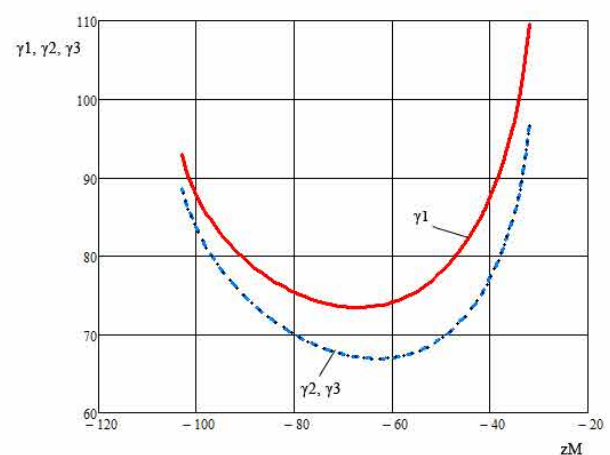
Рис. 3.5. Зміна кутів при переміщенні робочого органу вздовж осі Y в діапазоні $-150 \dots 150$: а) $z_M = -50$; $R_n = 45$; $R_r = 30$; $L_1 = 35$; $L_2 = 70$; б) $z_M = -50$; $R_n = 45$; $R_r = 30$; $L_1 = 70$; $L_2 = 35$; в) $z_M = -50$; $R_n = 45$; $R_r = 30$; $L_1 = 50$; $L_2 = 50$

З графіків видно, що при переміщенні робочого органу вздовж осі Z та Y кути α та γ змінюються майже однаково і їх графіки є дзеркальним відображенням один одного. Також присутні ділянки, в яких кут β змінюється, а кути α та γ на цих ділянках ще навіть не можна розрахувати. Таким чином, можна побачити, що ці ділянки виникають у крайніх положеннях робочого органу (на границі робочого простору) і відповідають положенням, в яких механізм стає некерованим («особливі» положення).

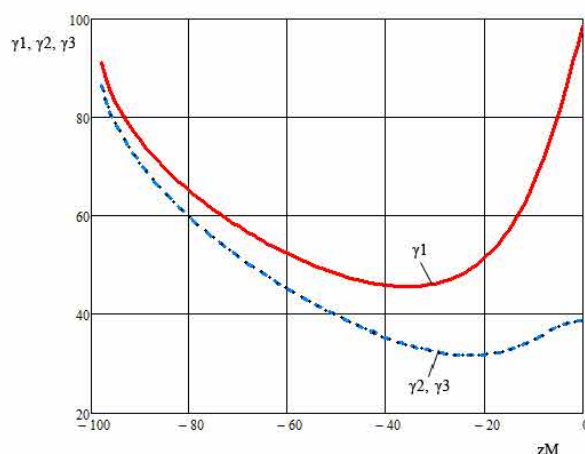
Залежність повороту (кути γ_1 , γ_2 , γ_3) всіх кінематичних ланок при типових переміщеннях робочого органу наведені на рис. 3.6-3.8 (переміщення вздовж осей Z , X , Y відповідно).



а

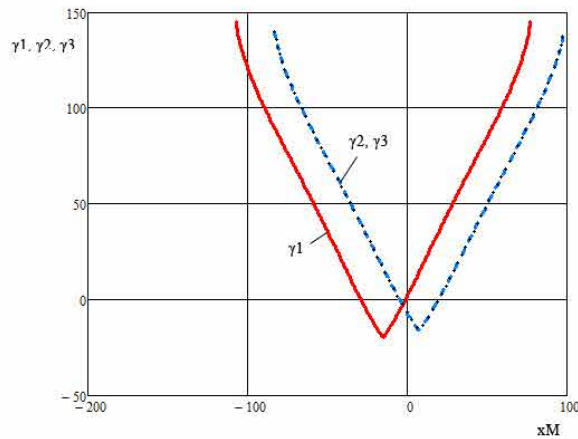


б

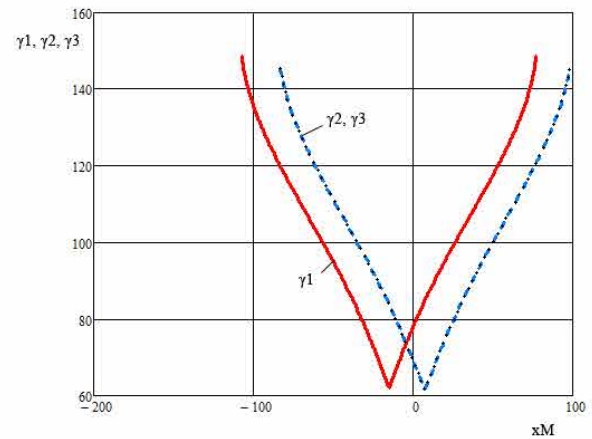


в

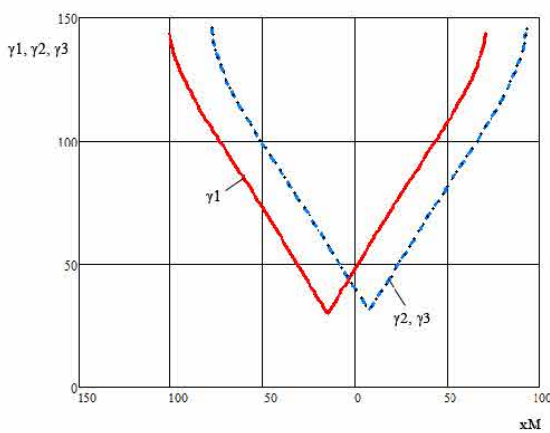
Рис. 3.6. Зміна кутів при переміщенні робочого органу вздовж осі Z в діапазоні 0..-120: а) $R_n=45$; $R_r=30$; $L_1=35$; $L_2=70$; б) $R_n=45$; $R_r=30$; $L_1=70$; $L_2=35$; в) $R_n=45$; $R_r=30$; $L_1=50$; $L_2=50$



а



б

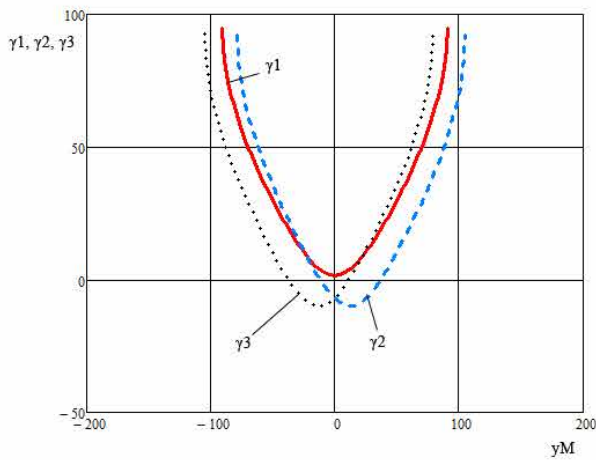


в

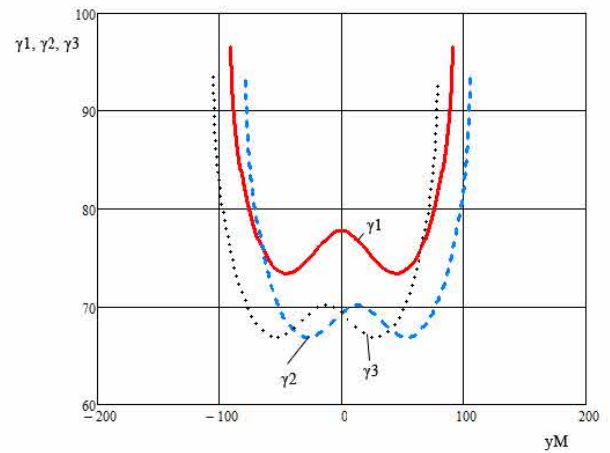
Рис. 3.7. Зміна кутів при переміщенні робочого органу вздовж осі X в діапазоні $-150..-150$: а) $z_M=-50$; $R_n=45$; $R_r=30$; $L_1=35$; $L_2=70$; б) $z_M=-50$; $R_n=45$; $R_r=30$; $L_1=70$; $L_2=35$; в) $z_M=-50$; $R_n=45$; $R_r=30$; $L_1=50$; $L_2=50$

З графіків можна зробити наступні висновки:

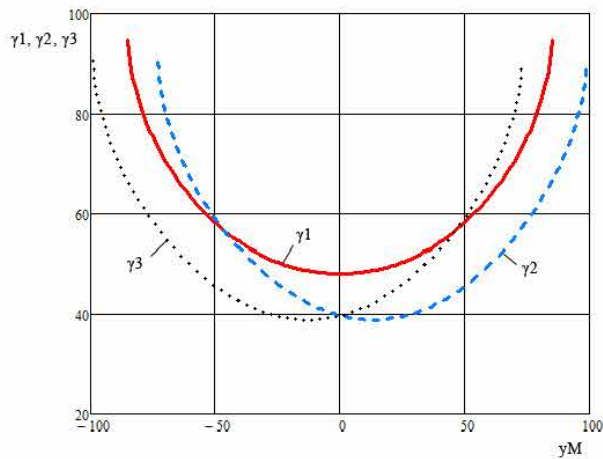
1. Закони зміни кутів повороту кінематичних ланок при переміщеннях робочого органу вздовж координатних осей є ідентичними і відбувається за однаковим законом;
2. У випадку, коли довжина кінематичної ланки L_1 , з'єднаної з нерухомою платформою, менша за довжину ланки L_2 , з'єднаної з рухомим робочим органом, кут повороту ланок змінюється більш плавно і в ширшому діапазоні під час вертикального переміщення органу.



а



б



в

Рис. 3.8. Зміна кутів при переміщенні робочого органу вздовж осі Y в діапазоні $-150 \dots 150$: а) $z_M = -50$; $R_n = 45$; $R_r = 30$; $L_1 = 35$; $L_2 = 70$; б) $z_M = -50$; $R_n = 45$; $R_r = 30$; $L_1 = 70$; $L_2 = 35$; в) $z_M = -50$; $R_n = 45$; $R_r = 30$; $L_1 = 50$; $L_2 = 50$

3. При вертикальному переміщенні робочого органу та його русі вздовж осі X , кути повороту кінематичних ланок, шарніри яких не розташовані на осі X , змінюються однаково

4. У випадку, коли довжина ланки L_1 , з'єднаної з нерухомою платформою, більша за довжину ланки L_2 з боку робочого органу, графік зміни кута повороту відповідної ланки L_1 під час руху органу вздовж осі X має більш складну траєкторію (рис. 3.8, б).

Отже, можна зробити висновок, що для кожного фіксованого положення робочого органу в межах робочого простору верстата існують конкретні значення кутів повороту всіх кінематичних ланок. Таким чином, регулюючи кути обертання ланок відповідно до певних законів, можна позиціонувати робочий орган у будь-якій заданій точці робочої зони і забезпечити потрібну траєкторію руху інструменту для виконання запланованої обробки деталі.

3.2. Вплив конструктивних параметрів верстатів типу дельта на геометричні параметри робочого простору

Основними геометричними параметрами верстата «Дельта» є (рис. 3.9):

- радіус розташування шарнірів на нерухомій платформі R_n ;
- радіус розташування шарнірів на виконавчому органі R_r ;
- довжини кінематичних ланок, що з'єднують нерухому платформу і виконавчий орган $L1$ і $L2$ відповідно.

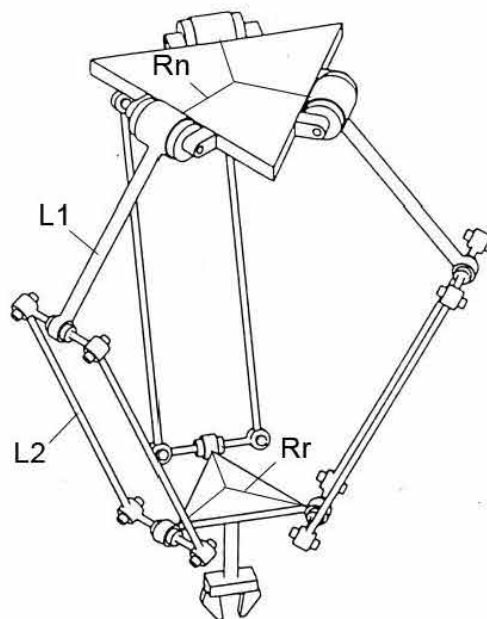


Рис. 3.9. Основні конструктивні параметри верстата типу «Дельта»

Під час досліджень робочий простір верстатів представлений у вигляді поперечних перерізів (ліній рівня) з метою коректного порівняння його параметрів (рис. 3.10).

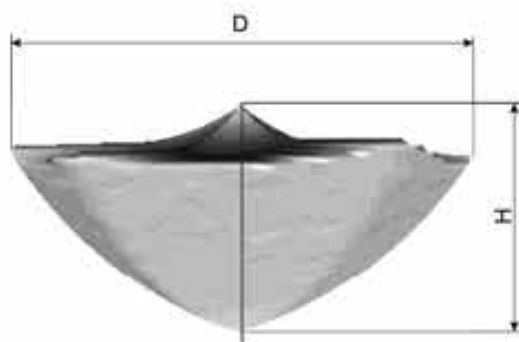


Рис. 3.10. Параметри робочого простору

Вплив конструктивних параметрів на конфігурацію робочого простору наведені на рис. 3.11, 3.12.

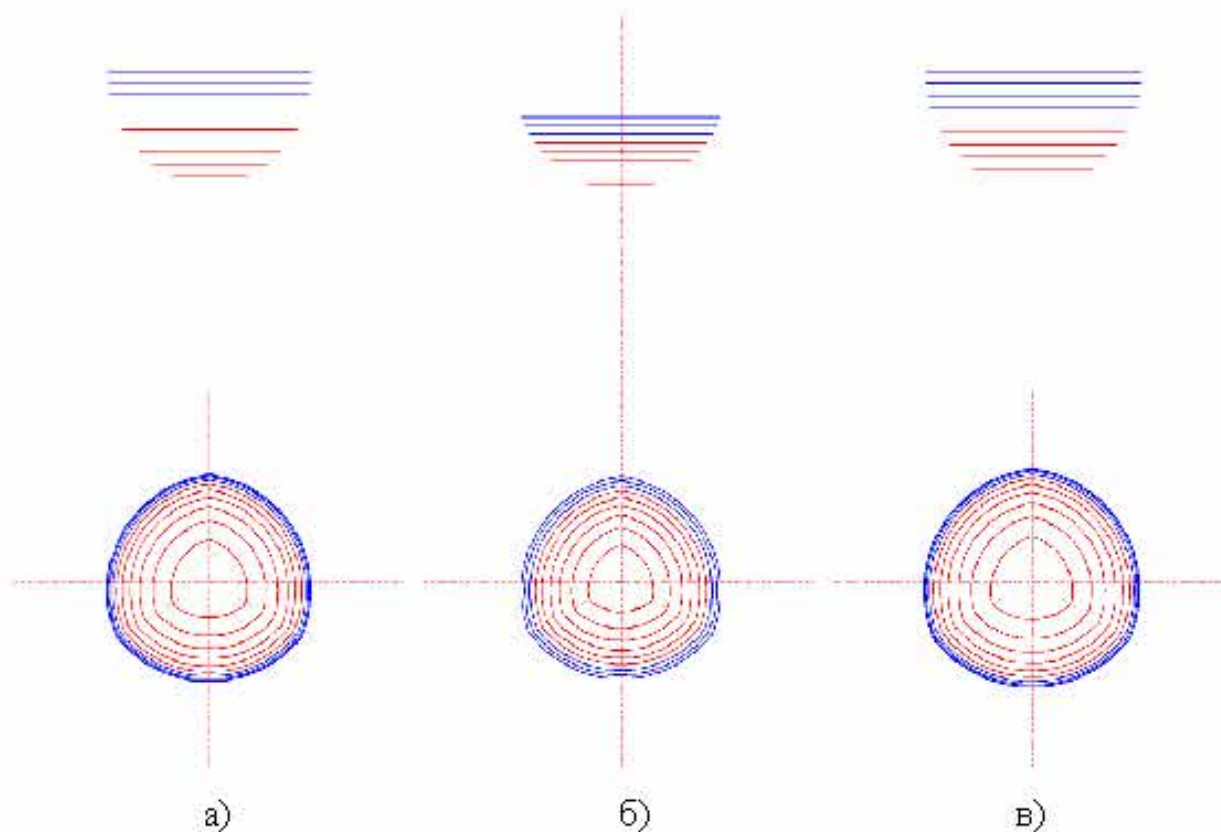


Рис. 3.11. Форма робочого простору при $R_n/R_r=1.5$ та співвідношенні довжин кінематичних ланок: а) $L_1=L_2$; б) $L_1<L_2$; в) $L_1>L_2$

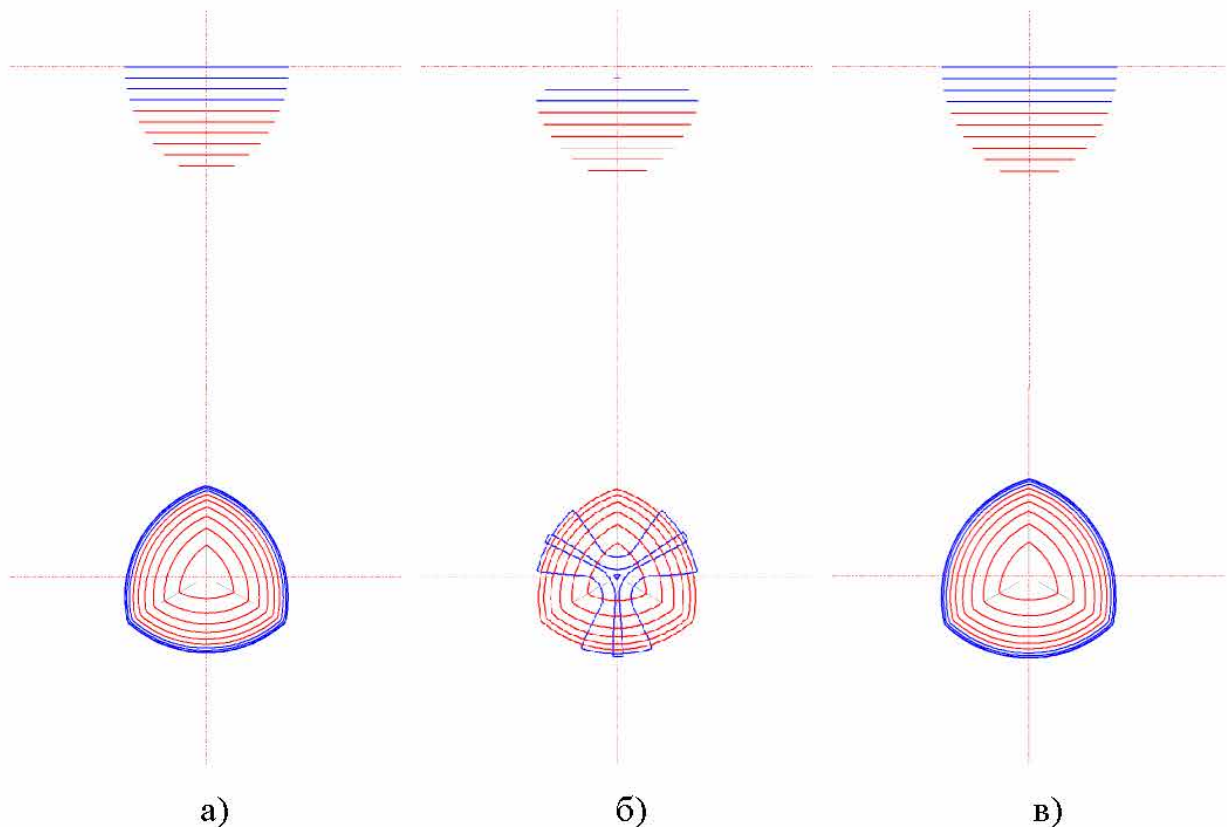
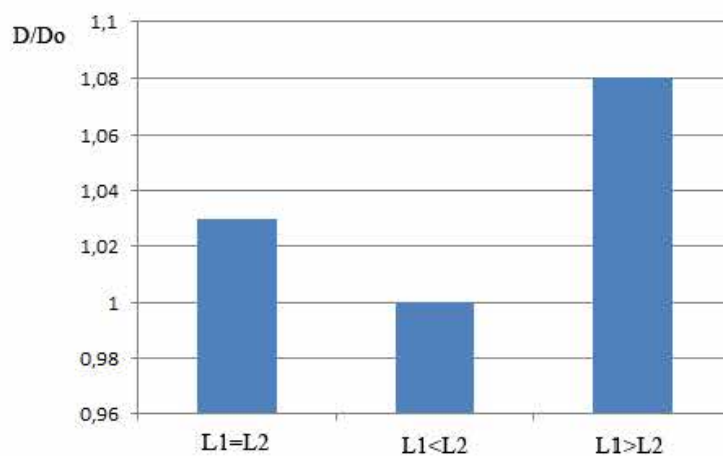


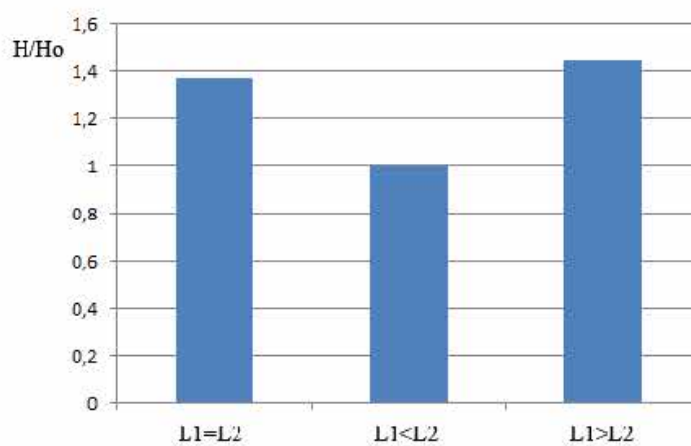
Рис. 3.12. Форма робочого простору при $R_n/R_r=4.5$ та співвідношенні довжин кінематичних ланок: а) $L_1=L_2$; б) $L_1<L_2$; в) $L_1>L_2$

З наведених рисунків можна побачити, що при зменшенні діаметра кола розміщення шарнірів на робочому органі R_r діаметр робочого простору зменшується, а висота – збільшується. Нижня точка робочого простору при цьому залишається на місці, а верхня – наближається до нерухомої платформи. Також, при $L_1=L_2$ – верхня границя робочого простору співпадає з положенням нерухомої платформи, а при $L_1>L_2$ – виходить за її межі.

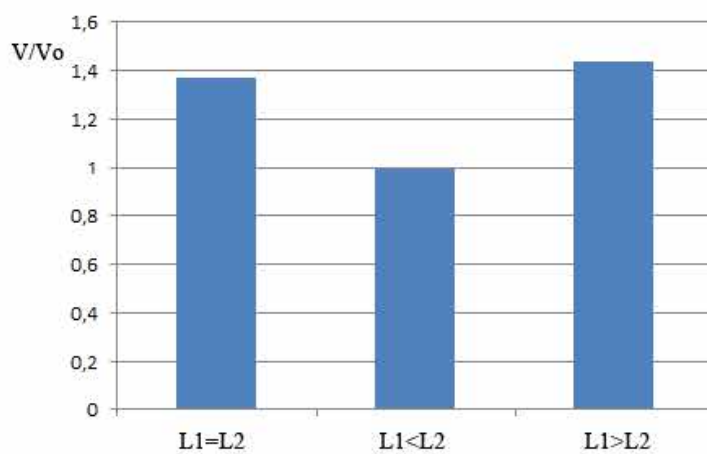
Таким чином, варіанти конструкції верстатів «Дельта» з співвідношенням кінематичних ланок $L_1 = L_2$ та $L_1 > L_2$ можна розглядати як функціонально однакові. Це обумовлено тим, що при однаковій нижній границі робочого простору, верхня границя обмежена нерухомою платформою, що обумовлює складну конструкцію верстата та складність системи керування внаслідок необхідності контролювати можливість зіткнення робочого органу з нерухомою платформою.



а



б



в

Рис. 3.13. Параметри робочого простору при $R_n/R_r=1.5$ та співвідношенні довжин кінематичних ланок: а) співвідношення діаметрів; б) співвідношення висоти; в) співвідношення об'ємів

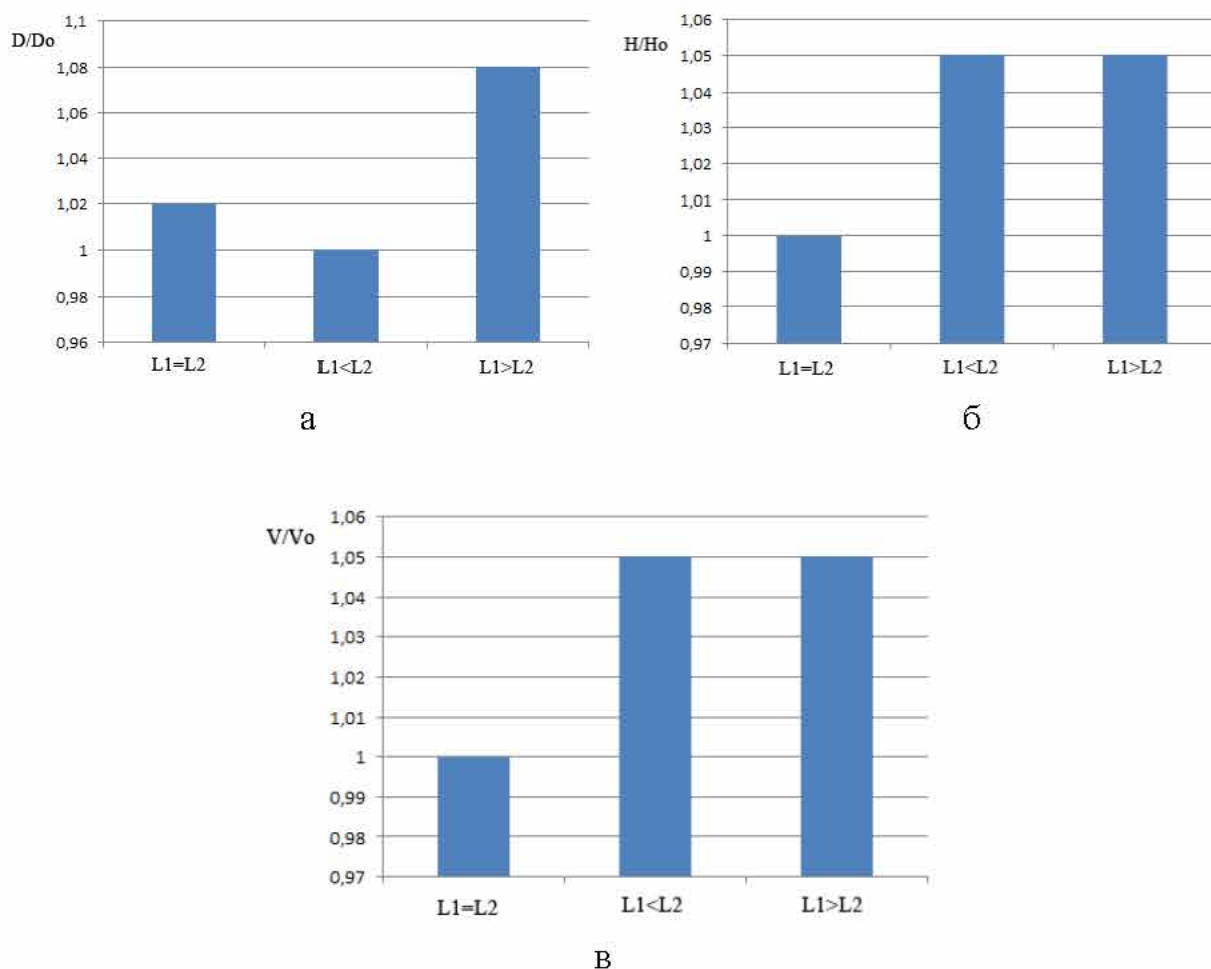


Рис. 3.14. Параметри робочого простору при $R_n/R_r=4.5$ та співвідношенні довжин кінематичних ланок: а) співвідношення діаметрів; б) співвідношення висоти; в) співвідношення об'ємів

Варіант з співвідношенням довжин ланок $L1<L2$ хоча і має менші геометричні параметри робочого простору, та конструктивно найбільш простий. При цьому зменшення розмірів робочого органу по відношенню до розмірів нерухомої платформи дозволяє збільшити об'єм робочого простору (рис. 3.14, б).

РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ ВЕРСТАТА ПАРАЛЕЛЬНОЇ КІНЕМАТИКИ

4.1 Загальні вихідні дані

Для визначення показників економічної ефективності приймаємо базу для порівняння – фрезерний металообробний верстат ЕрохуMill600. На відміну від базового, проектний має менші розміри, та більшу продуктивність.

Техніко-економічні показники базового та проектного верстатів зведено до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Загальні вихідні техніко-економічні показники

№ п/п	Показники	Одиниця	Варіанти	
			Базовий	Проектний
1	Штучний час обробки	хв	2,1	1,64
2	Площа, яку займає верстат	м ²	2,6	1,6
3	Встановлена потужність електродвигунів	кВт	4,4	2,5
4	Категорія ремонтної складності:			
	а) механічної частини	УРО	6	3
	б) електричної частини	УРО	9	12
5	Розряд роботи			
	а) верстатника	розряд	4	4
	б) наладчика	розряд	6	6
6	Оптова ціна базового верстата	Грн	536560	-

4.2 Конструкторська підготовка виробництва

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

1) встановлюємо етапи конструкторської підготовки виробництва: технічне завдання; технічна пропозиція; ескізний проект; технічний проект; робочий проект;

2) встановлюємо групу новизни та складності проектного верстата [8, дод. 1]: група новизни – III, група складності – III;

3) визначаємо приблизну кількість деталей, які підлягають розробці, диференціюючи їх за видами. За допомогою коефіцієнтів переводу деталі різних видів переводимо в «умовні деталі». [8, дод. 2];

4) трудомісткість технічного і робочого проектів визначаємо як добуток відповідної загальної кількості «умовних деталей» на трудомісткість однієї умовної деталі [8, дод. 3], в залежності від групи новизни та складності проектного верстата;

5) трудомісткість технічного завдання, технічної пропозиції, ескізного проекту визначаємо відповідно групі новизни та складності об'єкта. [8, дод. 3];

6) отримані результати зводимо до табл.4.2;

7) після визначення трудомісткості робіт розраховуємо витрати на конструкторську підготовку виробництва за формулою:

$$B_{нк} = T_{кон} \cdot Z_{сз}^к \cdot \left(1 + \frac{K_d}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_c}{100}\right) + H_e, \quad (4.1)$$

де $T_{кон}$ – трудомісткість конструкторської підготовки виробництва, нормо-год.;

$З_{сг}^к$ – середня годинна заробітна плата конструктора, грн/год.;

$к_d$ – додаткова заробітна плата конструктора, %;

$В_c$ – відрахування у соціальні фонди від заробітної плати конструкторів, %;

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

$$B_{mk} = 1536,4 \cdot 98,011 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) + 1536,4 \cdot 98,011 \cdot \frac{45}{100} = 269850 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.2

Розрахунок трудомісткості конструкторської підготовки виробництва

№ з/п	Показники та етапи робіт	Етапи конструкторської підготовки виробництва			Всього
		Технічне завдання, технічна пропозиція, ескізний проект	Технічний проект	Робочий проект	
1	2	3	4	5	6
1.	Кількість деталей× коефіцієнт переводу в «умовні деталі», шт:				
	а) корпусних масою більш ніж 100 кг		4×5	4×10	
	б) литі і зварні		6×2	6×4	
	в) оригінальних, які не є литими та корпусними		1×1	1×1	
	г) застосовані з іншого виробу		20×0,5	20×0,2	
	д) уніфікованих у вузли		3×7	3×3,5	

Продовження табл. 4.2

1	2	3	4	5	6
	е) стандартних нормалізованих		128×0,15	128×0,15	
	покупних		6×0,5	6×0,15	
2.	Кількість умовних деталей		86,2	99,6	
3.	Норма на умовну деталь, нормо-год		3,4	4,3	
4.	Загальна трудомісткість, нормо-год	815	293,08	428,28	1536,36

4.3 Технологічна підготовка виробництва

Визначаємо трудомісткість технологічної підготовки виробництва в такій послідовності:

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

2) трудомісткість інших етапів робіт технологічної підготовки виробництва визначаємо в процентах від трудомісткості проектування технологічних процесів обробки деталей та складання вузлів.

Всі виконання розрахунки зводимо до табл. 4.3.

Після визначення трудомісткості виконання етапів робіт з технологічної підготовки виробництва визначаємо витрати на неї за формулою:

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

де T_{mex} – сумарна трудомісткість технологічних робіт, нормо-год;

Z_{ce}^m – середня годинна заробітна плата технолога, грн./год.

$$B_T = 232,1 \cdot 96,52 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22,0}{100}\right) + 232,1 \cdot 96,52 \cdot \frac{55}{100} = 42385 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.3

Визначення трудомісткості технологічної підготовки виробництва

№ з/п	Показники та етапи робіт	Кількість	Кількість нормо-год на одиницю	Загальна кількість нормо-год
1	2	3	4	5
1.	Технологічний контроль креслень, їх відладка, розмноження, нормо-год			18,5
2.	Розробка техпроцесів виготовлення деталей:			
	а) загальна кількість деталей, шт	11		119,5
	б) в тому числі за групами технологічної складності			
	I	3	4,5	13,5
	II	5	9	45
	III	2	17	34
	IV	1	27	27
3.	Розробка техпроцесів складання вузлів:			
	а) загальна кількість вузлів, шт	3		52,6
	б) в тому числі за групами технологічної складності:			
	III	1	12,5	12,5
	V	1	17,8	17,8
	VI	1	22,3	22,3
4.	Проектування спеціального оснащення, нестандартних засобів механізації та автоматизації, нормо-год			16,6
5.	Виготовлення спеціального оснащення, нестандартних засобів механізації та автоматизації, нормо-год			9,5
6.	Інші роботи, нормо-год			15,4
7.	Всього трудомісткість, нормо-год			232,10

4.4 Визначення повної собівартості та оптової ціни верстата

Після визначення приблизної трудомісткості виготовлення проектного верстату за видами робіт (табл. 4.4), розраховуємо:

а) основну заробітну плату виробничих робітників:

$$З_{\text{оп}} = \sum_{i=1}^n C_{\text{г}(i)} \cdot T_i, \quad (4.3)$$

де n – кількість i -тих видів робіт;

$C_{\text{г}(i)}$ – 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:

$$З_{\text{оп}}^{\text{м}} = 187,4 \cdot 77,979 = 14613,26 \text{ грн.}$$

б) витрати на утримання та експлуатацію обладнання:

$$B_{\text{о}} = \sum_{i=1}^n З_{\text{оп}(i)} \cdot \frac{\Pi_{\text{во}(i)}}{100}, \quad (4.4)$$

де $\Pi_{\text{во}(i)}$ – 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:

$$B_{\text{о}}^{\text{м}} = 14613,26 \cdot \frac{385}{100} = 56261,07 \text{ грн.}$$

в) цехові витрати:

$$B_{\text{цех}} = \sum_{i=1}^n З_{\text{оп}(i)} \cdot \frac{\Pi_{\text{цв}(i)}}{100}, \quad (4.5)$$

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

Для механічних робіт:

$$K_{\text{цех}}^M = 14613,26 \cdot \frac{232}{100} = 33902,77 \text{ грн.}$$

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

Таблиця 4.4

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

Види робіт	Трудовіткість робіт н-год	Середній розряд	Середньогодинна тарифна ставка робітників, грн/год	Основна заробітна плата робітників $Z_{\text{ор}}$, грн.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання, B_o		Цехові витрати $K_{\text{цех}}$	
					%	грн.	%	грн.
Ливарні	28,4	3	87,048	2472,16	350	8652,57	242	5982,63
Зварювально- заготівельні	48,9	4	66,354	3244,71	245	7949,54	132	4283,02
Механічні	187,4	4	77,979	14613,26	385	56261,07	232	33902,77
Термічні	30,9	3	87,048	2689,78	395	10624,64	282	7585,19
Гальванічні	24	3	57,643	1383,43	280	3873,61	150	2075,15
Слюсарсько- складальні	320,1	4	77,979	24961,08	210	52418,26	242	60405,81
Фарбувальні	10,5	2	45,319	475,85	110	523,43	120	571,02
Пакувальні	22	2	41,935	922,57	110	1014,83	120	1107,08
Інші	49,8	3	70,181	3495,01	220	7689,03	240	8388,03
Всього	722,0	-	-	54257,86	-	149007,0	-	124300,71

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

$$C_{\text{пов}} = M_{\text{о}} + M_{\text{д}} + П_{\text{н}} + B_{\text{н}} + T_{\text{в}} - B_{\text{зв}} + E_{\text{тех}} + П_{\text{тех}} + \\ + Z_{\text{ор}} + Z_{\text{др}} + B_{\text{с}} + Z_{\text{щп}} + B_{\text{о}} + B_{\text{цех}} + B_{\text{зав}} + B_{\text{ін}} + B_{\text{не}}, \quad (4.6)$$

де $M_{\text{о}}$, $M_{\text{д}}$ – відповідно витрати на основні та допоміжні матеріали, грн.;

$П_{\text{н}}$ – покупні напівфабрикати, комплектуючі вироби та послуги інших підприємств, грн.;

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

Таблиця 4.5

Склад матеріальних витрат на верстат

№ п/п	Матеріали, покупні напівфабрикати та комплектуючі вироби	Одиниця	Витрати (шт., кг)	Ціна, грн	Витрати на виріб, грн
Основні матеріали					
1	Чавун СЧ20	кг	145	68,0	9860,00
2	Сталь 45	кг	92	45,20	4158,40
	Всього	–	–	–	14018,40
Покупні напівфабрикати					
1	Мотор-шпиндель	шт.	1	6860	6860,00
2	Двигун шаговий	шт.	3	3140	9420,00
3	Підшипники	шт.	9	150	1350,00
5	Перехідник для комп'ютера (кабель та пристрій)	шт.	1	4640	4640,00
6	Метизи	кг	2,1	45,2	94,92
7	Інші покупні				350,00
	Всього	–	–	–	22714,92

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

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

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

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

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

$B_{\text{с}}$ – єдиний соціальний внесок, грн.;

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

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

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

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

Розрахунок собівартості зводимо до табл. 4.6.

Таблиця 4.6

Повна собівартість виготовлення верстату та його оптова ціна

№ п.п	Стаття калькуляції	Коротке позначення	Метод розрахунку, джерело інформації	Результат, сума, грн
1	2	3	4	5
1.	Матеріали основні	M_o	табл. 4.5	14018,40
2.	Матеріали допоміжні	M_d	4% від M_o	560,74
3.	Покупні напівфабрикати, комплектуючі вироби та послуги інших підприємств	$П_n$	табл. 4.5	22714,92
4.	Зворотні відходи	$-B_{\text{зв}}$	6% від M_o	841,10
5.	Транспортно-заготівельні витрати	T_v	5% від $(M_o + M_d + П_n)$	1491,76
6.	Паливо та енергія на технологічні цілі	$П_{\text{тех}}, E_{\text{тех}}$	78,0% від $З_{\text{ор}}$	42321,13
7.	Всього матеріальні витрати			80265,85
8.	Основна заробітна плата виробничих робітників	$З_{\text{ор}}$	табл. 4.4	54257,86
9.	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	$З_{\text{др}}$	10% від $З_{\text{ор}}$	5425,79
10.	Єдиний соціальний внесок	B_c	22,0% від $(З_{\text{ор}} + З_{\text{др}})$	13130,40
11.	Відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення	$З_{\text{уп}}$	2,5% від $З_{\text{ор}}$	1356,45
12.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання	B_o	табл. 4.4	149006,99
13.	Цехові витрати	$K_{\text{цех}}$	табл. 4.4	124300,71
14.	Загальнозаводські витрати	$K_{\text{зав}}$	185% від $З_{\text{ор}}$	100377,05
15.	Інші виробничі витрати	$B_{\text{ін}}$	2,1% від $З_{\text{ор}}$	1139,42
16.	Виробнича собівартість	$C_{\text{вир}}$	$\Sigma \text{ст. (7} \div 15)$	529260,51

Продовження табл. 4.6

1	2	3	4	5
17.	Позавиробничі витрати	$K_{\text{пв}}$	1% від $C_{\text{вир}}$	5292,61
18.	Повна собівартість	$C_{\text{пов}}$	$C_{\text{вир}} + K_{\text{пв}}$	534562,21
19.	Прибуток	$\Pi_{\text{н}}$	8,5% від $C_{\text{пов}}$	45437,79
20.	Оптова ціна	$C_{\text{опт}}$	$C_{\text{пов}} + \Pi_{\text{н}}$	580000,0

Оптову ціну верстата розраховуємо за формулою:

$$C_{\text{опт}} = C_{\text{пов}} + \Pi_{\text{н}}, \quad (4.7)$$

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

$$\Pi_{\text{н}} = \frac{P_{\text{с}} \cdot C_{\text{пов}}}{100}, \quad (4.8)$$

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

$$\Pi_{\text{н}} = \frac{20 \cdot 534562,21}{100} = 45437,79 \text{ грн.}$$

$$C_{\text{опт}} = 534562,21 + 45437,79 = 580000 \text{ грн.}$$

4.5 Визначення експлуатаційних витрат, які припадають на одиницю продукції

Розрахунок виконуємо за формулою:

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

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

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

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

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

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

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

$B_{\text{ір}}$ – витрати на ріжучий інструмент, грн.

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

$$B_3 = C_r \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60} \cdot (1 + K_d) \cdot (1 + K_c), \quad (4.10)$$

де C_r – середньо-годинна ставка робітника, грн.;

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

K_d, K_c – коефіцієнти додаткової зарплати та відрахувань на соціальні заходи відповідно.

$$B_3^{\text{баз}} = 77,986 \cdot \frac{2,1}{60} \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) = 3,6630 \text{ грн}$$

$$B_3^{\text{тп}} = 77,986 \cdot \frac{1,64}{60} \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) = 2,8606 \text{ грн}$$

Витрати на електроенергію силову:

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

де $N_{\text{в}}$ – 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 (для фрезерних верстатів приймають 0,6...0,7);

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 силової електроенергії, грн/кВт-год.

$$B_{\text{ел}}^{\text{баз}} = \frac{4,4 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 0,3}{0,87 \cdot 0,95} \cdot \frac{2,1}{60} \cdot 7,5 = 0,1761 \text{ грн}$$

$$B_{\text{ел}}^{\text{пр}} = \frac{2,5 \cdot 0,7 \cdot 0,7 \cdot 0,4}{0,88 \cdot 0,92} \cdot \frac{1,64}{60} \cdot 7,5 = 0,1241 \text{ грн}$$

Витрати на допоміжні матеріали:

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

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 виробництва приймають 1).

$$B_{\text{дм}}^{\text{баз}} = \frac{78,5 \cdot 6 \cdot 2,1}{60 \cdot 100} \cdot 1,0 = 0,1649 \text{ грн}$$

$$B_{\text{дм}}^{\text{пр}} = \frac{78,5 \cdot 3 \cdot 1,64}{60 \cdot 100} \cdot 1,0 = 0,0644 \text{ грн}$$

Витрати на ремонт обладнання:

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

де $P_{\text{вн}}, P_{\text{ве}}$ – відповідно річні витрати на всі види ремонту на одну категорію ремонтної складності механічної та електричної частини верстата, грн/рік;

$F_{\text{дрм}}$ – дійсний річний фонд часу роботи верстата.

$$B_p^{\text{баз}} = \frac{6 \cdot 880 + 9 \cdot 720}{3950} \cdot \frac{2,1}{60} = 0,1042 \text{ грн},$$

$$B_p^{\text{нр}} = \frac{3 \cdot 880 + 12 \cdot 720}{3950} \cdot \frac{1,64}{60} = 0,0781 \text{ грн}.$$

Витрати на утримання площі:

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

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

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

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

$$B_{\pi}^{\text{баз}} = \frac{2,6 \cdot 3,5 \cdot 780}{3950} \cdot \frac{2,1}{60} = 0,0629 \text{ грн}$$

$$B_{\pi}^{\text{нр}} = \frac{1,6 \cdot 4,0 \cdot 780}{3950} \cdot \frac{1,64}{60} = 0,0345 \text{ грн}$$

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.

Балансову вартість верстатів знаходимо за формулою:

$$\Phi_{\text{бал}} = \Pi_{\text{опт}} \cdot (1 + K_{\text{тр}} + K_{\text{м}} + K_{\text{ф}}), \quad (4.16)$$

де $\Pi_{\text{опт}}$ – оптова ціна верстата, грн;

$K_{тр}$, K_m , K_f – відповідно коефіцієнти, які враховують транспортування (0,05...0,1), монтаж (0,04...0,06), улаштування фундаменту (0,02...0,08).

Таким чином:

$$\Phi_{бал}^{баз} = 536560 \cdot (1 + 0,08 + 0,06 + 0,05) = 638507 \text{ грн}$$

$$\Phi_{бал}^{пр} = 580000 \cdot (1 + 0,08 + 0,06 + 0,05) = 690200 \text{ грн}$$

$$B_a^{баз} = \frac{638506 \cdot 20}{3950 \cdot 100} \cdot \frac{2,1}{60} = 1,1315 \text{ грн}$$

$$B_a^{пр} = \frac{690200 \cdot 20}{3950 \cdot 100} \cdot \frac{1,64}{60} = 0,9552 \text{ грн}$$

Витрати на експлуатацію універсального ріжучого інструменту:

$$B_{ip} = \frac{(S_u + p \cdot S_{пер}) \cdot \gamma \cdot T_{нор}}{t_e (p + 1)} K_{ем}, \quad (4.17)$$

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

p – кількість переточувань ріжучого інструменту до повного зносу по лімітуючому розміру ріжучої грані;

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

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

t_e – економічна стійкість інструменту, хв.;

$K_{ем}$ – коефіцієнт обліку втрат інструменту.

$$B_{ip}^{баз} = \frac{(976,0 + 20 \cdot 13,9) \cdot 0,6 \cdot 2,1}{480 \cdot (1 + 20)} \cdot 1,01 = 0,1583 \text{ грн};$$

$$B_{ip}^{пр} = \frac{(976,0 + 20 \cdot 13,9) \cdot 0,6 \cdot 1,64}{480 \cdot (1 + 20)} \cdot 1,01 = 0,0965 \text{ грн}.$$

Результати розрахунків зводимо до табл. 4.7.

Таблиця 4.7

Експлуатаційні витрати (собівартість обробки)

№ п/п	Експлуатаційні витрати	Умовне позначення	Варіанти	
			Базовий	Проектний
1.	Заробітна плата основна, додаткова з єдиним соціальним внеском	B_z	3,6630	2,8606
2.	Силова електроенергія	$B_{ел}$	0,1761	0,1241
3.	Допоміжні матеріали	$B_{дм}$	0,1649	0,0644
4.	Ремонт обладнання	B_p	0,1042	0,0781
5.	Універсальний інструмент	B_{ip}	0,1583	0,0965
6.	Утримання приміщення	$B_{уп}$	0,0629	0,0345
7.	Амортизація обладнання	B_a	1,1315	0,9552
Загальна сума		B_e	5,4609	4,2134

4.6 Розрахунок показників економічної ефективності

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

$$E_{pv} = (U_{opt}^{np} - C_{пов}^{np}) \cdot \Pi_v - E_n \cdot K_v, \quad (4.18)$$

де U_{opt}^{np} – вартість оптова проектного верстата, грн.;

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

Π_v – програма виробництва верстатів, шт./рік;

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

K_v – додаткові капітальні витрати у виробника, грн.

$$K_v = B_{пк} + B_t, \quad (4.19)$$

де $B_{\text{ПК}}$, B_{T} – відповідно вартість конструкторської та технологічної підготовки виробництва, грн.

$$K_{\text{е}} = 269850 + 42385 = 312235 \text{ грн.}$$

$$E_{\text{рв}} = (580000 - 534562) \cdot 2 - 0,16 \cdot 312235 = 41000 \text{ грн.}$$

Річний економічний ефект у споживача розрахуємо за формулою:

$$E_{\text{рсп}} = (B_{\text{е.баз}} - B_{\text{е.пр}}) \cdot N_{\text{д}} - E_{\text{н}} \cdot K_{\text{сп}}, \quad (4.20)$$

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

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

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

$$K_{\text{сп}} = \Phi_{\text{бал.пр}} \cdot Q_{\text{пр}} - \Phi_{\text{бал.баз}} \cdot Q_{\text{баз}}, \quad (4.21)$$

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

$Q_{\text{пр}}$, $Q_{\text{баз}}$ – потреба у верстатах для виконання річної виробничої програми виготовлення деталей.

Розрахункову потребу в обладнанні визначаємо за формулою:

$$Q_{\text{р}} = \frac{N_{\text{д}} \cdot T_{\text{нор}}}{F_{\text{дрм}} \cdot 60 \cdot K_{\text{е}}}, \quad (4.22)$$

де $K_{\text{е}}$ – коефіцієнт виконання норм (за даними підприємства).

$$K_{\text{сп}} = 690200 \cdot 1 - 638507 \cdot 1 = 51693 \text{ грн.}$$

$$E_{\text{рст}} = (5,4609 - 4,2134) \cdot 15000 - 0,16 \cdot 51693 = 10500 \text{ грн.}$$

Строк окупності додаткових капітальних вкладень:

- у виробника:

$$T_{окв} = \frac{K_e}{(II_{опт}^{пр} - C_{пов}^{пр}) \cdot II_v} = \frac{312235}{(580000 - 534562) \cdot 2} = 3,4 \text{ роки}, \quad (4.23)$$

- у споживача:

$$T_{ок_{сн}} = \frac{K_{сн}}{(B_{е.баз} - B_{е.пр}) \cdot N_d} = \frac{51693}{(5,4609 - 4,2134) \cdot 15000} = 2,8 \text{ роки} \quad (4.24)$$

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

Таблиця 4.8

Підсумкові техніко-економічні показники базового та проектного верстатів

№ п/п	Показники	Одини ця	Базовий варіант	Проект	Зміна, % (+,-)
1.	Програма виробництва верстатів	шт./рік	—	2	—
2.	Річний випуск виробів	шт./рік	15000	15000	—
3.	Штучний час обробки виробу	хв.	2,1	1,64	-21,9
4.	Повна собівартість виготовлення верстату	грн.	—	534562	—
5.	Оптова ціна верстату	грн.	536560	580000	+8,1
6.	Собівартість одиниці обробки із застосуванням об'єкта	грн.	5,461	4,213	-22,9
7.	Капітальні витрати на конструкторську та технологічну підготовку виробництва	грн.	—	312235	—
8.	Строк окупності капітальних витрат				
	а) у виробника	років	—	3,4	—
	б) у споживача	років	—	2,8	—
9.	Річний економічний ефект:				
	а) у виробника	грн.	—	41000	—
	б) у споживача	грн.	—	10500	—

ВИСНОВКИ

У представленій кваліфікаційній роботі для освітнього ступеня «магістр» досліджено верстат з механізмами паралельної структури типу дельта.

Було вирішено наступні задачі:

- проаналізовано компоновки верстатів з паралельною кінематикою типу дельта та факторів, які впливають на форму та розміри робочого простору;
- виконано розв'язок зворотної задачі кінематики для верстатів типу дельта;
- визначено кути повороту кінематичних ланок при типових рухах виконавчого органу;
- проведено теоретичні дослідження впливу конструктивних параметрів верстата (довжин кінематичних ланок, розмірів нерухомої платформи та виконавчого органу) на геометричні характеристики робочого простору.

Визначено, що при зменшенні розміру виконавчого органу діаметр робочого простору зменшується, а висота – збільшується. Нижня точка робочого простору при різних співвідношеннях довжин кінематичних ланок залишається на місці, а верхня точка наближається до нерухомої платформи.

Розглянуто варіанти компоновок верстата з різним співвідношенням довжин кінематичних ланок. Визначено, що конструкції з $L_1=L_2$ та $L_1>L_2$ функціонально майже однакові. А варіант з $L_1<L_2$ має менші геометричні параметри робочого простору, але конструктивно найбільш простий. При цьому зменшення розмірів виконавчого органу по відношенню до розмірів нерухомої платформи дозволяє збільшити об'єм робочого простору.

Економічне обґрунтування впровадження результатів досліджень показало, що використання запропонованого верстата дозволить отримати у споживача річний економічний ефект у розмірі 10500 грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Крижанівський В.А., Кузнецов Ю.М., Валявський І.А., Скляр Р.А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: Навчальний посібник для ВНЗ. / Під ред. Ю.М. Кузнецова. – Кіровоград, 2004. – 449 с.
2. Кузнецов Ю.М., Луців І.В., Дубиняк С.А. Теорія технічних систем. Під загальною редакцією проф. Ю.М. Кузнецова К.: - Тернопіль, 1997 – 310 с.: іл.
3. Кузнецов Ю. М., Крижанівський В. А., Скляр Р. А. Сучасний стан, прогнозування і перспективи розвитку верстатів з паралельною кінематикою // Зб. наукових праць «Процеси механічної обробки в машинобудуванні». - ЖДТУ, 2005. - Вип. 1
4. Кузнецов Ю. М. Світові тенденції і перспективи розвитку верстатобудування в Україні / Ю. М. Кузнецов // Зб. наук. праць за матеріалами науково-методичної конф. «Вища освіта – 2006». – 2007. – С. 45–55.
5. Валявський І.А., Крижанівський В.А. Тенденції розвитку верстатів паралельної структури // Вісник Сумського державного університету. – 2003. – №2(48). – с. 18-22
6. Агрегатно-модульне технологічне обладнання: / Крижанівський В.А., Кузнецов Ю.М., Кириченко А.М. та ін. / Під ред. Ю.М. Кузнецова. Навч. посібник для ВНЗ у 3-х част. – Кіровоград, 2003
7. Скляренко І.В., Лебедева Л.В., Романюк Л.М. Економічні та організаційно-планові розрахунки при розробці нових виробів. – Кіровоград: КДТУ, 2001- 36с.
8. Економічні та організаційно-планові розрахунки при обґрунтуванні доцільності розробки нових виробів // Укладачі: Журило І.В., Полтавець М.М. Кропивницький: ЦНТУ, 2017. 40 с.