

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:

Рухові можливості верстата з паралельною кінематикою

Motion capabilities of the machine with parallel kinematics

Виконавець: здобувач гр. ГМ-22М-3

_____ Артем ПОЛЬЩА

Керівник: к.т.н., доцент

_____ Іван ВАЛЯВСЬКИЙ

Рецензент: к.т.н., доцент

_____ Олег БЕВЗ

Завідувач кафедри ММР

_____ Андрій ГРЕЧКА

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.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧЕВІ

Польщі Артему Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Рухові можливості технологічного обладнання 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 компоновок багатокординатного технологічного обладнання; 3.3. Вимоги до результатів досліджень;

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

4.1. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою

4.2. Основні характеристики кінематичних схем технологічного обладнання з паралельною кінематикою

4.3. Рухові можливості верстатів-гексаподів

4.4. Техніко-економічні розрахунки

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

1. Рухові характеристики технологічного обладнання з паралельною кінематикою (1 арк.). 2. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою (1 арк.). 3. Показники рухових можливостей гексапода (3 арк.). 4. Вплив конструктивних параметрів гексапода на переміщення виконавчого органа по осі симетрії (2 арк.). 5. Вплив конструктивних параметрів гексапода на переміщення виконавчого органа перпендикулярно осі симетрії (3 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	Квітень 2024	вик.
2.	Вступ, мета та задачі роботи	Квітень 2024	вик.
3.	Показники рухових можливостей гексапода	Квітень-травень 2024	вик.
4.	Дослідження рухових можливостей	Травень 2024	вик.
5.	Висновки	Червень 2024	вик.
6.	Визначення економічної ефективності	Квітень 2024	вик.
7.	Оформлення роботи	Квітень 2024	вик.

Здобувач _____ Польща А.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

Анотація

Польща А.О. Рухові можливості верстата з паралельною кінематикою. Випускна кваліфікаційна робота для освітнього ступеня «магістр» – ЦНТУ, 2024. – 70 с., 10 іл., 19 бібліогр.

В роботі розглянуто основні напрямки і тенденції розвитку технологічного обладнання з паралельною кінематикою, класифікацію основних компоновочних схем цього обладнання, а також особливості аналізу верстатів за критеріями гнучкості та рухових можливостей.

Визначено показники рухових можливостей верстатів-гексаподів. Виконано оцінку переміщень виконавчого органу гексапода по осі симетрії та в напрямку, перпендикулярному до цієї осі, а також при положенні рухомої платформи під кутом.

Визначено найбільш доцільні конструктивні виконання верстатів-гексаподів.

Розраховано техніко-економічні показники проектування верстату з паралельною кінематикою.

Ключові слова: верстат, верстат-гексапод, паралельна кінематика, рухові характеристики.

Annotation

Polshcha A.O. Motion capabilities of the machine with parallel kinematics.

Graduation qualification thesis for the educational degree "master" - Central Ukrainian National Technical University, 2024. - 70 pp., 10 illustrations, 19 bibliographies.

The paper examines the main directions and trends in the development of technological equipment with parallel kinematics, the classification of basic layout schemes for this equipment, as well as the peculiarities of machine tool analysis based on flexibility and motion capability criteria.

Motion capability indicators for hexapod machine tools have been determined. An assessment of the hexapod's end effector movements along the symmetry axis and in the direction perpendicular to this axis, as well as with the mobile platform positioned at an angle, has been performed.

The most appropriate structural designs for hexapod machine tools have been identified.

Technical and economic indicators for designing a machine tool with parallel kinematics have been calculated.

Keywords: machine tool, hexapod machine tool, parallel kinematics, motion characteristics.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД І ВИБІР НАПРЯМКУ РОБОТИ.....	9
1.1. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою	9
1.2. Компоновки технологічного обладнання з паралельною кінематикою.....	12
РОЗДІЛ 2 ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КІНЕМАТИЧНИХ СХЕМ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ	21
2.1. Основні характеристики кінематичних схем верстатів	21
2.2. Особливості аналізу верстатів за критеріями гнучкості та рухових можливостей	22
РОЗДІЛ 3 РУХОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕРСТАТІВ-ГЕКСАПОДІВ	25
3.1. Показники рухових характеристик верстатів-гексаподів.....	25
3.2. Оцінка переміщень виконавчого органу гексапода по осі його симетрії.....	33
3.3. Оцінка рухових можливостей верстата-гексапода в поперечному напрямку	39
3.4. Оцінка рухових можливостей верстата-гексапода при переміщенні виконавчого органу під кутом	44
РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ ВЕРСТАТА ПАРАЛЕЛЬНОЇ КІНЕМАТИКИ	50
ВИСНОВКИ.....	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	68

ВСТУП

Актуальність теми. Однією з сучасних світових тенденцій у машинобудуванні є розробка технологічного обладнання з паралельною кінематикою, що базується на просторових механізмах паралельної структури. Це обладнання слід розглядати як матеріальне втілення інноваційних підходів до реалізації комплексних процесів обробки, вимірювання, складання та транспортування деталей у машинобудівному виробництві. Верстати з паралельною кінематикою є високорухомими технологічними системами з широкими функціональними можливостями для обробки деталей складної форми, що дозволяє реалізовувати гнучкі технології.

Основне призначення такого технологічного обладнання полягає у виконанні різноманітних рухів, що дозволяє їм здійснювати основні та допоміжні технологічні операції у виробничих умовах.

Таким чином, визначення системи показників, які дозволяють оцінювати можливі варіанти рухів технологічного обладнання, є актуальною науковою задачею.

Метою даної роботи є визначення рухових характеристик технологічного обладнання з паралельною кінематикою.

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

1. проведено аналіз компоновок верстатів з паралельною кінематикою;
2. визначені показники рухових характеристик верстатів;
3. виконано оцінку переміщень виконавчого органу гексапода по осі його симетрії та в напрямку, перпендикулярному осі.

Об'єкт дослідження – верстат з паралельною кінематикою типу «гексапод».

Предмет дослідження – рухові характеристики верстатів з паралельною кінематикою.

Наукова новизна. Запропоновано системи показників для оцінки рухових можливостей виконавчого органу гексаподів. Виконано дослідження просторових рухових можливостей гексаподів у вертикальному та горизонтальному напрямках з урахуванням просторового розміщення шарнірів кінематичних ланок на рухомій та нерухомій платформах.

Практичне значення – визначено рухові можливості верстатів-гексаподів по осі його симетрії та в напрямку, перпендикулярному осі.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД І ВИБІР НАПРЯМКУ РОБОТИ

1.1. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою

Багатокоординатні «традиційні» верстати типу «обробний центр» зазвичай використовують ортогональні або обертальні рухи, кожен з яких забезпечує робочому органу верстата одну ступінь вільності (рис. 1.1, а). Взаємний вплив координат, що послідовно додаються, призводить до зниження жорсткості верстата і погіршення його динамічних характеристик.

Сучасною альтернативою таким «традиційним» верстатам є створення технологічного обладнання із застосуванням паралельних кінематичних структур [3, 4, 5, 6], які відрізняються тим, що вихідна ланка пов'язана з основою кількома кінематичними ланцюгами, кожен з яких містить привод або накладає деяку кількість зв'язків на рух вихідної ланки (виконавчого органу). Рух вихідної ланки відбувається при одночасній (паралельній) роботі всіх кінематичних ланцюгів. Кожен ланцюг містить кінематичну ланку змінної довжини (рис. 1.1, б).

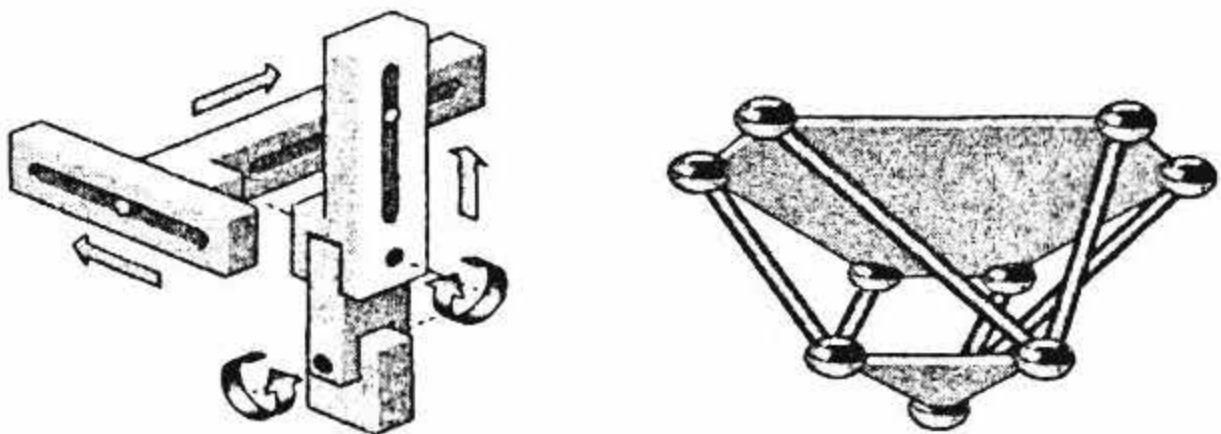


Рис. 1.1. Механізми багатокоординатних верстатів з послідовно (а) і паралельно (б) з'єднаними кінематичними ланцюгами

Кожен набір довжин кінематичних ланок відповідає унікальній позиції механізму. Синхронне керування всіма кінематичними ланками дозволяє

точно орієнтувати робочий орган верстата. При цьому кожен лінійний привід діє лише вздовж своєї осі, не впливаючи на інші. На відміну від традиційних, ці механізми мають замкнені кінематичні ланцюги і розподіляють навантаження подібно до просторових ферм. Це забезпечує підвищену жорсткість, точність та вантажопідйомність, хоча може обмежувати робочу зону. Такі переваги викликали значний інтерес розробників та виробників до верстатів з паралельною кінематикою.

Одним з перших механізмів паралельної структури була «платформа Гауфа», новизна якої була у взаємному симетричному розташуванні шести кінематичних ланок (рис. 2) [5].

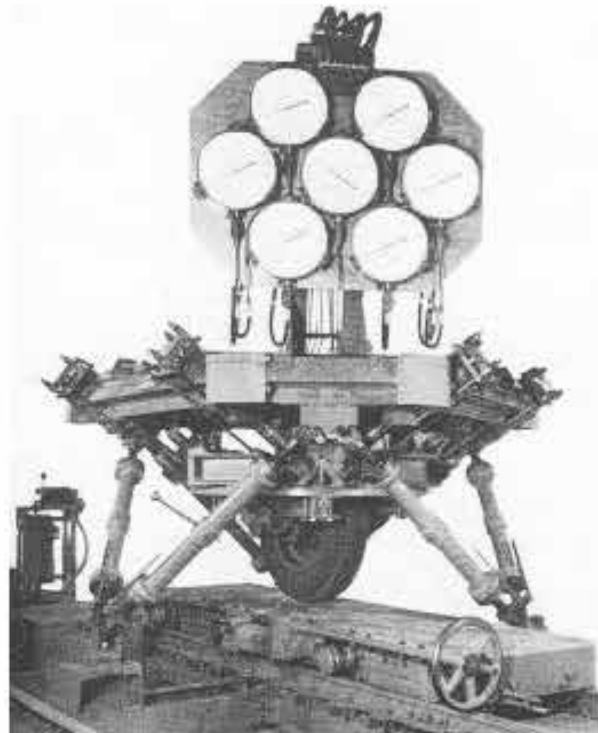


Рис. 1.2. Платформа Гауфа

Більш відома «платформа Стюарта» (рис. 1.3), яка з'явилась згодом, принципово не відрізняється від механізму Еріка Гауфа.

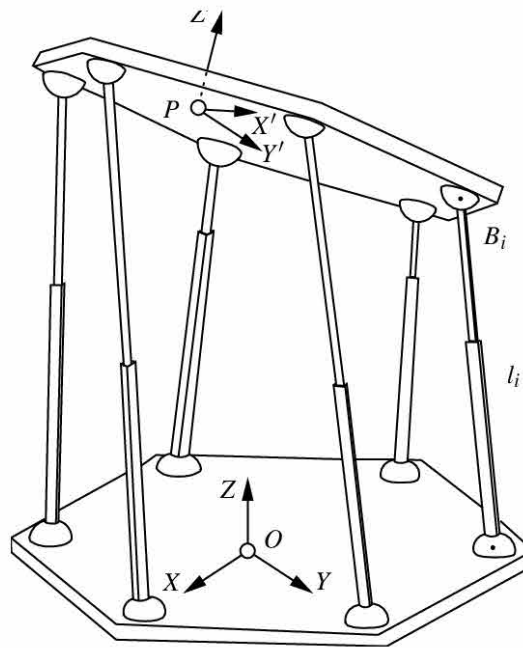


Рис. 1.3. Платформа Стюарта

Компонентами верстатів з паралельною кінематикою, що визначають надійність та точність їх роботи, є:

- кінематичні ланки (штанги постійної або змінної довжини);
- шарніри та шарнірно-силова система;
- приводи кінематичних ланок;
- шпиндельні вузли та шарнірні шпиндельні головки;
- столи, платформи та несуча система;
- система управління, позиціонування та вимірювання координат.

Конструктивно механізм з паралельною кінематикою є фізичним твердим тілом (платформою), з'єднаним з нерухомою основою кінематичними ланками змінної довжини – поступальними парами (рис. 1.3).

Кількість з'єднувальних ланцюгів та число ступенів вільності може бути від 2 до 6.

Кількість, вид та порядок розташування кінематичних пар у ланцюгах може бути різним. Кожен кінематичний ланцюг може містити один або декілька приводів.

1.2. Компоновки технологічного обладнання з паралельною кінематикою

Залежно від числа ступенів вільності, незалежно від області застосування, технологічне обладнання можна розділити на такі групи [5]:

- біподи (вихідна ланка механізму має два ступені вільності);
- триподи (вихідна ланка має три ступені вільності);
- квадроуди (у вихідній ланки чотири ступені вільності);
- пентаподи (п'ять ступенів вільності);
- гексаподи (вихідна ланка має шість ступенів вільності).

Біподи є найпростішими представниками технологічного обладнання з паралельною структурою. Біпод – це плоский механізм з двома паралельними кінематичними ланцюгами. Виконавчий орган в таких механізмах має два ступені вільності і, в більшості випадків, два переміщення. Схема верстата-біпода наведена на рис. 1.4.

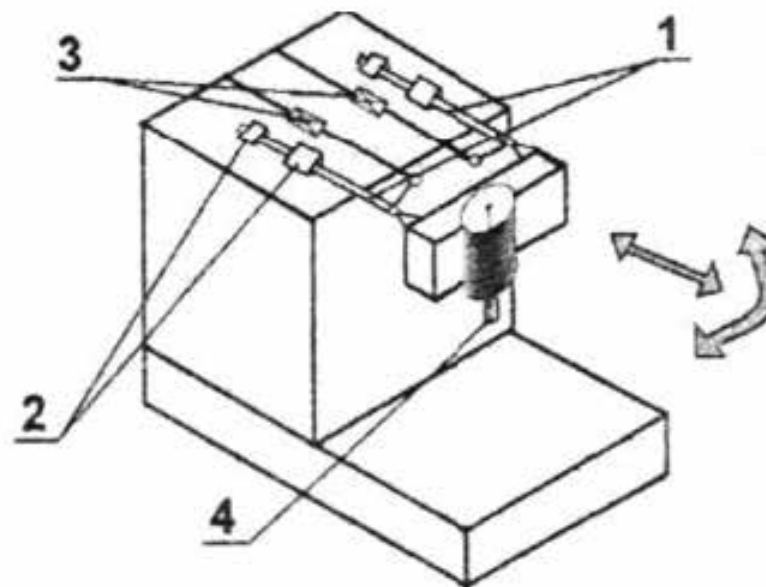


Рис. 1.4. Схема верстата-біпода

Кінематичні ланки 1 переміщуються в каретках 2 у поздовжньому напрямку за допомогою приводів 3 поздовжнього переміщення (лінійні двигуни). Переміщення шпинделя вздовж третьої координати здійснюється окремим приводом. За подібною схемою, але з горизонтальним

розташуванням шпинделя, виконаний верстат HHV фірми HULLER HILLE (рис. 1.5). Вказану компоновку також називають «Ножиці».

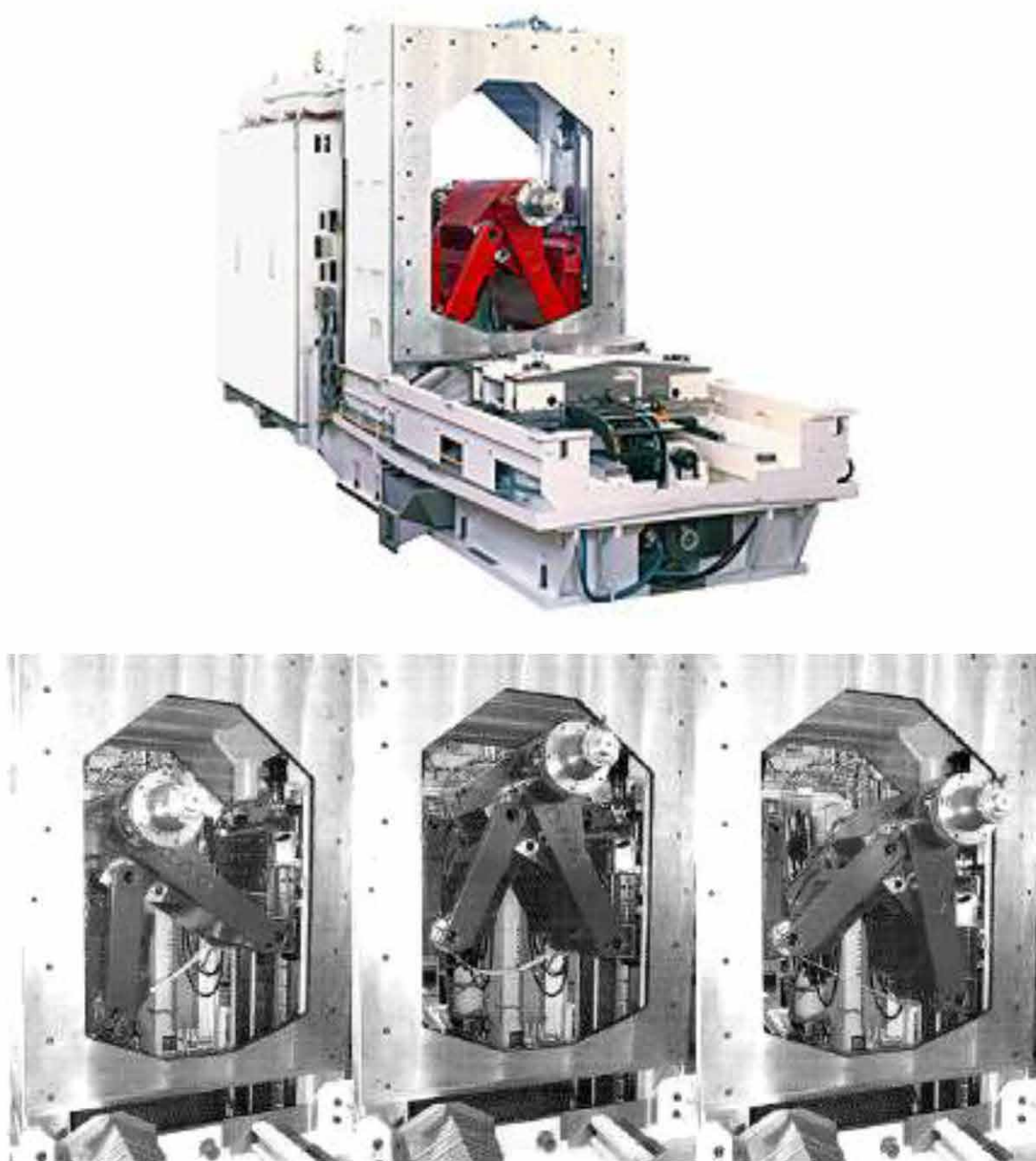


Рис. 1.5. Верстат мод. HHV фірми HULLER HILLE (Німеччина)

Верстати з трьома кінематичними ланками – **триподи** дозволяють повніше використовувати всі переваги механізмів з паралельною кінематикою. Так, наприклад, відпадає необхідність обов'язкового використання елементів верстатів традиційного виконання (окремих приводів

за деякими координатами). Усі необхідні рухи (у даному випадку – три) реалізуються верстатом-триподом.

На рисунку 1.6 зображено 3-осьовий вертикальний обробний центр. Вихідна ланка 1, оснащена мотор-шпинделем, з'єднана зі станиною трьома кінематичними ланцюгами. Кожен ланцюг складається з пари штанг постійної довжини 3 та приводів штанг 2, які базуються на лінійних двигунах. Штанги приєднані до приводів та вихідної ланки за допомогою карданних шарнірів 4. Використання парних штанг підвищує жорсткість механізму, проте додаткові з'єднання обмежують рухливість вихідної ланки до трьох ступенів свободи.

Функціональність цього обладнання можна розширити, встановивши додатковий привід верстатного столу.

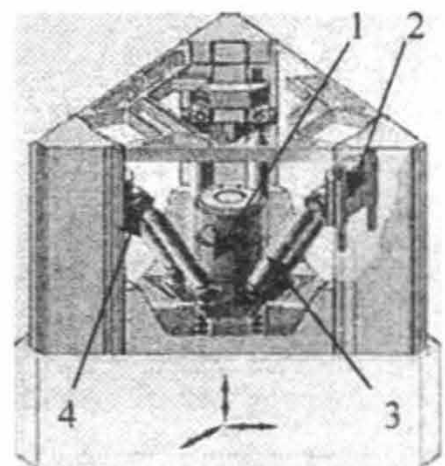
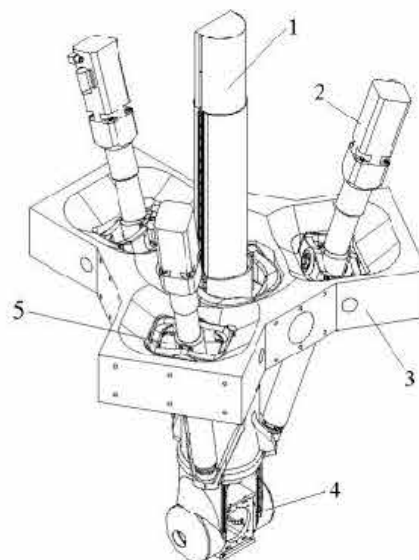


Рис. 1.6. Верстат з паралельною кінематикою мод. INDEX V 100

Верстат-трипод мод. Tricept 805 (рис. 1.7) [5] виконаний з трьома штангами змінної довжини 2, що з'єднані з шестикутною рамою 3 за допомогою карданних підвісів 5. На нижніх кінцях штанг розташовані сферичні шарніри, з'єднані з робочою платформою 4. Платформа має п'ять ступенів вільності (3 ступені – від триподу та 2 – за рахунок вбудованих додаткових осей).



а



б

Рис. 1.7. Верстат-трипод мод. TRICEPT 805 фірми NEOS ROBOTICS AB: а – загальний вигляд; б – схема

Верстати паралельної кінематики з чотирма ступенями вільності (з чотирма кінематичними ланками) у машинобудуванні мають дуже обмежене застосування. Одним з прикладів технологічного устаткування за схемою **квадроподу** наведена на рис. 1.8 наведена схема верстата на основі квадропода, а на рис. 1.9 – загальний вигляд верстата.

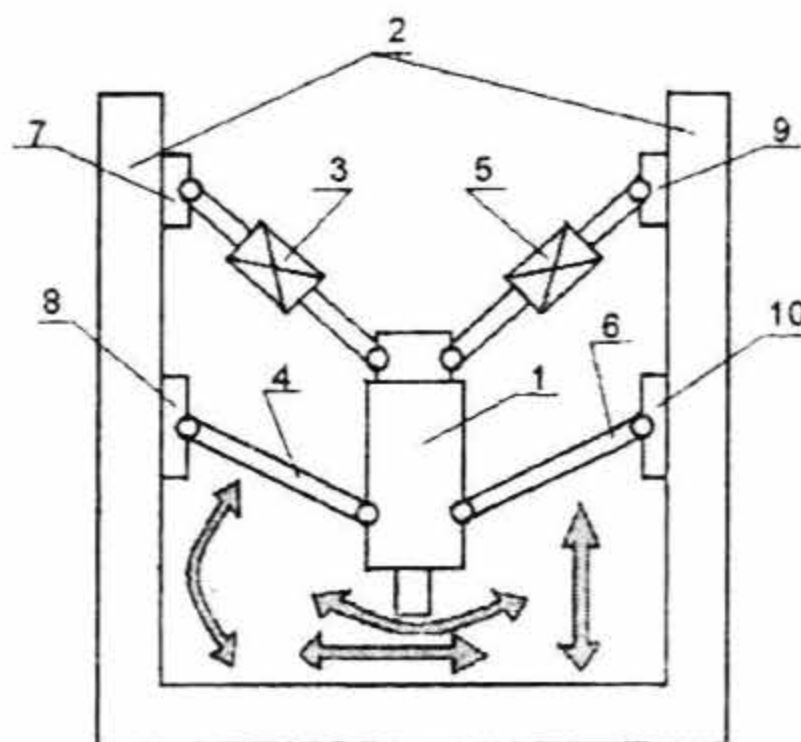


Рис. 1.8. Схема верстата на основі квадропода

В цьому верстаті вихідна ланка 1 пов'язана з двома напрямними стійками 2 за допомогою кінематичних ланок постійної довжини 4 і 6, а також кінематичними ланками змінної довжини з приводами 3 і 5. Ланки 4 і 6 з'єднані з повзунами 8 і 10, які переміщуються по напрямним. Кінематичні ланки змінної довжини з приводами 3 і 5 з'єднані зі стійкою шарнірами 7 і 9. Таким чином, паралельна вихідній ланці забезпечується чотири ступені вільності.



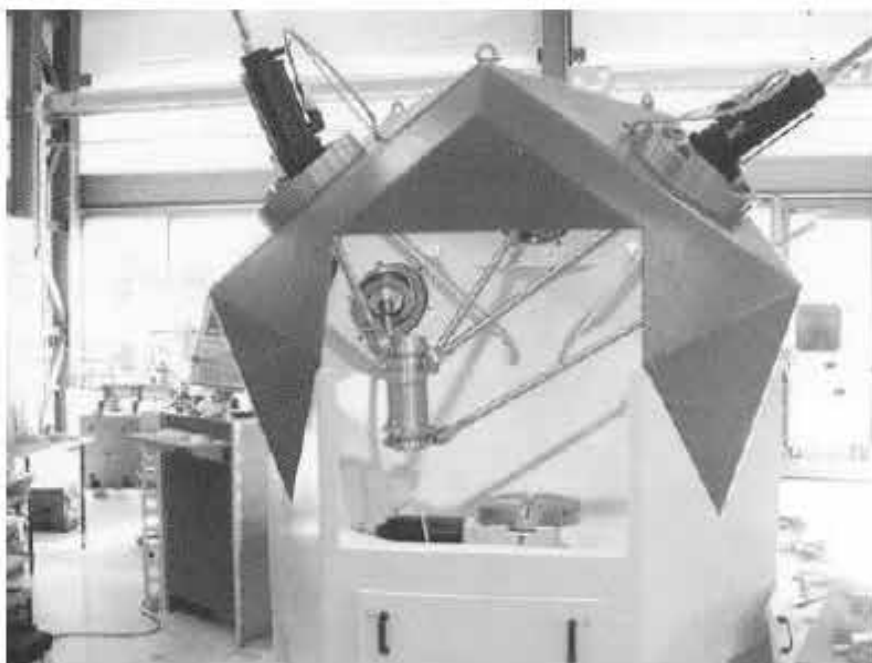
Рис. 1.9. Верстат-квадропод

Технологічне обладнання на основі **пентаподів** має великі технологічні можливості.

Верстат-пентапод мод. P800 фірми METROM [5] (рис. 1.10) має п'ять кінематичних ланок змінної довжини, завдяки чому може виконувати п'ятикоординатне фрезерування.

Розміри робочого простору верстата $630 \times 630 \times 500$ мм. Габаритні розміри верстата (без штанг) $2100 \times 2300 \times 2300$ мм. Робоча зона верстата наведена на рис. 1.10, б.

Особливе розміщення штанг (рис. 1.10, в) дозволяє повертати робочий орган під будь-яким кутом від вертикального до горизонтального положення.



а



б



в

Рис. 1.10. Верстат-пентапод мод. Р 800 фірми METROM (Німеччина):
а – загальний вид, б – робоча зона, в – розміщення штанг на робочому органі

Верстати з шістьма кінематичними ланками змінної довжини (**гексаподи**) найбільшою мірою реалізують всі переваги механізмів з паралельною кінематикою. Відносно проста конструкція забезпечує високу жорсткість і дозволяє орієнтувати вихідну ланку по шести ступенях вільності. Схема верстата-гексапода показана на рис. 1.11 [6], а шпиндельний вузол – на рис. 1.12.

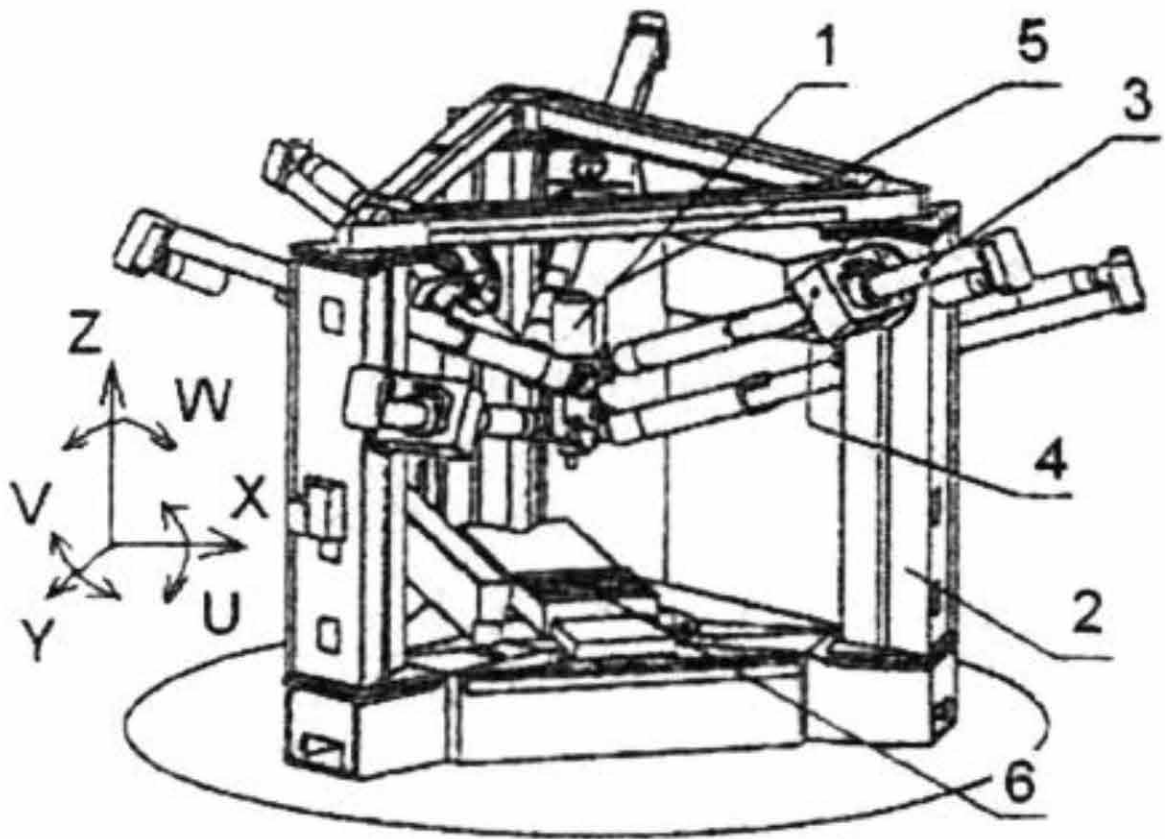


Рис. 1.11. Схема верстата-гексапода

Вихідна ланка 1 з'єднана з основою 2 шістьма кінематичними зв'язками. Кожен зв'язок складається з кінематичної ланки змінної довжини 3, оснащеної приводом. Штанги кріпляться до станини за допомогою карданних шарнірів 4, які забезпечують два ступені свободи. До вихідної ланки 1 штанги приєднані сферичними шарнірами 5. Така конструкція надає вихідній ланці шість ступенів свободи: можливість переміщення вздовж трьох осей координат та обертання навколо них. Додатковий привід 6 для переміщення столу розширює функціональні можливості обладнання.

На сьогодні у світі реалізовано понад 30 різних компоновок верстатів із паралельною кінематикою, переважну більшість яких складають триподи та гексаподи внаслідок їх універсальності. Гексаподи можна розглядати як альтернативу «традиційним» 5-ти координатним верстатам, а триподи – 3-х координатним. Триподи мають простішу конструкцію і їх легше пристосувати

до практичного застосування, ніж гексаподи. Витрати на конструктивну розробку та виготовлення гексаподу суттєво вищі, ніж для триподу.

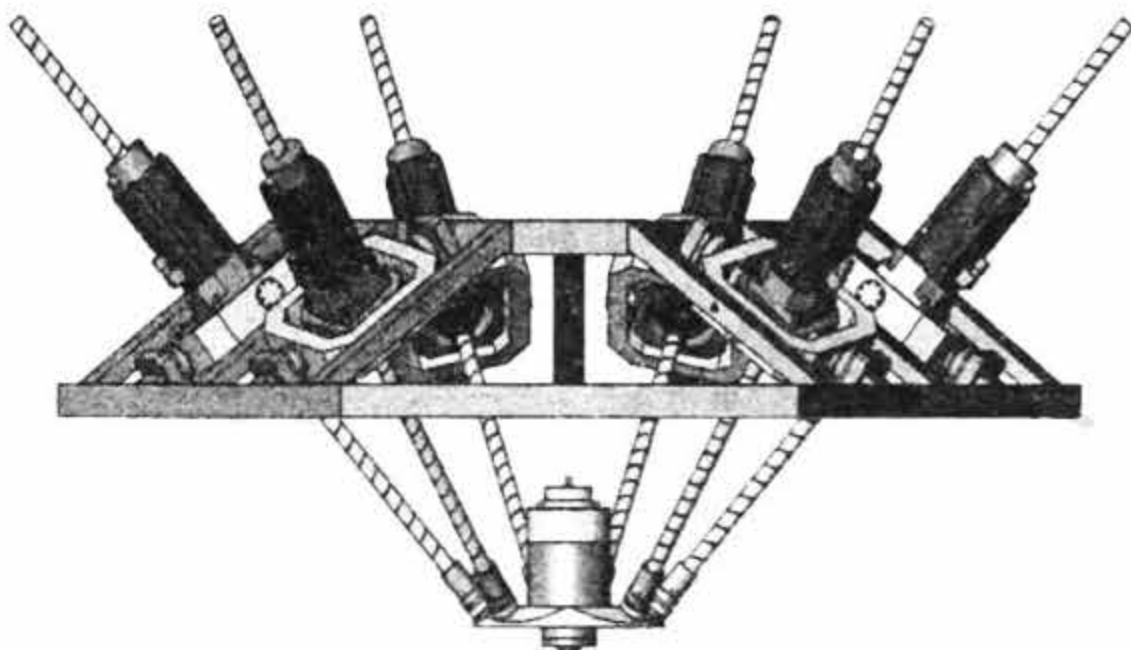


Рис. 1.12. Шпиндельний вузол верстата-гексапода

Найбільшого поширення набули технологічні машини, засновані на стрижневій конструкції (платформі Стюарта). Тісна співпраця верстатобудівних фірм, наукових та навчальних інститутів, а також розробників систем ЧПУ дозволила останнім часом створити велику кількість нових верстатів цього типу:

- гексапод із нерегульованими по довжині штангами;
- верстат із паралельною кінематикою, оснащений лінійними двигунами;
- горизонтальний гексапод із регульованими по довжині штангами та ін.

Застосування уніфікованих вузлів (шарнірів, штанг, мотор-шпинделів, багатокоординатних шпиндельних головок та столів) значно спрощує виробництво таких верстатів.

РОЗДІЛ 2

ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КІНЕМАТИЧНИХ СХЕМ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ

2.1. Основні характеристики кінематичних схем верстатів

Для оцінки технологічного обладнання з паралельною кінематикою (яке, в залежності від типу встановленого виконавчого органу, можуть виконувати функції верстата або маніпулятора) можна застосувати ті ж методи і параметри, що й для промислових роботів [12, 13]:

1. Кількість ступенів рухомості. Ця характеристика визначає кількість незалежних рухів обладнання (кількість рухомих ланок і кінематичних пар), і дає узагальнюючу оцінку можливих рухів технологічного обладнання.

2. Робочий простір технологічного обладнання. Це простір, в якому виконуючий пристрій може виконувати рухи при функціонуванні технологічного обладнання.

3. Робоча зона технологічного обладнання. Ці зони відрізняються розмірністю, об'ємністю, формою, загальною величиною.

Розмірність робочої зони визначається кількістю координат, які описують робочу зону. Робочі зони можуть бути одновірні, двовірні, тривірні тощо. По ступеню об'ємності зони можуть бути: лінійні (одновірні), площинні (двовірні), об'ємні (трьох- і більш вірні).

Форма робочих зон визначається числом ступенів рухомості або складом використовуваних кінематичних пар, видом їх рухів, послідовністю розташування пар і взаємною направленістю рухів. При одній розмірності і об'ємності може бути багато форм робочих зон. Кількість таких форм зростає при збільшенні числа ступенів рухомості. Величина робочої зони залежить від довжини та переміщень кінематичних ланок.

Абсолютна величина робочої зони не дає повної оцінки компоновки технологічного обладнання. Важливим додатковим параметром до абсолютної

величини робочої зони є оцінка відносної величини переміщення, яку розглядають як відношення величини робочої зони до робочого простору обладнання.

4. **Орієнтуючі можливості.** Ця оцінка визначає можливість технологічного обладнання змінювати просторову орієнтацію робочого органу чи інших ланок.

5. **Рухові можливості.** Цей показник характеризує сумарну можливість технологічного обладнання по переміщенню і орієнтації робочого органу чи іншої ланки.

2.2. Аналіз верстатів за критеріями гнучкості та рухових можливостей

Гнучкість (тобто здатність системи адаптуватися до виготовлення виробів змінної номенклатури) – це одна з важливих характеристик верстатів з паралельною кінематикою. Можна виділити наступні параметри гнучкості [13]:

- універсальність (потенційні можливості адаптації);
- мобільність (час адаптації при переході на виготовлення виробу іншого виду чи типорозміру).

Таким чином, кількісну характеристику гнучкості можна визначити за формулою:

$$G = K_y \cdot K_m,$$

де K_y – коефіцієнт універсальності;

K_m – коефіцієнт мобільності.

Коефіцієнт універсальності залежить від кількості різних робочих станів системи і розраховується за формулою:

$$K_y = 1 - \frac{1}{n},$$

де n – кількість робочих (функціональних) станів, яких може набувати система.

Збільшити цей коефіцієнт можна за рахунок збільшення рухомості виконавчого органу технологічного обладнання.

Коефіцієнт мобільності характеризує час переналагодження технологічного обладнання на роботу з іншими деталями:

$$K_m = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n T_{ni} / \sum_{i=1}^n T_i P_i},$$

де T_{ni} – час переналагодження ВПК для роботи з деталлю i -го типорозміру;

T_i – час обробки деталі i -го типорозміру;

P_i – величина партії запуску деталі i -го типорозміру;

n – кількість видів та типорозмірів деталей, які може обробляти верстат.

Підвищити коефіцієнт мобільності можна, якщо забезпечити швидке переналагодження верстату на обробку інших деталей.

Верстат-гексапод є системою високорухомою, тому для оцінки його функціональних можливостей можна використати узагальнений показник рухових можливостей K_p [12, 13], який є добутком коефіцієнта переміщень K_n на коефіцієнт орієнтуючих можливостей C :

$$K_p = K_n \cdot C.$$

Коефіцієнт K_n дорівнює відношенню реального переміщення виконавчого органу до теоретично можливого, а коефіцієнт C характеризує можливість орієнтації виконавчого органу відносно власної осі (нахили та повороти).

Очевидно, що реальні переміщення виконавчого органу завжди будуть меншими, ніж теоретично можливі, що обумовлено наявністю обмежень, пов'язаних з конструктивним виконанням основних елементів верстату.

Теоретично можливі рухи виконавчого органу визначаються для ідеального верстата, в якому рух конструктивно не обмежений.

Аналіз верстатів можна виконати за критерієм робочого простору з урахуванням коефіцієнту використання робочого простору у загальному об'ємі верстата [12]:

$$K_v = \frac{V_{\text{рп}}}{V_B},$$

де $V_{\text{рп}}$ – об'єм робочого простору;

V_B – загальний об'єм верстата.

Як відомо, один із основних недоліків верстатів-гексаподів полягає в нераціональному співвідношенні об'єму робочого простору до загального об'єму верстата. Так, верстати традиційної компоновки мають коефіцієнт $K_v = 0,01 \div 0,3$, а верстати-гексаподи – $K_v = 0,001 \div 0,02$.

Отже, збільшення величин показника рухових можливостей K_p і коефіцієнту використання робочого простору K_v є актуальною науковою задачею.

РОЗДІЛ 3

РУХОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕРСТАТІВ-ГЕКСАПОДІВ

3.1. Показники рухових характеристик верстатів-гексаподів

Компоновки верстатів-гексаподів засновані на використанні механізмів паралельної структури, конструктивних варіантів яких існує велика кількість. Застосування в компоновках додаткових механізмів для здійснення рухів, можна отримати велику кількість різноманітних компоновочних рішень верстатів-гексаподів (рис. 3.1). Для відбору і аналізу цих компоновок по функціональним можливостям можна використовувати показник (коефіцієнт) рухових можливостей K_p [12, 13], який є добутком показника переміщень (K_n) на коефіцієнт орієнтуючих можливостей (сервіс – C):

$$K_p = K_n \cdot C.$$

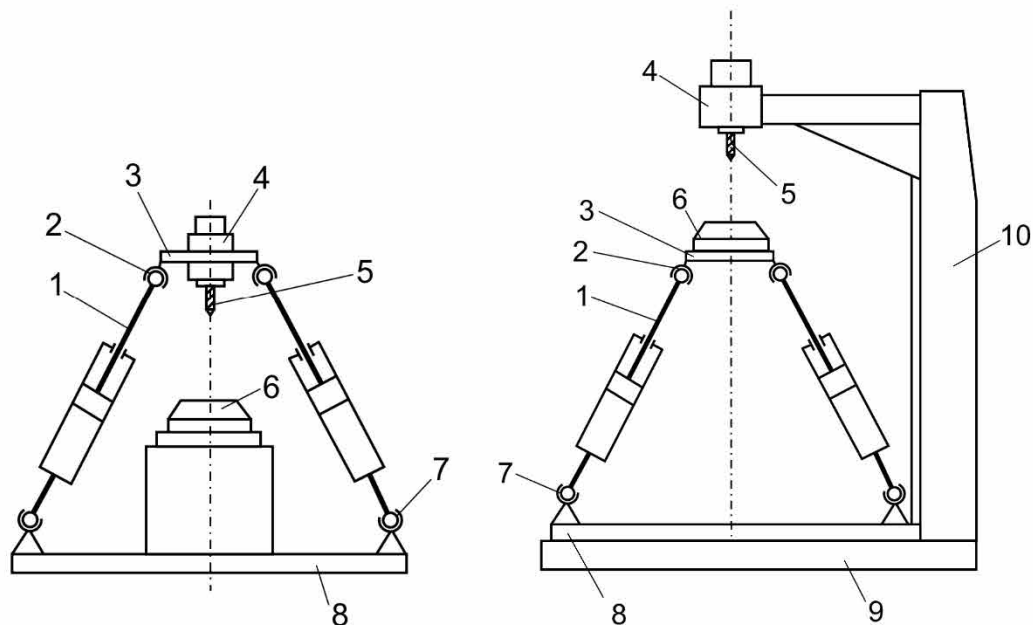


Рис. 3.1. Схеми варіантів верстатів з паралельною кінематикою:

- 1 – рухомі кінематичні ланки; 2, 7 – опорні шарніри; 3 – виконавчий орган;
 4 – шпиндельний вузол; 5 – ріжучий інструмент; 6 – оброблювана деталь;
 8 – несуча система; 9, 10 – станина

Показник переміщення визначається як співвідношення фактичної величини руху виконавчого органу механізму паралельної структури до теоретично можливої. Цей показник можна оцінювати при русі виконавчого органу вздовж ліній, по площинах або в об'ємі. Аналіз можливих поступальних рухів механізмів паралельної структури є важливим, оскільки ці рухи у верстатах забезпечують як сам процес обробки, так і установчі переміщення виконавчого органу для досягнення необхідної точності виготовлення деталі.

Оцінку цих переміщень в загальному випадку проводитимемо відносно точки "О", яка збігається з центром виконавчого органу (або іншим елементом верстата - різальним інструментом, оброблюваною деталлю) і розташована на осі симетрії виконавчого органу механізму в початковому положенні. Зокрема, при русі виконавчого органу вздовж лінії симетрії механізму коефіцієнт переміщення буде визначатися за формулою (рис. 3.2, а):

$$K_{nl} = \frac{l}{L},$$

де l – величина реального переміщення в заданому напрямку;

L – теоретично можлива величина, що може реалізуватись ідеальним механізмом без конструктивних обмежень. В даному випадку вона визначається максимальною довжиною кінематичних ланок.

Таким чином можна оцінювати можливості лінійних переміщень в будь-яких напрямках (рис. 3.2, б).

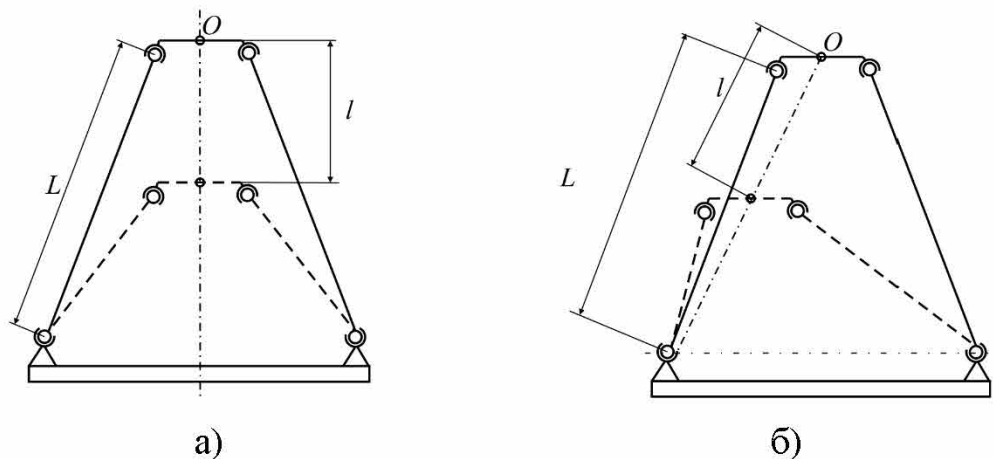


Рис. 3.2. Схема переміщень ВО по лінії

При переміщенні виконавчого органу у площині (рис. 3.3, а) коефіцієнт переміщення можна визначити за формулою:

$$K_{nn} = \frac{f}{F},$$

де f – реально можлива величина переміщення (площини) центру виконавчого органу;

F – теоретично можлива величина переміщення, яка реалізується ідеальним механізмом з максимальною довжиною кінематичних ланок та з умовою обмеження рухів лінією симетрії опор несучої системи.

Оцінку таких переміщень можна виконувати в будь-яких площинах, які проходять через вісь симетрії механізму паралельної структури або, наприклад, перпендикулярних до осі симетрії. Ця умова наведена відповідно до перетину А-А (рис. 3.3, а), для якого площа переміщень згідно з зазначеними умовами показана на рис. 3.3, б.

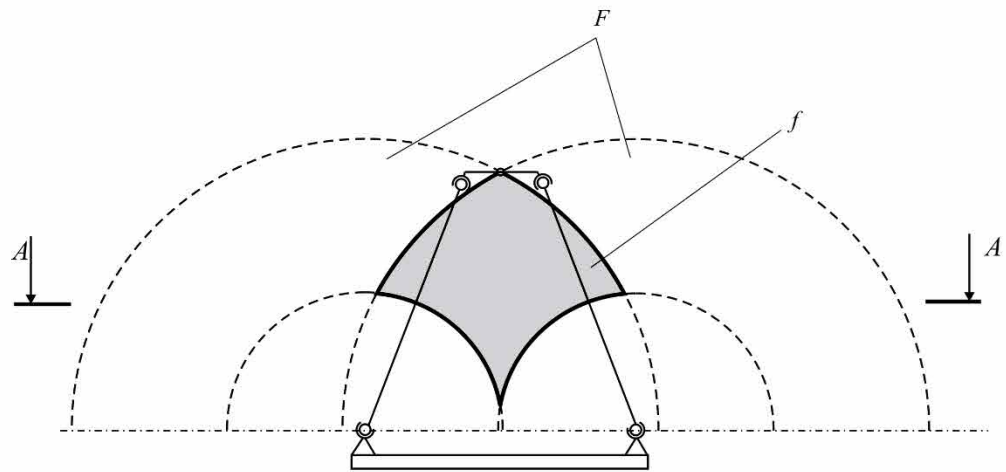
При переміщенні виконавчого органу в об'ємі:

$$K_{no} = \frac{v}{V},$$

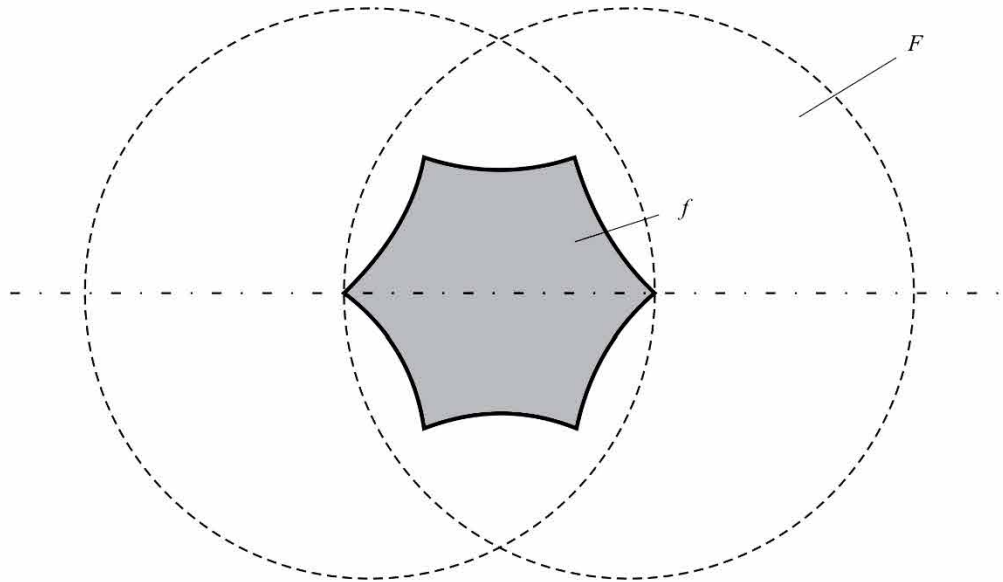
де v – об'єм робочого простору, в межах якого може переміщуватись центр виконавчого органу;

V – теоретично можливий об'єм переміщення. Величина цього простору наведена на рис. 3.4.

Таким чином, можна оцінити ефективність конструкції механізму паралельної структури у плані здійснення максимально можливих переміщень виконавчого органу.



a)
A-A



б)

Рис. 3.3. Схема переміщень виконавчого органу у площині

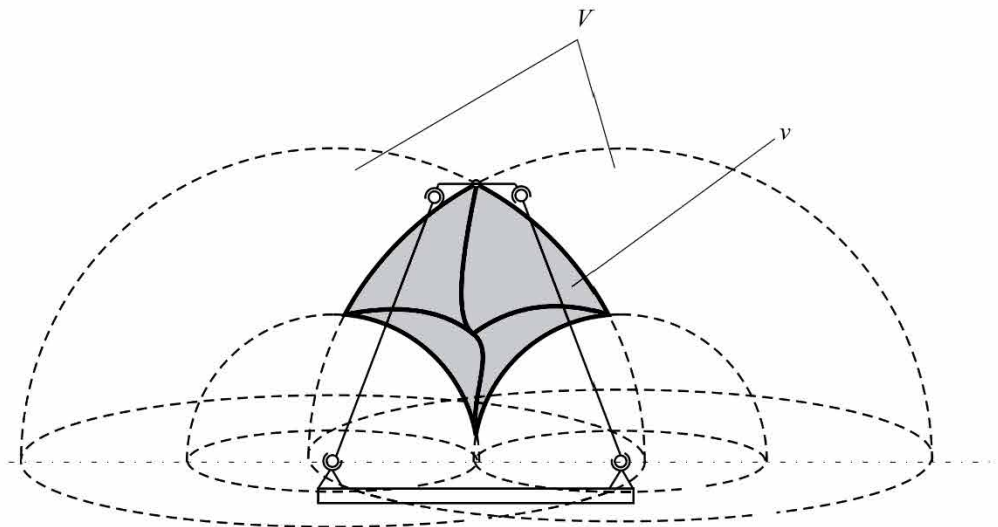


Рис. 3.4. Схема переміщень виконавчого органу в об'ємі

Орієнтуючі рухи є ще однією важливою складовою загальних рухів механізмів паралельної структури. Вони необхідні для забезпечення заданої орієнтації різального інструмента або оброблюваної деталі. Ці рухи можна охарактеризувати через орієнтацію (нахил) виконавчого органу (C_o) або нахил його осі симетрії. Крім того, важливо визначити можливість орієнтації (повороту) виконавчого органу (C_n) навколо його осі. Загальну оцінку орієнтуючих рухів виконавчого органу можна визначити за допомогою показника загальних орієнтуючих можливостей, який враховує обидва типи орієнтації:

$$C = C_o \cdot C_n.$$

Аналіз орієнтуючих рухів можливий як для окремих позицій у робочому просторі, так і під час руху виконавчого органу лінійно, площинно чи об'ємно. Дослідження орієнтуючих рухів починається з їх визначення у конкретній точці робочого простору, що співпадає з центром виконавчого органу. При цьому, оцінювання кута нахилу виконавчого органу в одній з основних площин здійснюється за допомогою функції сервісу осі:

$$C_o = \frac{\alpha}{2\pi},$$

де α – кут можливого нахилу виконавчого орган або кут нахилу осі його симетрії (рис. 3.5, а).

Поворот виконавчого органу (φ) відносно власної осі при довільному значенні кута α в даній точці (рис. 3.5, б) є функцією значення α . Це вказує на те, що для кожного положення виконавчого органу буде своє значення кута φ . Тоді середнє значення кута φ у межах зміни кута α буде:

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{\alpha_{(\alpha)}} \int f(\alpha) d\alpha,$$

де α – максимальний кут, у межах якого визначається кут φ .

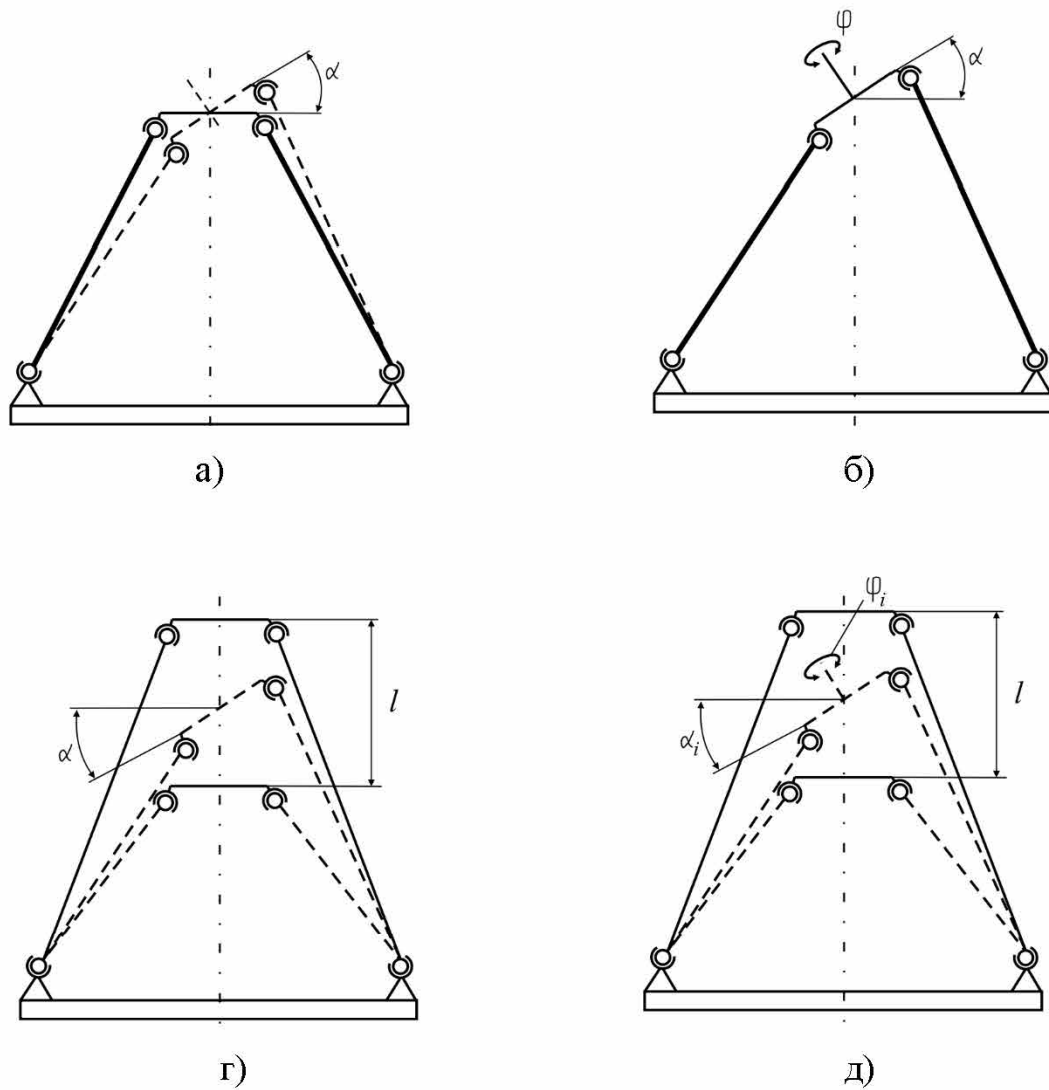


Рис. 3.5. Схеми орієнтуючих рухів при переміщенні виконавчого органу в точці та по лінії

Показник орієнтації рухомої площини відносно власної осі позначимо

$$C_n = \frac{\varphi}{2\pi},$$

а середнє значення

$$\bar{C}_n = \frac{\bar{\varphi}}{2\pi},$$

тоді підсумкове середнє значення орієнтуючих рухів у межах можливої осьової орієнтації (α) буде:

$$\overline{C}_n = \frac{1}{\alpha_{(\alpha)}} \int C_n d\alpha.$$

У даній формулі величина C_n визначається як функція зміни кута φ від кута α . Відповідна умова приймається і в інших варіантах оцінки орієнтуючих рухів.

При переміщенні центра виконавчого органу по лінії (l) значення сервісу C_o в досліджуваній площині також визначається як середня величина, тому що кожному положенню центра виконавчого органу по лінії l буде відповідати своє значення кута α (рис. 3.5, в). Тоді

$$\overline{C}_o = \frac{1}{l_{(l)}} \int C_o dl,$$

де l – величина переміщення центра виконавчого органу по досліджуваній лінії.

Значення сервіса повороту виконавчого органу (C_n) в даному випадку залежить від положення центра виконавчого органу по лінії l і від значення кута α в цій точці (рис. 3.5, д). Відповідно, цей показник також визначається як середня величина:

$$\overline{C}_n = \frac{1}{l_{(l)}} \int C_o dl \frac{1}{\alpha_{(\alpha)}} \int C_n d\alpha$$

Тоді середня величина повного сервісу становитиме:

$$\overline{C} = \overline{C}_o \cdot \overline{C}_n$$

При переміщенні центра виконавчого органу в одній з досліджуваних площин орієнтуючі можливості також визначаються як середні величини по величині цієї площини (f). Так, осьовий сервіс (рис. 3.6, а) буде:

$$\bar{C}_o = \frac{1}{f} \int_{(f)} C_o df.$$

Величина сервіса повороту виконавчого органу (рис. 3.6, б):

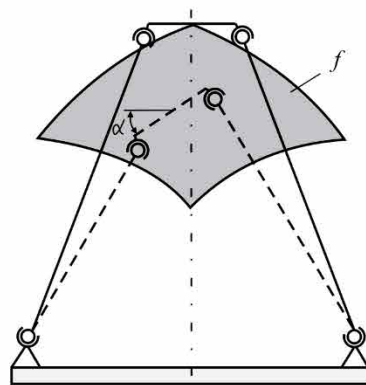
$$\bar{C}_n = \frac{1}{f} \int_{(f)} df \int_{(\alpha)} C_n d\alpha.$$

Загальні орієнтуючі можливості механізму визначаються при переміщенні його виконавчого органу в об'ємному просторі. Тобто, коли $\bar{C}_o$ і $\bar{C}_n$ визначаються як середня інтегральна сума по всьому об'єму v (рис. 3.6, в).

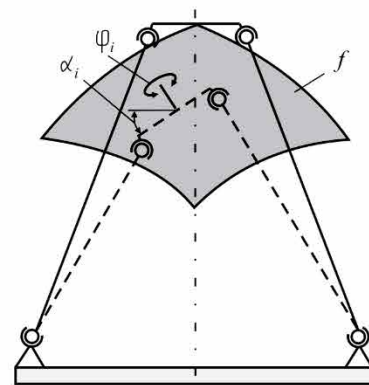
Тоді

$$\bar{C}_o = \frac{1}{v} \int_{(v)} C_o dv,$$

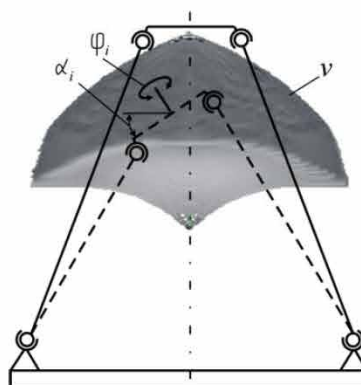
$$\bar{C}_n = \frac{1}{v} \int_{(v)} dv \int_{(\alpha)} C_n d\alpha.$$



а)



б)



в)

Рис. 3.6. Схеми орієнтуючих рухів при переміщенні виконавчого органу по площині (а, б) і в об'ємі (в)

В загальному випадку рухові можливості визначаються з урахуванням реальних переміщень та орієнтації виконавчого органу:

$$K_p = K_n \cdot C.$$

Наведений показник має місце при наявності двох співмножників, а в окремих випадках дослідження можуть виконуватись по окремих складових: K_n , C_o , C_n та C . Пропонується визначати ці показники, змінюючи в межах від 0 до 1, що зручно для виконання порівняльного аналізу. Все це дозволяє зробити обґрунтований вибір доцільних варіантів механізмів паралельної структури із найбільш прийнятними конструктивними параметрами.

3.2. Аналіз переміщень виконавчого органу гексапода по осі його симетрії

Одним з важливих питань проектування верстатів з паралельною кінематикою є визначення найбільш доцільних конструктивних параметрів, які дозволяють верстату ефективно виконувати своє функціональне призначення. Лінійні переміщення виконавчого органу при виконанні технологічних операцій є типовими технологічними рухами, які забезпечують рухи подачі, допоміжні переміщення ріжучих інструментів та деталей для забезпечення необхідного їх відносного розміщення тощо.

Розглянемо переміщення виконавчого органу у вертикальному напрямку по осі симетрії верстата за розрахунковою схемою (рис. 3.7) та показником переміщень по лінії [13]:

$$K_{nl} = \frac{l}{L}.$$

Позначення на схемі:

a, b – розмір нерухомої несучої системи та виконавчого органу відповідно;

L – максимальна довжина кінематичних ланок;

l_1 – поточна (чи мінімальна) довжина кінематичних ланок;

l – величина переміщення виконавчого органу по осі симетрії верстата;

H, h – максимальна та поточна (чи мінімальна) величина переміщення виконавчого органу відповідно;

β, γ – кути нахилу кінематичних ланок;

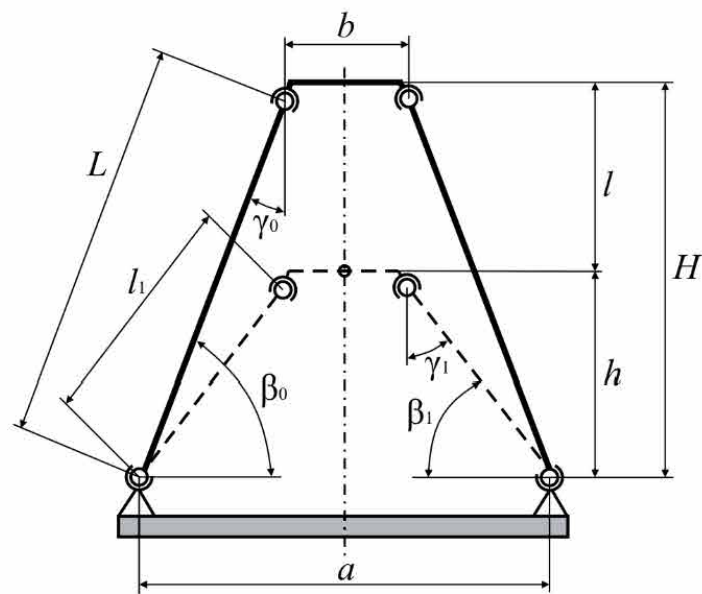


Рис. 3.7. Розрахункова схема гексапода

«Розміри a, b визначаються з врахуванням кількості і положення шарнірів на нерухомій несучій системі (N) та виконавчому органі (S) (рис. 3.8). Так як рухи виконавчого органу визначаємо в площині, а шарніри розміщені в просторі, то за розмір a і b приймаємо відстань між шарнірами на проекції шарнірів на площину (рис. 3.9).

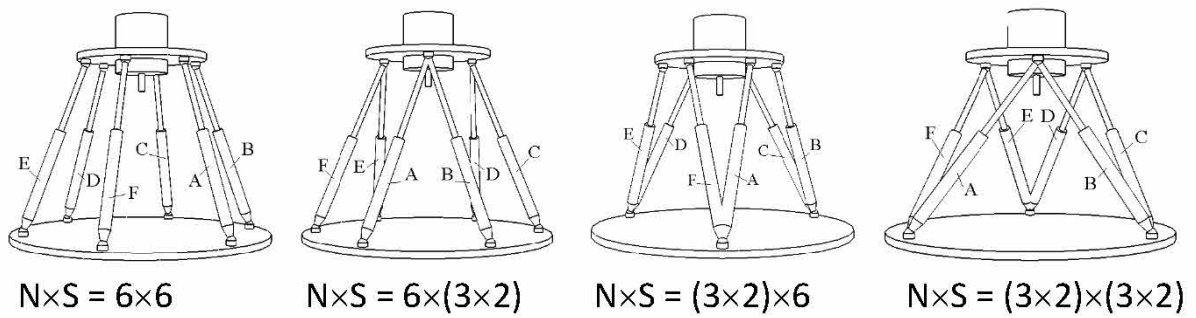


Рис. 3.8. Розміщення шарнірів на несучій системі і виконавчому органі

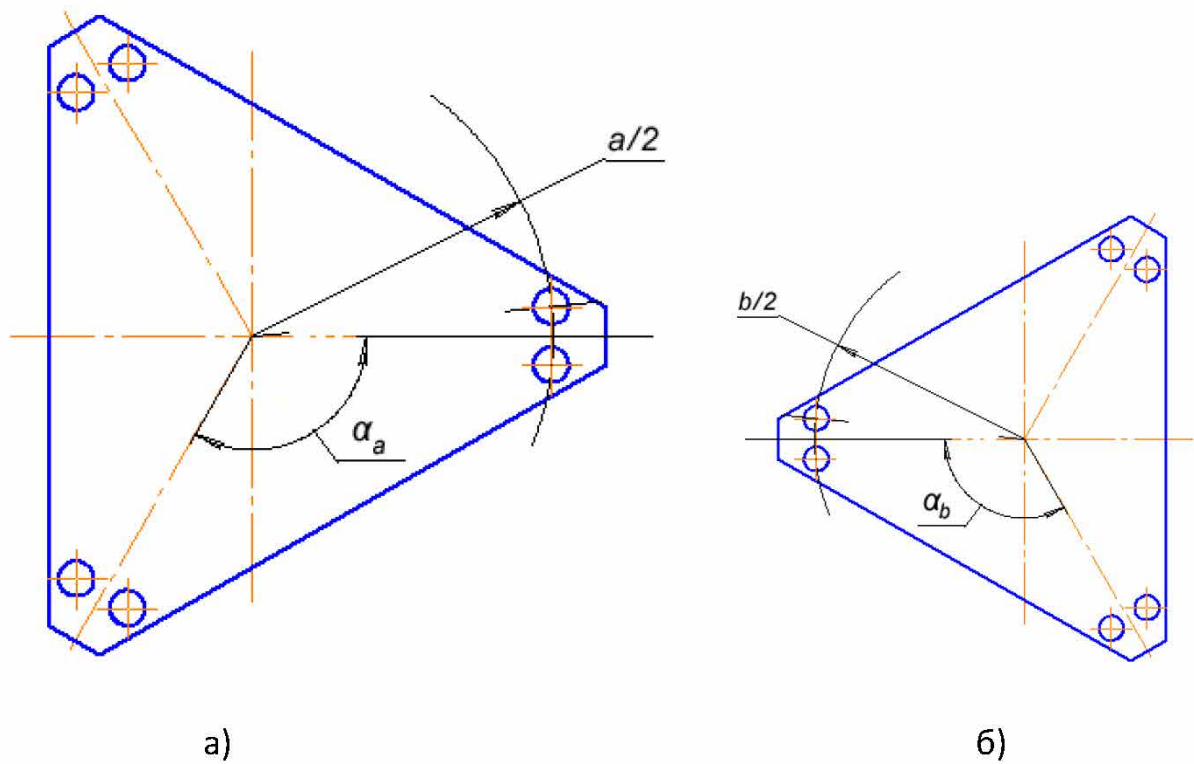


Рис. 3.9. Конструктивні параметри платформи:

а) несуча система; б) виконавчий орган

Тоді, в загальному вигляді максимальна величина положення виконавчого органу буде:

$$H^2 + \left(\frac{a \cdot \cos \alpha_a - b \cdot \cos \alpha_b}{2} \right)^2 = L^2,$$

звідки

$$H = \sqrt{L^2 - \left(\frac{a \cdot \cos \alpha_a - b \cdot \cos \alpha_b}{2} \right)^2}.$$

Введемо позначення:

– співвідношення розмірів виконавчого органу та несучої системи:

$$n = \frac{b + b \cdot \cos \alpha_b}{a + a \cdot \cos \alpha_a} = \frac{b \cdot (1 + \cos \alpha_b)}{a \cdot (1 + \cos \alpha_a)};$$

– співвідношення розмірів несучої системи та довжини кінематичних ланок:

$$m = \frac{a \cdot (1 + \cos \alpha_a)}{2L}.$$

Підставивши значення, отримаємо:

$$H = \sqrt{L^2 - \left(\frac{1-n}{2}\right)^2 a^2} = L \sqrt{1 - m^2 \left(\frac{1-n}{2}\right)^2}.$$

Поточна (або мінімальна) величина положення виконавчого органу визначається аналогічно:

$$h = \sqrt{l_1^2 - \left(\frac{a-b}{2}\right)^2}.$$

Введемо додаткове позначення: $i = l_1/L$.

Тоді:

$$h = L \sqrt{i^2 - m^2 \left(\frac{1-n}{2}\right)^2}.$$

Із наведених формул визначаємо величину переміщення виконавчого органу:

$$l = H - h = L \left(\sqrt{1 - m^2 \left(\frac{1-n}{2} \right)^2} - \sqrt{i^2 - m^2 \left(\frac{1-n}{2} \right)^2} \right).$$

В цих формулах позначимо складову $m \left(\frac{1-n}{2} \right) = c$. Вона залежить від співвідношення основних параметрів гексапода, тому її можна вважати основною конструктивною характеристикою верстата-гексапода.

Таким чином, рух виконавчого органу може бути визначений за формулою:

$$l = L \left(\sqrt{1 - c^2} - \sqrt{i^2 - c^2} \right).$$

Таким чином, вказана величина переміщень виконавчого органу залежить від довжини кінематичних ланок (L), величини їх відносного руху (i) та конструктивно-геометричних параметрів верстата-гексапода (c).

Вплив зазначених параметрів на показник переміщення виконавчого органу по лінії симетрії верстата показаний на графіках (рис. 3.10-3.12).

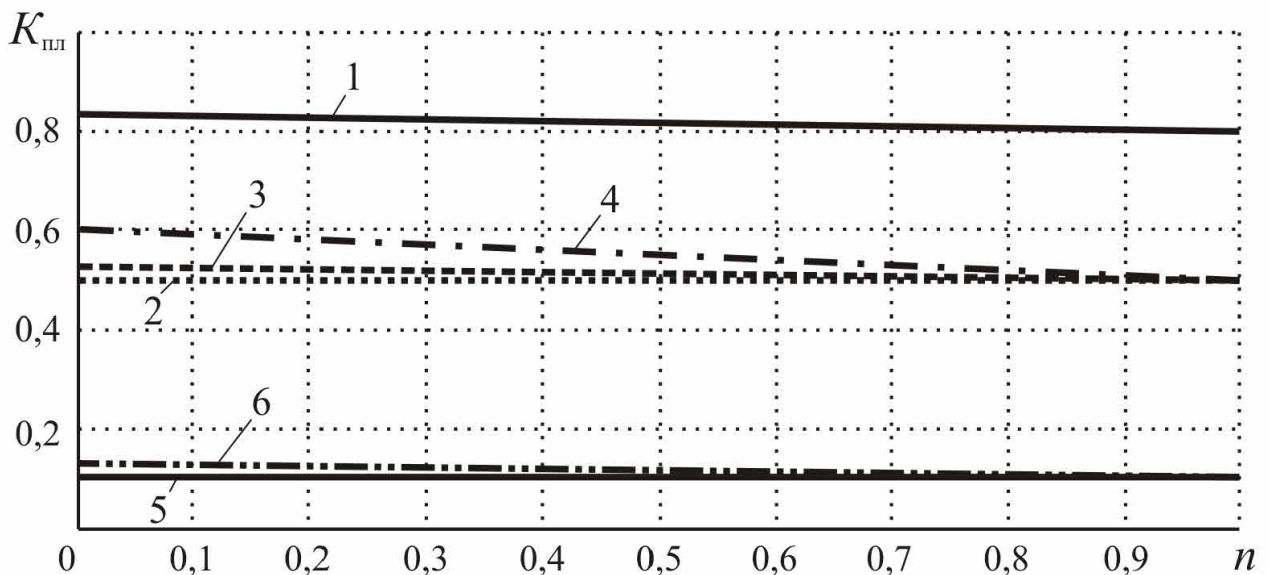


Рис. 3.10. Залежність величини переміщення $K_{пл}$ від зміни відношення розмірів ВО та несучої системи:

- 1) $i=0,2$; $m=0,2$; 2) $i=0,5$; $m=0,2$; 3) $i=0,5$; $m=0,5$; 4) $i=0,5$; $m=0,75$;
5) $i=0,9$; $m=0,75$; 6) $i=0,9$; $m=1,0$

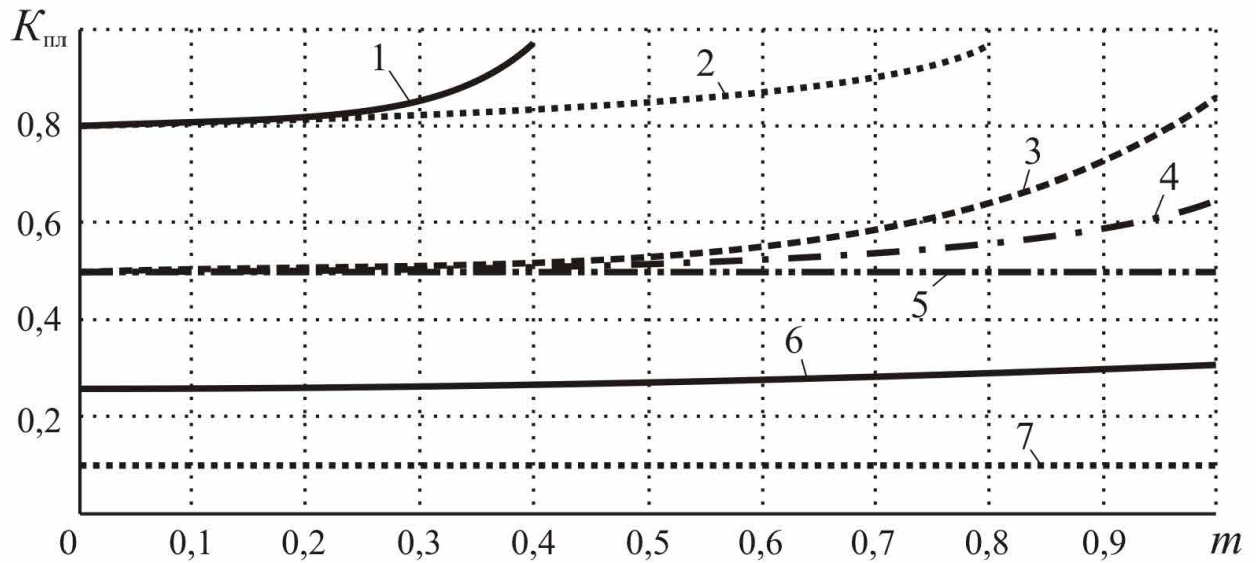


Рис. 3.11. Залежність величини переміщення $K_{пл}$ від зміни величини відношення розміру несучої системи до довжини кінематичних ланок:

- 1) $i=0,2$; $n=0,2$; 2) $i=0,9$; $n=0,5$; 3) $i=0,9$; $n=0,5$; 4) $i=0,5$; $n=0,5$;
5) $i=0,5$; $n=0,2$; 6) $i=0,9$; $n=0,75$; 7) $i=0,75$; $n=0,2$

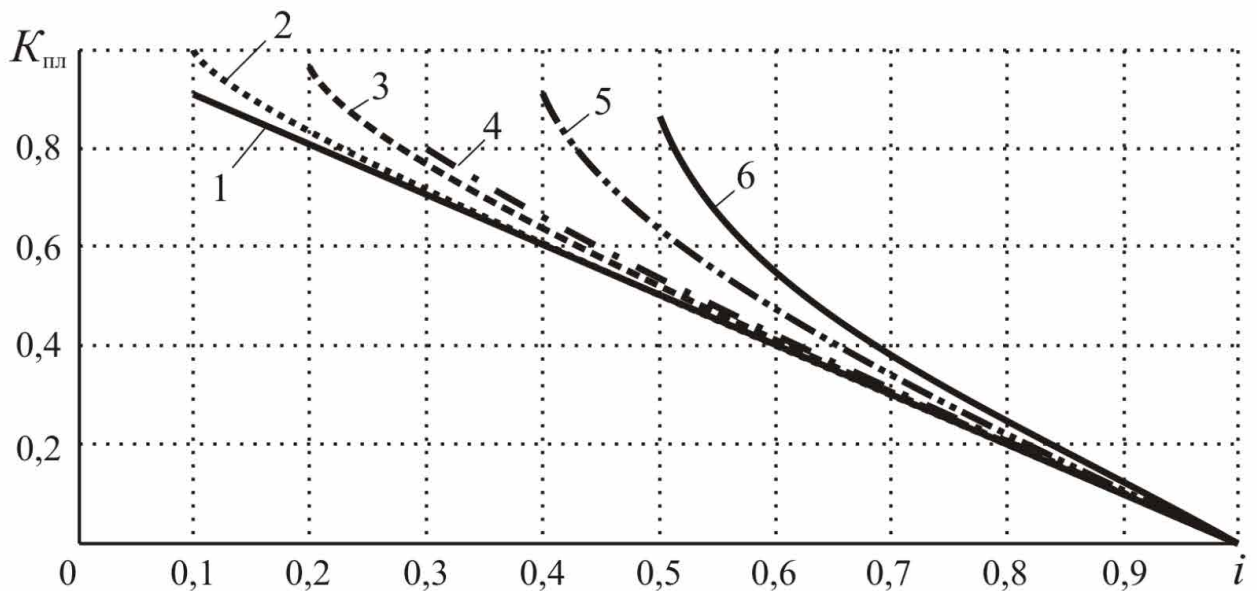


Рис. 3.12. Залежність величини переміщення $K_{пл}$ від відносної зміни величини довжин кінематичних ланок:

- 1) $m=0,2$ $n=0,2$; 2) $m=0,75$; $n=0$; 3) $m=0,7$; $n=0,75$; 4) $m=0,2$; $n=0$;
5) $m=1,0$; $n=0$; 6) $m=0,5$; $n=0$

Отримані залежності дозволяють визначити найбільш доцільні конструктивні виконання верстатів-гексаподів залежно від їх функціонального призначення. Таким чином, для верстатів, що здійснюють переважно вертикальні рухи вздовж осі його симетрії, необхідно, щоб співвідношення параметрів перебувало в межах $m = 0,6 \div 1,0$; $n = 0 \div 0,4$; $i = 0,2 \div 0,6$.

3.3. Оцінка рухових можливостей верстата-гексапода в поперечному напрямку

Однією з умов ефективного функціонування верстатів є здійснення ними типових технологічних рухів.

Розглянемо переміщення виконавчого органу в поперечному напрямку, коли не тільки рух, а й положення виконавчого органу перпендикулярні до осі симетрії гексапода [14]. На розрахунковій схемі (рис. 3.13) пунктирними лініями показано граничні положення виконавчого органу. Величина переміщення виконавчого органу визначається по руху центра рухомої платформи O або крайніх її точок A і B . Фактичне значення величини переміщення змінюється, починаючи від нульового положення виконавчого органу при максимальній довжині кінематичних ланок. Зміна положення виконавчого органу по висоті веде до збільшення величини його переміщення в перпендикулярному напрямку. При максимальному опусканні виконавчого органу безперервна величина поперечного його переміщення також буде максимальна.

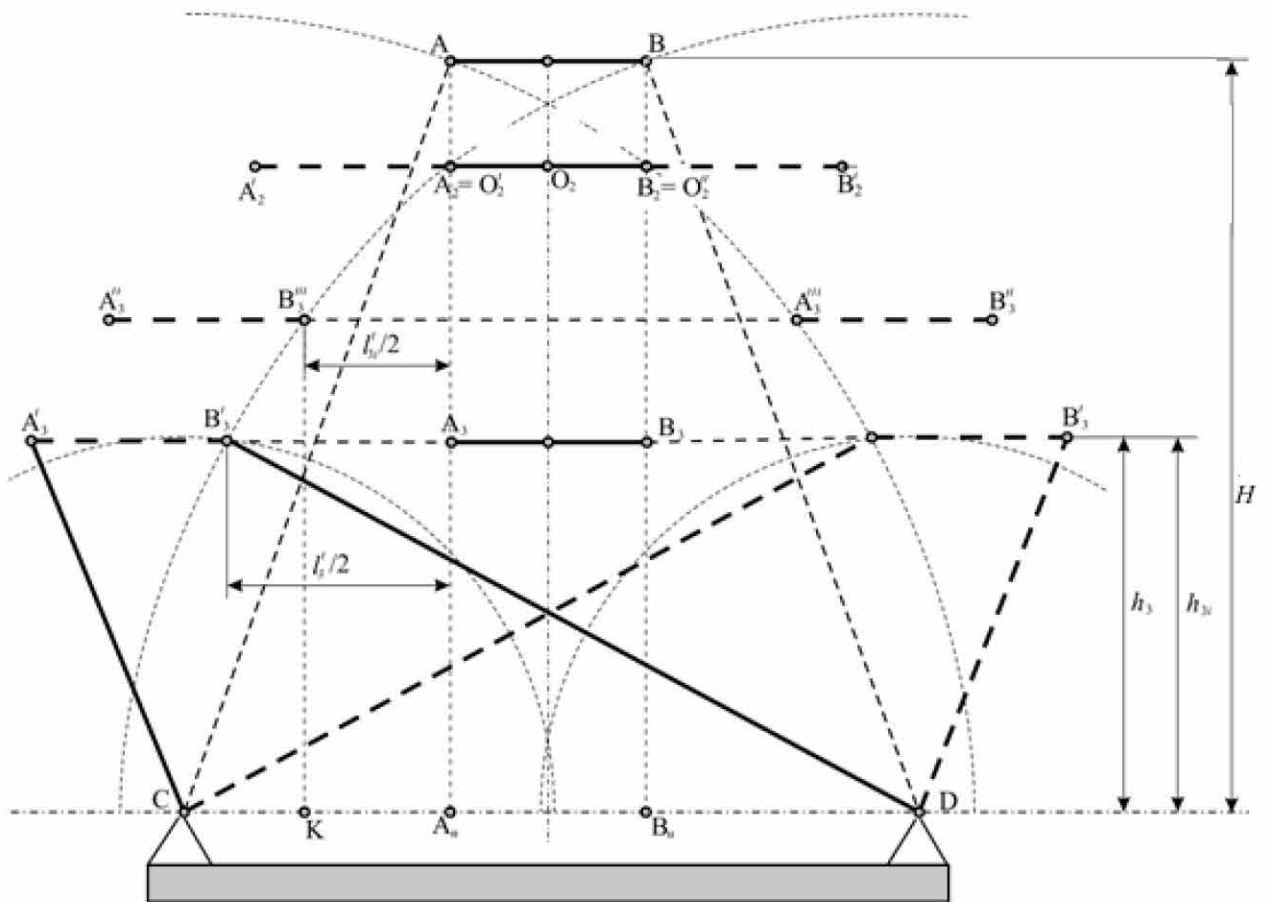


Рис. 3.13. Розрахункова схема переміщень виконавчого органу

Приймемо такі позначення:

a, b – розміри (діаметри розміщення шарнірів) несучої системи та виконавчого органу;

L – максимальна довжина кінематичної ланки;

H – величина вертикального положення (висота) виконавчого органу;

l_1 – поточна довжина кінематичної ланки.

Висота верхньої межі робочого простору:

$$H = L \sqrt{1 - m^2 \left(\frac{1-n}{2} \right)^2} = L \sqrt{1 - c^2}$$

Висота нижнього положення виконавчого органу відповідає точці перетину траєкторії руху кінематичної ланки максимальної довжини з траєкторією руху другої кінематичної ланки з мінімальною довжиною, коли

ще має місце неперервний рух виконавчого органу в поперечному напрямку. Такою точкою є B_3 . Вона отримана як рух точки A_2 від найвищого положення виконавчого органу по дузі максимального радіуса (L) до перетину з дугою мінімального радіуса (l_3). При цьому загальне переміщення складає l'_3 .

Висоту нижнього положення ВО (h_3) визначаємо з рівняння:

$$h_3 = \frac{0,5L\sqrt{(1+i+m) \cdot (i+m-1) \cdot (1-i+m) \cdot (1+i-m)}}{m},$$

де $m = \frac{a}{L}$; $i = \frac{l_3}{L}$.

Переміщення виконавчого органу в поперечному напрямку в межах від H до h_3 визначається величиною $l'_{3i}/2$.

Величину цього переміщення знаходимо з рівняння:

$$0,25(l'_{3i})^2 + l'_{3i}Lm \frac{1+n}{2} + \left[L^2 m^2 \left(\frac{1+n}{2} \right)^2 - L^2 - l_2^2 i_{3i}^2 + l_2^2 m^2 \left(\frac{1-n}{2} \right)^2 \right] = 0.$$

Використовуючи заміну:

$$k_3 = 0,25;$$

$$p_3 = Lm \frac{1+n}{2};$$

$$q_3 = L^2 m^2 \left(\frac{1+n}{2} \right)^2 - L^2 - l_2^2 i_{3i}^2 + l_2^2 m^2 \left(\frac{1-n}{2} \right)^2,$$

отримаємо квадратне рівняння:

$$k_3 (l'_{3i})^2 + p_3 l'_{3i} + q_3 = 0,$$

Визначаємо з нього величину переміщення виконавчого органу в поперечному напрямку:

$$l'_{3i} = \frac{-p_3 \pm \sqrt{p_3^2 - 4k_3 q_3}}{2 \cdot k_3}.$$

Таким чином, визначено аналітичні залежності переміщень виконавчого органу в поперечному напрямку і основних конструктивних параметрів гексапода. За отриманими залежностями можна визначати найбільш доцільні конструкції верстатів з паралельною кінематикою залежно від їх функціонального призначення.

На основі виконаних досліджень та визначених аналітичних залежностей побудовані графіки (рис. 3.14-3.16), які відображають вплив зазначених параметрів на показник переміщення верстата-гексапода в напрямку, перпендикулярному осі його симетрії.

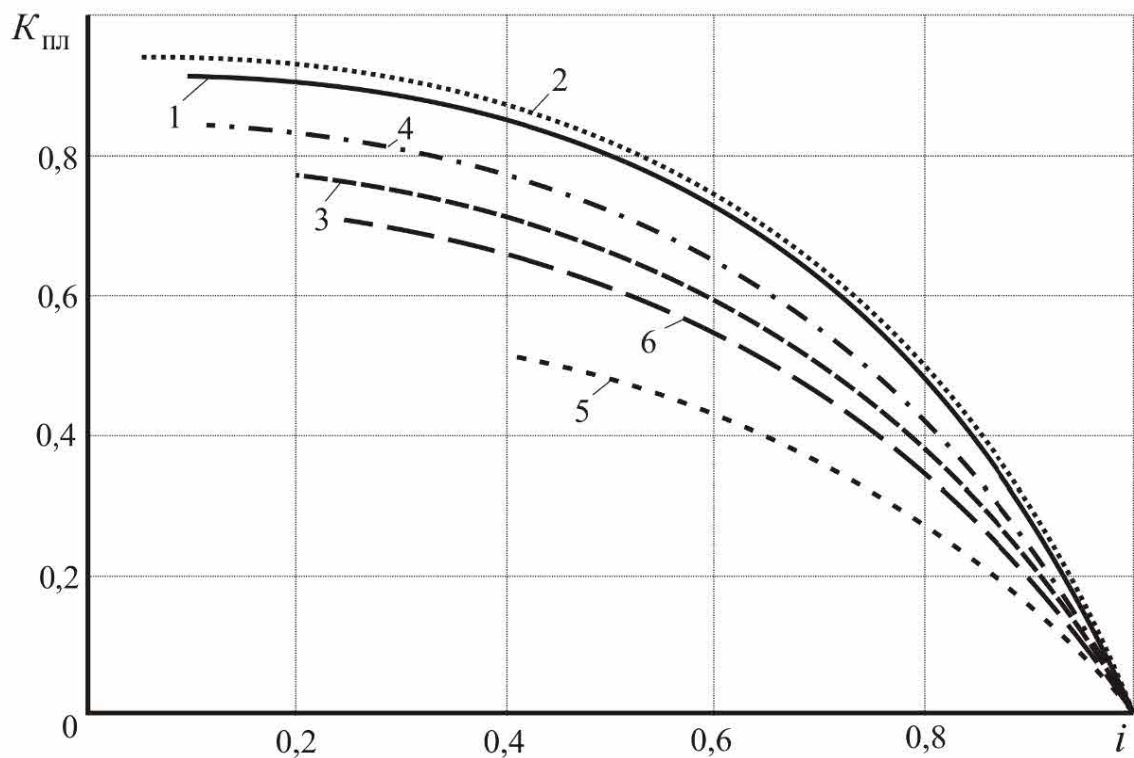


Рис. 3.14. Залежності переміщень виконавчого органу від зміни довжин кінематичних ланок:

- 1) $m=0,2; n=0,2$; 2) $m=0,2; n=0,5$; 3) $m=0,5; n=0,2$; 4) $m=0,5; n=0,5$;
5) $m=1; n=0,2$; 6) $m=1; n=0,5$

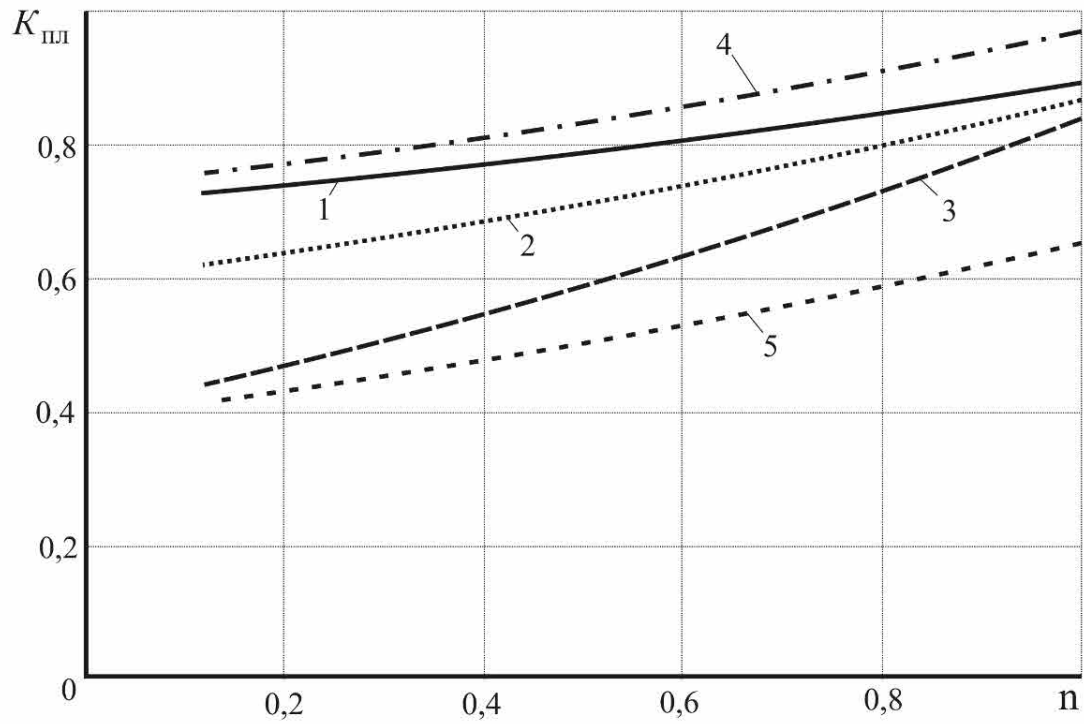


Рис. 3.15. Залежності переміщень виконавчого органу від відношення відстаней між опорами виконавчого органу та несучої системи:

1) $m=0,2$; $i=0,5$; 2) $m=0,5$; $i=0,5$; 3) $m=1,0$; $i=0,5$;

4) $m=0,5$; $i=0,2$; 5) $m=0,5$; $i=0,75$

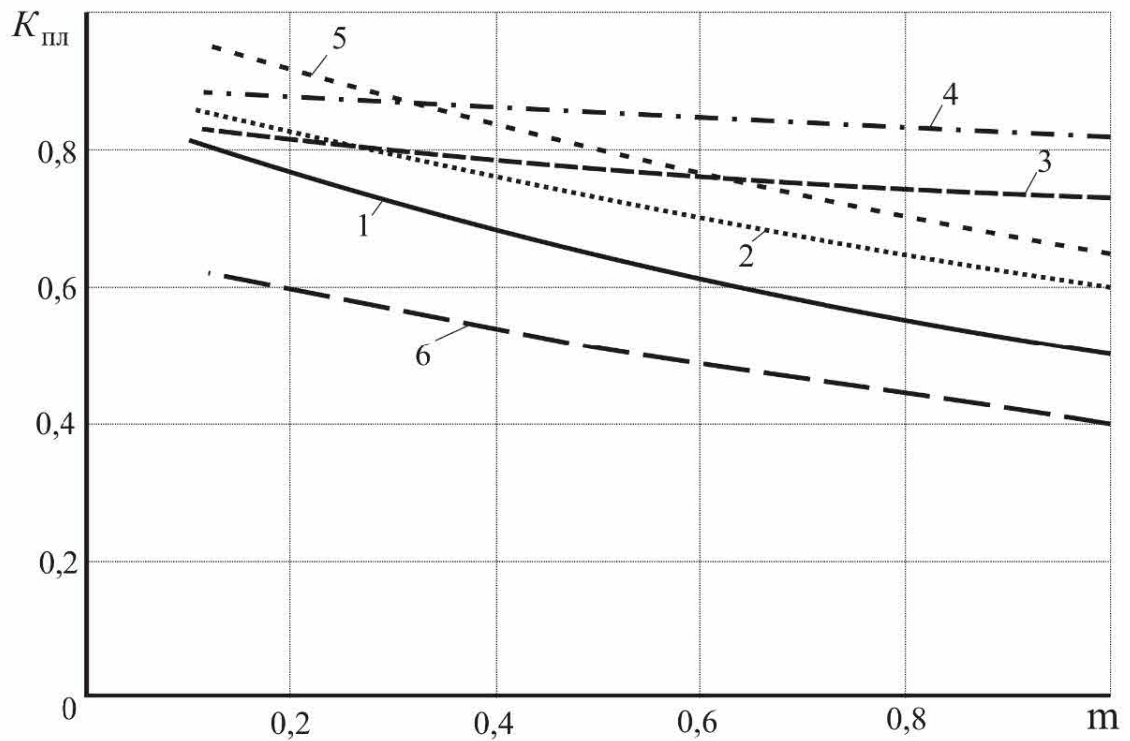


Рис. 3.16. Залежності переміщень виконавчого органу від відстані між опорами на несучій системі: 1) $n=0,2$; $i=0,5$; 2) $n=0,5$; $i=0,5$; 3) $n=0,75$; $i=0,5$; 4) $n=1$; $i=0,5$; 5) $n=0,5$; $i=0,2$; 6) $n=0,5$; $i=0,75$

3.4. Оцінка рухових можливостей верстата-гексапода при переміщенні виконавчого органу під кутом

Виконаємо оцінку функціонування верстата-гексапода, виходячи з умов реалізації рухів під кутом (наприклад, при обробці отворів під кутом, де рухома платформа здійснює відповідний рух подачі). Дослідження проведемо для варіанту, коли зміна положення рухомої платформи досягається її відхилення на кут від осі симетрії.

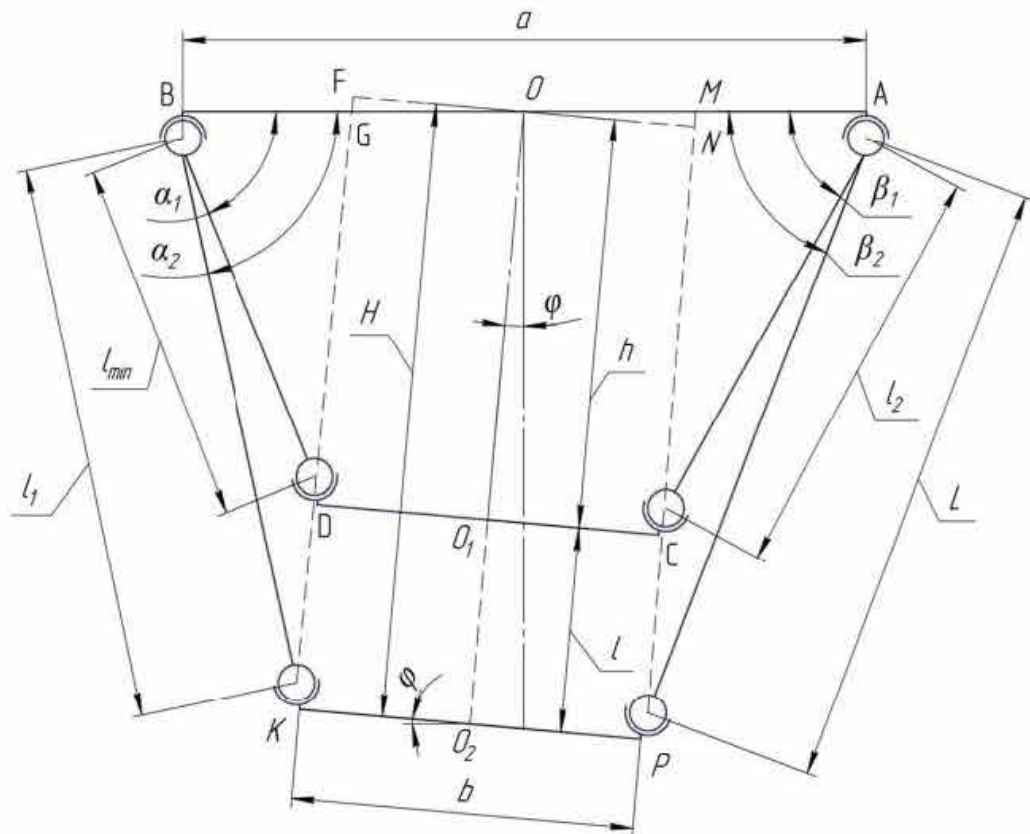


Рис. 3.17. Розрахункова схема

В розрахунковій схемі (рис. 3.17) позначимо:

a, b – відповідно розмір (діаметр) нерухомої та рухомої платформ;

L – максимальна довжина штанги;

$l_{\min}$ – мінімальна довжина штанги;

l_i – поточна довжина штанги;

l – величина переміщення рухомої платформи;

h – мінімальне положення рухомої платформи гексапода ($h = OO_1$);

h_i – поточне положення рухомої платформи гексапода;

H – максимальне положення рухомої платформи гексапода ($H = OO_2$);

α_1, β_1 – кути нахилу штанг при мінімальному зміщенні рухомої платформи від нерухомої;

α_2, β_2 – кути нахилу штанг при максимальному зміщенні рухомої платформи від нерухомої;

φ – кут нахилу рухомої платформи.

З розрахункової схеми видно, що величина переміщення платформи визначається по руху її центру і позначається O_1O_2 . Переміщення l змінюється від нульового максимально втянутого положення до поточного положення гексаподу.

Оцінку рухових характеристик верстату-гексаподу будемо виконувати по показнику переміщень по лінії:

$$K_{nl} = \frac{l}{L}.$$

Мінімальне вихідне положення гексаподу буде: $h = OO_1$.

Для DG за теоремою косинусів з трикутника BGD записуємо рівняння:

$$BD^2 = BG^2 + DG^2 - 2 \cdot BG \cdot DG \cdot \cos(90 - \varphi)$$

З трикутника OGF знаходимо:

$$OG = \frac{b}{2\cos\varphi};$$

$$BG = BO - OG = \frac{a}{2} - \frac{b}{2\cos\varphi}$$

Позначивши DG через x отримуємо рівняння:

$$l_{min}^2 = \left(\frac{a}{2} - \frac{b}{2\cos\varphi}\right)^2 + x^2 - 2x\left(\frac{a}{2} - \frac{b}{2\cos\varphi}\right)\cos(90 - \varphi)$$

З цього квадратного рівняння визначаємо x :

$$x = \frac{1}{2} \left[tg\varphi \cdot (a \cdot \cos\varphi - b) + \sqrt{4l_{min}^2 - (a \cdot \cos\varphi - b)^2} \right]$$

Приймаємо:

$$h = OO_1 = DF = DG + GF$$

$$GF = OG \cdot \sin\varphi = \frac{b}{2 \cdot \cos\varphi} \sin\varphi = \frac{b}{2} tg\varphi$$

Підставивши значення, отримуємо:

$$h = \frac{1}{2} \left[tg\varphi \cdot (a \cdot \cos\varphi - b) + \sqrt{4l_{min}^2 - (a \cdot \cos\varphi - b)^2} \right] + \frac{b}{2} tg\varphi$$

Подібним чином визначаємо максимальне положення платформи Н:

$$H = \frac{1}{2} \left[\sqrt{4L^2 - (a \cdot \cos\varphi - b)^2} - tg\varphi \cdot (a \cdot \cos\varphi - b) \right] - \frac{b}{2} tg\varphi$$

Величина переміщення платформи l буде:

$$\begin{aligned} l = H - h &= \frac{1}{2} \left[\sqrt{4L^2 - (a \cdot \cos\varphi - b)^2} - tg\varphi \cdot (a \cdot \cos\varphi - b) \right] - \frac{b}{2} tg\varphi - \\ &- \frac{1}{2} \left[tg\varphi \cdot (a \cdot \cos\varphi - b) + \sqrt{4l_{min}^2 - (a \cdot \cos\varphi - b)^2} \right] + \frac{b}{2} tg\varphi = \\ &= \frac{1}{2} \left[\sqrt{4L^2 - (a \cdot \cos\varphi - b)^2} + \sqrt{4l_{min}^2 - (a \cdot \cos\varphi - b)^2} \right] - a \cdot \sin\varphi \end{aligned}$$

Введемо заміни:

$$n = \frac{b}{a}; \quad m = \frac{a}{L}; \quad i = \frac{l_3}{L}$$

Тоді переміщення платформи визначається:

$$l = L \left[\sqrt{1 - m^2 \left(\frac{\cos \varphi - n}{2} \right)^2} - \sqrt{4i - m^2 \left(\frac{\cos \varphi - n}{2} \right)^2} - m \cdot \sin \varphi \right]$$

З урахуванням просторового розміщення шарнірів рухомої та нерухомої платформ (рис. 3.8, 3.9), значення n і m можна записати:

$$n = \frac{b \cdot (1 + \cos \alpha_b)}{a \cdot (1 + \cos \alpha_a)};$$

$$m = \frac{a \cdot (1 + \cos \alpha_a)}{2L}.$$

Результати досліджень впливу основних геометричних параметрів на показник переміщення по лінії наведені на рис. 3.18

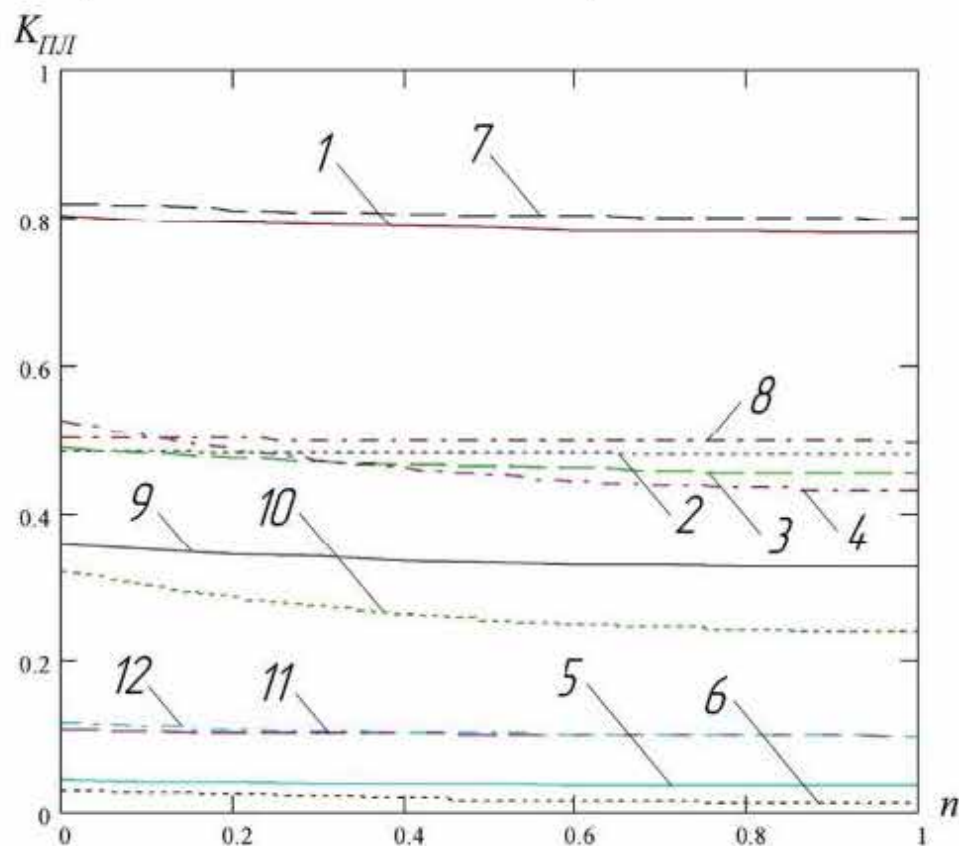


Рис. 3.18. Графік впливу відношення розмірів платформ на відносну величину переміщення

1. $m=0,2; i=0,2; \varphi=5^\circ$; 2. $m=0,2; i=0,5; \varphi=5^\circ$; 3. $m=0,5; i=0,5; \varphi=5^\circ$;
 4. $m=0,75; i=0,5; \varphi=5^\circ$; 5. $m=0,75; i=0,9; \varphi=5^\circ$; 6. $m=1,0; i=0,9; \varphi=5^\circ$;
 7. $m=0,2; i=0,2; \varphi=0^\circ$; 8. $m=0,2; i=0,5; \varphi=0^\circ$; 9. $m=0,5; i=0,5; \varphi=20^\circ$;
 10. $m=0,75; i=0,5; \varphi=20^\circ$; 11. $m=0,75; i=0,9; \varphi=0^\circ$; 12. $m=1,0; i=0,9; \varphi=0^\circ$

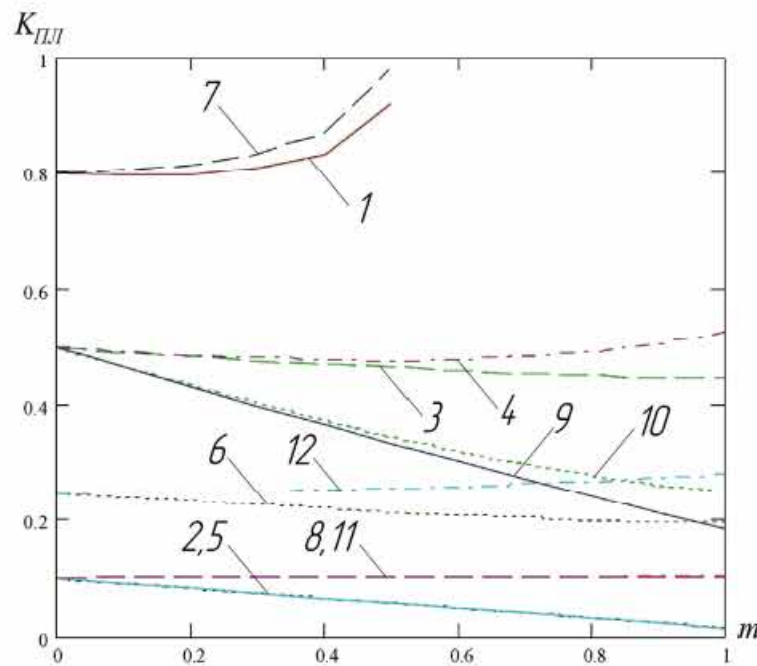


Рис. 3.19. Графік впливу відношення розміру нерухомої платформи до довжини штанг на відносну величину переміщення:

1. $n=0,2; i=0,2; \varphi=5^\circ$; 2. $n=0,5; i=0,9; \varphi=5^\circ$; 3. $n=0,5; i=0,5; \varphi=5^\circ$;
4. $n=0,2; i=0,5; \varphi=5^\circ$; 5. $n=0,75; i=0,9; \varphi=5^\circ$; 6. $n=0,2; i=0,75; \varphi=5^\circ$;
7. $n=0,2; i=0,2; \varphi=0^\circ$; 8. $n=0,5; i=0,9; \varphi=0^\circ$; 9. $n=0,5; i=0,5; \varphi=20^\circ$;
10. $n=0,2; i=0,5; \varphi=20^\circ$; 11. $n=0,75; i=0,9; \varphi=0^\circ$; 12. $n=0,2; i=0,75; \varphi=0^\circ$

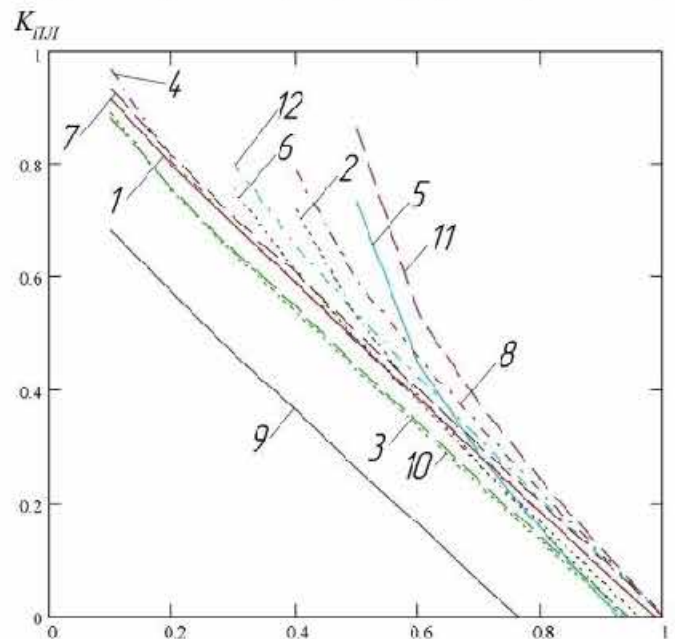


Рис. 3.20. Графік впливу відносної величини руху штанг на відносну величину переміщення:

1. $m=0,2; n=0,2; \varphi=5^\circ$; 2. $m=0,75; n=0,2; \varphi=5^\circ$; 3. $m=0,75; n=0,5; \varphi=5^\circ$;
4. $m=0,5; n=0,5; \varphi=5^\circ$; 5. $m=1,0; n=0; \varphi=5^\circ$; 6. $m=0,5; n=0; \varphi=5^\circ$;
7. $m=0,2; n=0,2; \varphi=0^\circ$; 8. $m=0,75; n=0,2; \varphi=0^\circ$; 9. $m=0,75; n=0,5; \varphi=20^\circ$;
10. $m=0,5; n=0,5; \varphi=20^\circ$; 11. $m=1,0; n=0; \varphi=0^\circ$; 12. $m=0,5; n=0; \varphi=0^\circ$

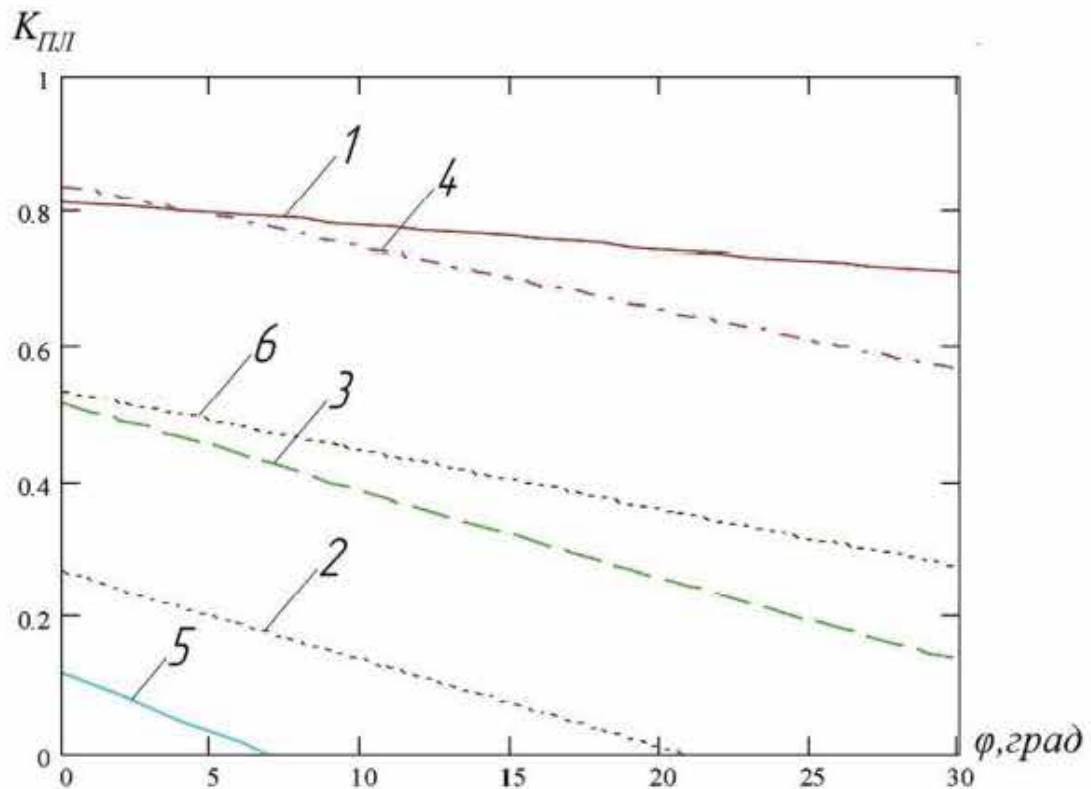


Рис. 3.21. Графік впливу кута під яким рухається платформа на відносну величину переміщення:

1. $m=0,2; n=0,2; i=0,2$; 2. $m=0,75; n=0,2; i=0,75$; 3. $m=0,75; n=0,5; i=0,5$;
4. $m=0,5; n=0,5; i=0,2$; 5. $m=1,0; n=0; i=0,9$; 6. $m=0,5; n=0; i=0,5$

З графіка впливу відношення платформ на величину переміщення по лінії (рис. 3.18) видно, що доцільно зменшити розмір рухомої платформи до $n=0,4$. Графік впливу відношення нерухомої платформи до довжини штанг на величину переміщення по лінії (рис. 3.19) показує, що вплив m на $K_{пл}$ при різних співвідношеннях має змінний характер, тобто при збільшенні показника m та зменшенні показника n величина переміщення по лінії збільшується, а зростання показника m і кута нахилу платформи ϕ зменшують його значення.

РОЗДІЛ 4

ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ ВЕРСТАТА ПАРАЛЕЛЬНОЇ КІНЕМАТИКИ

4.1 Загальні вихідні дані

Для визначення показників економічної ефективності нової конструкції верстата в якості бази для порівняння приймемо послідовну обробку деталі на трьохкоординатному фрезерному верстаті мод. 2Р82 і вертикально-свердлильному з ЧПУ 2Р135Ф2-1. Проектний верстат, порівняно з ними, є більш продуктивнішим.

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

Таблиця 4.1

Загальні вихідні техніко-економічні показники

№ з/п	Показники	Базовий		Проектний
		6Р82	2Р135Ф2-1	
1	Штучний час обробки, хв	2,783	3,167	0,80
2	Маса верстата, кг	1300	4700	1500
3	Площа, яку займає верстат, м ²	4,49	4,04	5,6
4	Встановлена потужність електродвигунів, кВт	7,5	3,7	20,0
5	Категорія ремонтної складності, УРО:	18	8	8
	а) механічної частини	14	2	5,5
	б) електричної частини			
6	Розряд роботи			
	а) верстатника	3	3	3
	б) наладчика	4	4	4
7	Оптова ціна базового верстата, грн	120560	964600	-

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 (ТЗ); технічна пропозиція (ТПр); ескізний проект (ЕП); технічний проект; робочий проект;

2) встановлюємо групу новизни та складності проектного верстата [17, 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». [17, дод. 2];

4) трудомісткість технічного і робочого проектів визначаємо як добуток відповідної загальної кількості «умовних деталей» на трудомісткість однієї умовної деталі [17, 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. [17, дод. 3];

6) отримані результати зводимо до табл.4.2;

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

$$B_{нк} = T_{кон} \cdot Z_{сг}^к \cdot \left(1 + \frac{\kappa_{\delta}}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_c}{100}\right) + H_{\epsilon}, \quad (4.1)$$

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

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

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

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

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

$$B_{\text{нк}} = 2053,64 \cdot 98,011 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) + 2053,64 \cdot 98,011 \cdot \frac{45}{100} = 360700 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.2

Розрахунок трудомісткості конструкторської підготовки виробництва (КПВ)

№ з/п	Показники та етапи робіт	Етапи КПВ			Всього
		ТЗ, ТПр, ЕП	Технічний проект	Робочий проект	
1.	Кількість деталей × коефіцієнт переводу в «умовні деталі», шт:				
	а) корпусних масою більш ніж 100 кг		6×5	6×10	
	б) оригінальних, які не є литими та корпусними		78×1	78×1	
	в) уніфікованих у вузли		3×7	3×3,5	
	г) стандартних нормалізованих		207×0,15	207×0,15	
	покупних		10×0,5	10×0,15	
2.	Кількість умовних деталей		165,05	157,55	
3.	Норма на умовну деталь, нормо-год		3,4	4,3	
4.	Загальна трудомісткість, нормо-год	815	561,17	677,47	2053,64

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:

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

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

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

$$B_T = 1611,0 \cdot 96,52 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22,0}{100}\right) + 1611,0 \cdot 96,52 \cdot \frac{55}{100} = 294190 \text{ грн.}$$

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:

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			94,7
2.	Розробка техпроцесів виготовлення деталей:			
	а) загальна кількість деталей, шт	78		863,5
	б) в тому числі за групами технологічної складності			
	I	21	4,5	94,5
	II	35	9	315
	III	14	17	238
	IV	8	27	216
3.	Розробка техпроцесів складання вузлів:			
	а) загальна кількість вузлів, шт	3		229,1
	б) в тому числі за групами технологічної складності:			
	II	4	5,6	22,4
	III	4	12,5	50,0
	IV	3	14,9	44,7
	V	2	17,8	35,6
	VI	2	22,3	44,6
	VII	1	31,8	31,8
4.	Проектування спеціального оснащення, нестандартних засобів механізації та автоматизації, нормо-год			185,4
5.	Виготовлення спеціального оснащення, нестандартних засобів механізації та автоматизації, нормо-год			94,1
6.	Інші роботи, нормо-год			144,2
7.	Всього трудомісткість, нормо-год			1611,0

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

де n – кількість i -тих видів робіт;

$C_{\text{г(і)}}$ – 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:

$$З_{\text{ор}}^{\text{м}} = 625 \cdot 77,979 = 48736,88 \text{ грн.}$$

б) витрати на утримання та експлуатацію обладнання:

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

де $\Pi_{\text{во(і)}}$ – 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:

$$B_{\text{o}}^{\text{м}} = 48736,88 \cdot \frac{285}{100} = 138900,09 \text{ грн.}$$

в) цехові витрати:

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

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

Для механічних робіт:

$$K_{\text{цех}}^{\text{м}} = 48736,88 \cdot \frac{232}{100} = 113069,55 \text{ грн.}$$

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

Таблиця 4.4

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

Види робіт	Трудовісткість робіт, нормо-год.	Середній розряд	Середньогодинна тарифна ставка робітників, грн.	Основна заробітна плата робітників B_z , грн.	Витримати на утримання та експлуатацію обладнання, B_o		Загальноцехо ві витрати, $B_{цех}$	
					%	грн.	%	грн.
Заготівельні	156	4	70,181	10948,24	24 5	26823,18	23 2	25399,91
Механічні	625	4	77,979	48736,88	28 5	138900,0 9	23 2	113069,5 5
Термічні	88	3	87,048	7660,22	31 0	23746,69	28 2	21601,83
Гальванічні	95	3	57,643	5476,09	31 0	16975,86	28 2	15442,56
Слюсарсько- складальні	920	4	77,979	71740,68	21 0	150655,4 3	24 2	173612,4 5
Фарбувальні	90	2	45,319	4078,71	11 0	4486,58	22 0	8973,16
Пакувальні	51	2	41,935	2136,59	11 0	2350,25	22 0	4700,49
Інші	63	3	70,181	4421,40	22 0	9727,09	24 0	10611,37
Всього	2088	-	-	155198,8 0	-	373665,1 7	-	373411,3 2

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

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

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

$\Pi_{\text{н}}$ – 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

№	Матеріали, покупні напівфабрикати та комплектуючі вироби	Одиниця	Витрати (шт, кг)	Ціна, грн.	Витрати на виріб, грн.
Основні матеріали					
1	Сталь 45 Ø50 (труба)	кг	200	59,25	11850,00
2	Сталь 45 Ø250 (пруток)	кг	150	64,90	9735,00
3	Сталь 45 (лист)	кг	120,0	45,25	5430,00
4	Сталь 40Х	кг	15,0	67,75	1016,25
5	Інші матеріали	кг			2507,20
Всього основних матеріалів					30538,45
Покупні комплектуючі вироби					
1	Електродвигун (20 кВт)	шт.	1	1230,0	1230,0
2	Підшипники	шт.	6	310,00	1860,0
3	Метизи	кг	5,8	186,40	1081,12
Уніфіковані вузли					
1	Станина	шт.	1	284400	284400,0
2	Направляючі	шт.	2	78975	157950,0
3	Шарико-гвинтова передача	шт.	1	23550	23550,0
4	Інші покупні				1875,0
Всього покупних					471946,12

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.	Матеріали основні	M_o	табл. 4.5	30538,45
2.	Матеріали допоміжні	M_d	4% від M_o	1221,54
3.	Покупні напівфабрикати, комплектуючі вироби та послуги інших підприємств	$П_n$	табл. 4.5	471946,12
4.	Зворотні відходи	$-B_{зв}$	6% від M_o	1832,31
5.	Транспортно-заготівельні витрати	T_v	5% від ($M_o + M_d + П_n$)	20148,24
6.	Паливо та енергія на технологічні цілі	$П_{тех}, E_{тех}$	58,0% від $З_{ор}$	90015,30
7.	Всього матеріальні витрати			612037,35
8.	Основна заробітна плата виробничих робітників	$З_{ор}$	табл. 4.4	155198,80
9.	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	$З_{др}$	10% від $З_{ор}$	15519,88
10.	Єдиний соціальний внесок	B_c	22,0% від ($З_{ор} + З_{др}$)	37558,11
11.	Відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення	$З_{уп}$	2,5% від $З_{ор}$	3879,97
12.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання	B_o	табл. 4.4	373665,17
13.	Цехові витрати	$K_{цех}$	табл. 4.4	373411,32
14.	Загальнозаводські витрати	$K_{зав}$	140% від $З_{ор}$	217278,32
15.	Інші виробничі витрати	$B_{ін}$	2,0% від $З_{ор}$	3103,98
16.	Виробнича собівартість	$C_{вир}$	Σ ст. (7 ÷ 15)	1790100,91
17.	Позавиробничі витрати	$K_{пв}$	1% від $C_{вир}$	17901,01
18.	Повна собівартість	$C_{пов}$	$C_{вир} + K_{пв}$	1808000,0
19.	Прибуток	$П_n$	10,0% від $C_{пов}$	180800,0
20.	Оптова ціна	$Ц_{опт}$	$C_{пов} + П_n$	1988800,0

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, %.

$$\Pi_{\text{н}} = \frac{10 \cdot 1808000}{100} = 180800,0 \text{ грн.}$$

$$C_{\text{опт}} = 1808000,0 + 180800,0 = 1988800 \text{ грн.}$$

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.

$$B_3^{\delta} = 70,181 \cdot \frac{5,95}{60} \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) = 9,3398 \text{ грн.},$$

$$B_3^{\text{нр}} = 70,181 \cdot \frac{0,8}{60} \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) = 1,2558 \text{ грн.},$$

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.

$$B_{\text{ел}}^{\delta} = \left(\frac{7,5 \cdot 0,7 \cdot 0,5 \cdot 0,4}{0,88 \cdot 0,95} \cdot \frac{2,783}{60} + \frac{3,7 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 0,4}{0,88 \cdot 0,95} \cdot \frac{3,167}{60} \right) \cdot 7,5 = 1,0233 \text{ грн.}$$

$$B_{el}^{np} = \frac{20 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 0,4}{0,88 \cdot 0,95} \cdot \frac{0,8}{60} \cdot 7,5 = 0,4689 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжні матеріали:

$$B_{dm} = \frac{M_{гв} \cdot R_m \cdot T_{нор}}{60 \cdot 100} \cdot K_{п}, \quad (4.12)$$

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

R_m – категорія складності ремонту механічної частини верстата, УРО;

$K_{п}$ – коефіцієнт, який враховує тип виробництва (для серійного виробництва приймають 1).

$$B_{dm}^{\delta} = \frac{78,5 \cdot (18 \cdot 2,783 + 8 \cdot 3,167)}{100} \cdot 1 = 0,9869 \text{ грн.},$$

$$B_{dm}^{np} = \frac{78,5 \cdot 8 \cdot 0,8}{100} \cdot 1 = 0,0837 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт обладнання:

$$B_p = \frac{R_m \cdot P_{вн} + R_e \cdot P_{ве}}{F_{дрм}} \cdot \frac{T_{нор}}{60}, \quad (4.13)$$

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

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

$$B_p^{\delta} = \frac{880 \cdot 18 + 720 \cdot 14}{3950} \cdot \frac{2,783}{60} + \frac{880 \cdot 8 + 720 \cdot 2}{3950} \cdot \frac{3,167}{60} = 0,4177 \text{ грн.},$$

$$B_p^{np} = \frac{880 \cdot 8 + 720 \cdot 5,5}{3950} \cdot \frac{0,8}{60} = 0,0371 \text{ грн.}$$

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 1м^2 виробничого приміщення, $\text{грн}/\text{м}^2$.

$$B_n^{\delta} = \frac{(4,49 \cdot 2,783 + 4,04 \cdot 3,167) \cdot 3,0 \cdot 780}{3950 \cdot 60} = 0,2497 \text{ грн.}$$

$$B_n^{np} = \frac{5,6 \cdot 3 \cdot 780}{3950} \cdot \frac{0,8}{60} = 0,0442 \text{ грн.}$$

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;

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

Таким чином:

$$\Phi_{\text{бал.ф}}^{\delta} = 120560 \cdot (1 + 0,08 + 0,05 + 0,04) = 143466 \text{ грн.};$$

$$\Phi_{\text{бал.с}}^{\delta} = 964500 \cdot (1 + 0,08 + 0,05 + 0,04) = 1147731 \text{ грн.}$$

$$\Phi_{6an}^{np} = 1988800 \cdot (1 + 0,08 + 0,05 + 0,04) = 2366672 \text{ грн.}$$

$$B_a^{\delta} = \frac{(143466 \cdot 2,783 + 1147731 \cdot 3,167) \cdot 20}{3950 \cdot 100 \cdot 60} = 3,3011 \text{ грн.,}$$

$$B_a^{np} = \frac{2366672 \cdot 20}{3950 \cdot 100} \cdot \frac{0,8}{60} = 1,5575 \text{ грн.}$$

Витрати на експлуатацію універсального різучого інструменту:

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

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

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

S_{nep} – вартість однієї переточувань, грн.;

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

t_e – економічна стійкість інструменту, хв.;

K_{em} – коефіцієнт обліку втрат інструменту.

$$B_{ip}^{\delta} = \frac{(965,0 + 24 \cdot 16,7) \cdot 0,6 \cdot 2,783}{120 \cdot (1 + 24)} \cdot 1,1 + \frac{(2060 + 49 \cdot 12,3) \cdot 0,7 \cdot 3,167}{45 \cdot (49 + 1)} \cdot 1,25 = 4,0396 \text{ грн.}$$

$$B_{ip}^{np} = \frac{(965,0 + 24 \cdot 16,7) \cdot 0,6 \cdot 0,8}{120 \cdot (1 + 24)} \cdot 1,1 + \frac{(2060 + 49 \cdot 12,3) \cdot 0,7 \cdot 0,8}{45 \cdot (49 + 1)} \cdot 1,25 = 2,5935 \text{ грн.}$$

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	9,3398	1,2558
2.	Силова електроенергія	$B_{ел}$	1,0233	0,4689
3.	Допоміжні матеріали	$B_{дм}$	0,9869	0,0837
4.	Ремонт обладнання	B_p	0,4177	0,0371
5.	Універсальний інструмент	B_{ip}	4,0396	1,0470
6.	Утримання приміщення	$B_{уп}$	0,2497	0,0442
7.	Амортизація обладнання	B_a	3,3911	1,5575
Загальна сума		B_e	19,4481	4,4942

4.6 Розрахунок показників економічної ефективності

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

$$E_{рв} = (C_{опт}^{пр} - C_{пов}^{пр}) \cdot П_v - E_n \cdot K_v, \quad (4.18)$$

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

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

$П_v$ – програма виробництва верстатів, шт./рік;

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

K_v – додаткові капітальні витрати у виробника, грн.

$$K_e = B_{пк} + B_t, \quad (4.19)$$

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

$$K_{\text{с}} = 360700 + 294190 = 654890 \text{ грн.}$$

$$E_{\text{рв}} = (1988800 - 1808000) \cdot 1 - 0,16 \cdot 654890 = 76000 \text{ грн.}$$

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).

$$K_{\text{сп}} = 2366672 \cdot 1 - (143466 \cdot 1 + 1147731 \cdot 1) = 1075475 \text{ грн.}$$

$$E_{\text{рсп}} = (19,4481 - 4,4942) \cdot 25000 - 0,16 \cdot 1075475 = 201800 \text{ грн.}$$

Строк окупності додаткових капітальних вкладень:

- у виробника:

$$T_{окв} = \frac{K_e}{(II_{опт}^{пр} - C_{пов}^{пр}) \cdot II_v} = \frac{654890}{(1988800 - 1808000) \cdot 1} = 3,6 \text{ роки,} \quad (4.23)$$

- у споживача:

$$T_{оксн} = \frac{K_{сн}}{(B_{е.баз} - B_{е.пр}) \cdot N_d} = \frac{1075475}{(19,4481 - 4,4942) \cdot 25000} = 2,9 \text{ років} \quad (4.24)$$

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	—	1	—
2.	Річний випуск виробів	шт./рік	25000	25000	—
3.	Штучний час обробки виробу	хв.	5,95	0,8	-86,6
4.	Повна собівартість виготовлення верстату	грн.	—	1808000	—
5.	Оптова ціна верстату	грн.	1085160	1988800	+83,3
6.	Собівартість одиниці обробки із застосуванням об'єкта	грн.	19,448	4,494	-76,9
7.	Капітальні витрати на конструкторську та технологічну підготовку виробництва	грн.	—	654890	—
8.	Строк окупності капітальних витрат а) у виробника б) у споживача	років років	— —	3,6 2,9	— —
9.	Річний економічний ефект: а) у виробника б) у споживача	грн. грн.	— —	76000 201800	— —

ВИСНОВКИ

В даній кваліфікаційній роботі для освітнього ступеня «магістр» вирішено наступні задачі:

1. Запропоновано систему показників оцінки рухових можливостей верстатів-гексаподів при переміщенні їх виконавчого органу по лініях, площинах та в об'ємі.

2. Встановлено аналітичні залежності можливих переміщень виконавчого органу верстата з паралельною кінематикою в напрямку типових рухів (вздовж осі симетрії верстата-гексапода і перпендикулярно до цієї осі) від зміни параметрів їх основних конструктивних елементів.

3. Визначено найбільш доцільні конструктивні виконання верстатів-гексаподів залежно від їх функціонального призначення: для верстатів, що здійснюють переважно вертикальні рухи вздовж осі його симетрії, необхідно, щоб співвідношення параметрів гексапода було в межах $m = 0,6 \div 1,0$; $n = 0 \div 0,4$; $i = 0,2 \div 0,6$; для переважно перпендикулярних рухів: $m = 0,2 \div 0,8$; $n = 0,4 \div 1,0$; $i = 0,4 \div 0,6$; для здійснення обох варіантів рухів та з урахуванням інших умов: $m = 0,6 \div 1,0$; $n = 0,1 \div 0,3$; $i = 0,2 \div 0,6$. Визначено, що чим більше кут нахилу платформи (φ) тим менша величина переміщення платформи. Найбільший вплив на величину переміщень ВО спричиняє зміна довжин кінематичних ланок (i).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Агрегатно-модульне технологічне обладнання : навч. посібник для ВНЗ у 3-х част. / [Крижанівський В. А., Кузнєцов Ю. М., Кириченко А. М. та ін.]; під ред. Ю. М. Кузнєцова. – Кіровоград, 2003 –
 - Ч. 1: Принципи побудови агрегатно-модульного технологічного обладнання – 2003. – 422 с.
2. Агрегатно-модульне технологічне обладнання : навч. посібник для ВНЗ у 3-х част. / [Крижанівський В. А., Кузнєцов Ю. М., Кириченко А. М. та ін.]; під ред. Ю. М. Кузнєцова. – Кіровоград, 2003 –
 - Ч. 2: Проектування та дослідження вузлів агрегатно-модульного технологічного обладнання – 2003. – 286 с.
3. Агрегатно-модульне технологічне обладнання : навч. посібник для ВНЗ у 3-х част. / [Крижанівський В. А., Кузнєцов Ю. М., Кириченко А. М. та ін.]; під ред. Ю. М. Кузнєцова. – Кіровоград, 2003 –
 - Ч. 3: Агрегатно-модульне технологічне обладнання нового покоління, його оснащення та інструментальне забезпечення – 2003. – 507 с.
4. Валявський І. А. Тенденції розвитку верстатів паралельної структури / І. А. Валявський, В. А. Крижанівський // Вісник Сумського державного університету. – 2003. – № 2 (48). – С. 18–22.
5. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою : навчальний посібник для ВНЗ / [В. А. Крижанівський, Ю. М. Кузнєцов, І. А. Валявський, Р. А. Склярів]; під ред. Ю. М. Кузнєцова. – Кіровоград, 2004. – 449 с.
6. Кузнєцов Ю. М. Сучасний стан, прогнозування і перспективи розвитку верстатів з паралельною кінематикою / Ю. М. Кузнєцов, В. А. Крижанівський, Р. А. Склярів // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : (зб. наукових праць). – ЖДТУ, 2005. – Вип. 1. – С. 320–333.

7. Кузнецов Ю. М. Візуалізація формоутворюючих рухів механізмами паралельної структури в верстатах нових компоновок / Ю. М. Кузнецов, Д. О. Дмитрієв // Вісник ТДТУ. – 2008. – № 1.
8. Кузнецов Ю. М. Моделювання технологічних рухів в верстатах паралельної структури при обробці складнопрофільних поверхонь / Ю. М. Кузнецов, Д. О. Дмитрієв // Современные технологии в машиностроении : (зб. наукових праць НТУ «ХП»). – 2008. – Вип. 1.
9. 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.
10. Павленко І. І. Промислові роботи: основи розрахунку та проектування / І. І. Павленко. – Кіровоград : КНТУ, 2007. – 420 с.
11. Павленко І. І. Структура промислових роботів / І. І. Павленко. – Кіровоград : КІСМ, 1998. – 100 с.
12. Павленко І. І. Рухові характеристики промислових роботів / І. І. Павленко. – Кіровоград : КДТУ, 2000. – 124 с.
13. Павленко І. І. Рухові характеристики верстатів з паралельною кінематикою / І. І. Павленко, І. А. Валявський // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград : КНТУ. – 2008. – Вип. 21. – С. 128–134. – (Збірник наук. праць).
14. Павленко І. І. Оцінка рухових можливостей гексаподу в напрямку, перпендикулярному до осі його симетрії / І. І. Павленко, І. А. Валявський // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград : КНТУ. – 2009. – Вип. 22. – С. 3–10. – (Збірник наук. праць).
15. Павленко І. І. Дослідження впливу конструктивних параметрів механізму паралельної структури на функціональні можливості верстата з паралельною кінематикою. / І. І. Павленко, І. А. Валявський // Конструювання,

виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. – Кіровоград, 2008. – Вип. 38. – С. 284-288.

16. Скляренко І.В., Лебедева Л.В., Романюк Л.М. Економічні та організаційно-планові розрахунки при розробці нових виробів. – Кіровоград: КДТУ, 2001- 36с.

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

18. Вахніченко, Д. В. Дослідження переміщення рухомої платформи під кутом при здійсненні технологічних рухів / Д. В. Вахніченко, І. І. Павленко // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : зб. наук. пр. - Житомир : ЖДТУ, 2011. - Вип. 10. - С. 73-80.

19. Павленко, І. І. Аналіз впливу конструктивних параметрів МПК на рух платформи під кутом / І. І. Павленко, Д. В. Вахніченко, М. О. Годунко // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. - Кіровоград: КНТУ, 2011. - Вип. 24, ч. 1. - С. 279-283.