

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:

**Визначення конструктивних залежностей багатокординатного
технологічного обладнання з паралельною кінематикою**

**Determination of structural dependencies of multi-coordinate
technological equipment with parallel kinematics**

Виконавець: здобувач гр. ГМ(МВ)-21М1,9

_____ Владислав ПАНКРАТЬСВ

Керівник: к.т.н., доцент

_____ Іван ВАЛЯВСЬКИЙ

Рецензент: к.т.н., професор

_____ Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

Завідувач кафедри ММР

_____ Андрій ГРЕЧКА

Кропивницький – 2023

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет Механіко-технологічний

Кафедра Машинобудування, мехатроніки і робототехніки

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
(шифр і назва)

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри, голова циклової комісії _____

« ____ » _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧЕВІ

Панкратьсву Владиславу Миколайовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Визначення конструктивних залежностей багатокоординатного 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 « ____ » _____ 2023 р. № _____

2. Строк подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до роботи

3.1. Поставлена наукова задача керівником; 3.2. Аналіз компоновок багатокоординатного технологічного обладнання; 3.3. Вимоги до результатів досліджень; 3.4. Порівняльні характеристики базових конструкцій

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

4.1. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою
4.2. Конструкція і кінематичні залежності технологічного обладнання з паралельною кінематикою типу гексапод

4.3. Дослідження параметрів робочого простору

4.4. Техніко-економічні розрахунки

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

1. Визначення конструктивних залежностей багатокоординатного технологічного обладнання з паралельною кінематикою; 2. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою; 3. Верстат-гексапод з додатковими напрямними; 4. Просторові функціональні залежності верстатів-гексаподів; 5. Вплив діапазону довжин кінематичних ланок на робочий простір; 6. Вплив кута нахилу виконавчого органа на робочий простір; 7. Робочий простір верстата-гексапода з вертикальними напрямними; 8. Залежність параметрів робочого простору від зміни координат опорних шарнірів у вертикальному напрямку; 9. Загальна форма робочого простору верстата-гексапода

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

« ____ » _____ 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд літературних джерел	Лютий 2023	вик.
2.	Вступ, мета та задачі роботи	Лютий-березень 2023	вик.
3.	Розробка компоновки верстата	Лютий-березень 2023	вик.
4.	Визначення кінематичних залежностей	Березень 2023	вик.
5.	Дослідження параметрів робочого простору	Березень-квітень 2023	вик.
6.	Висновки	Травень 2023	вик.
7.	Визначення економічної ефективності	Квітень-травень 2023	вик.
8.	Оформлення роботи	Травень 2023	вик.

Здобувач _____ Панкрат'єв В.М.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

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

Анотація

Панкратьєв В.М. Визначення конструктивних залежностей багатокординатного технологічного обладнання з паралельною. Випускна кваліфікаційна робота для освітнього ступеня «магістр» – ЦНТУ, 2023. – 75 с., 21 іл., 31 бібліогр..

Розглянуто шляхи розширення функціональних можливостей верстатів з паралельною кінематикою є недостатньо дослідженими. Запропоновано компоновку верстата-гексапода з додатковими напрямними та досліджено вплив напрямних на геометричні параметри робочого простору.

Визначено параметри, що впливають на робочий простір верстатів-гексаподів, та запропоновано метод збільшення робочого простору верстата-гексапода. Запропоновано компоновку верстата-гексапода, що дозволяє спростити форму робочого простору та збільшити його об'єм.

Всі приведені зміни економічно обґрунтовані.

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

Annotation

Pankratiev V.M. Determination of structural dependencies of multi-coordinate technological equipment with parallel kinematics. Graduation qualification thesis for the educational degree "master" - Central Ukrainian National Technical University, 2023. - 75 pp., 21 illustrations, 31 bibliographies.

Ways of expanding the functional capabilities of parallel kinematics machine tools are insufficiently researched. The layout of the hexapod machine tools with additional guides is proposed and the influence of the guides on the geometric parameters of the workspace is investigated.

The parameters affecting the working space of hexapod machine tools are determined, and a method of increasing the working space of the hexapod machine tools is proposed. The work proposes a layout of the hexapod machine tools, which allows to simplify the workspace shape and increase its volume.

All the above changes are economically justified.

Keywords: machine tools, hexapod machine tools, workspace, parallel kinematics.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ	7
1.1. Загальні відомості про технологічне обладнання з паралельною кінематикою.....	7
1.2. Схеми та технічні рішення верстатів з паралельною кінематикою..	8
1.3. Переваги та недоліки механізмів з паралельною кінематикою	22
1.4. Мета і задачі досліджень	28
РОЗДІЛ 2 КОНСТРУКЦІЯ І КІНЕМАТИЧНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ ТИПУ ГЕКСАПОД	29
2.1. Конструкція та принцип дії удосконаленої компоновки верстата-гексапода	29
2.2. Просторові функціональні залежності верстатів-гексаподів	33
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО ПРОСТОРУ ВЕРСТАТІВ-ГЕКСАПОДІВ	45
3.1. Аналіз робочого простору верстатів-гексаподів	45
3.1.1. Вплив діапазону довжин кінематичних ланок	46
3.1.2. Вплив кута нахилу виконавчого органа	48
3.1.3. Робочий простір верстата-гексапода з додатковими напрямними	49
РОЗДІЛ 4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ОБГРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	57
4.1. Загальні вихідні дані.....	57
4.2. Визначення витрат на підготовку виробництва	58
4.3. Визначення витрат на проведення модернізації верстата	59
4.4. Визначення експлуатаційних витрат (собівартості обробки)	63
4.5. Розрахунок показників економічної ефективності	67
ВИСНОВКИ.....	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	70

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасне машинобудівна промисловість вимагає застосування виробничих систем, які здатні швидко адаптуватися до нових умов виробництва. Традиційне верстатне обладнання вже майже вичерпало можливість модернізації для забезпечення сучасних вимог, тому на перший план виходить пошук нових нетрадиційних технологій і обладнання.

Одним з таких перспективних напрямків є створення технологічного обладнання з паралельною кінематикою, побудованого на основі просторових механізмів паралельної структури. Таке обладнання є високорухомими технологічними системами з широкими функціональними (руховими, технологічними) можливостями по обробці деталей складної форми, які дозволяють реалізувати гнучкі технології. Одним з найбільш популярних і поширених варіантів верстатів з паралельною кінематикою є верстати-гексаподи.

Таким чином, створення та дослідження технологічного обладнання з паралельною кінематикою є актуальною проблемою, що дозволить підвищити продуктивність, розширити функціональні можливості обладнання, ефективність проектування та експлуатації.

Метою даної роботи є визначення конструктивних залежностей багатокоординатного технологічного обладнання з паралельною кінематикою.

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

- проаналізовано існуючі схеми побудови механізмів паралельної структури;
- розроблено компоновку верстата-гексапода з додатковими напрямними та вирішено зворотну задачу кінематики для цієї компоновки;
- виконано моделювання робочого простору верстата-гексапода з додатковими напрямними;

- розраховано техніко-економічні показники ефективності проектування та використання гексаподів.

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

Предмет дослідження – конструктивні залежності гексаподів.

Практичне значення – визначено параметри, що впливають на робочий простір верстатів-гексаподів, та запропоновано метод збільшення робочого простору верстата-гексапода.

Особистий внесок – досліджено вплив додаткового переміщення шарнірів вздовж напрямних на геометричні параметри робочого простору верстата-гексапода.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ

1.1. Загальні відомості про технологічне обладнання з паралельною кінематикою

Більшість технологічного обладнання, що використовується у промисловості (наприклад, фрезерні, свердлильні, токарні верстати, промислові роботи тощо), має кінематичну структуру з послідовними або незамкненими кінематичними ланцюгами. У зв'язку з цим кожна вісь несе на собі наступну вісь, включаючи її приводи і з'єднання (рис. 1.1). Найчастіше конструкції такого обладнання ґрунтуються на ортогональному розміщенні трьох координатних осей, які можуть бути доповнені двома обертальними осями для спрощення використання прямокутної системи координат при керуванні просторовими переміщеннями [11].

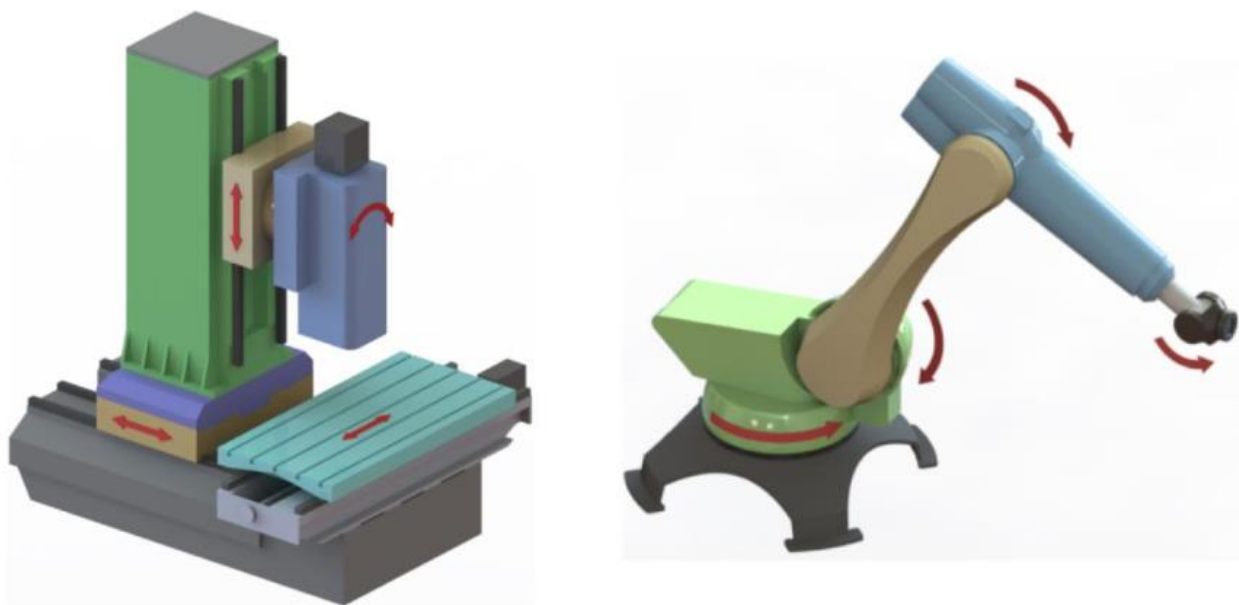


Рис. 1.1. Традиційна архітектура обладнання з послідовною кінематикою

Незважаючи на те, що кінематичний аналіз систем з послідовними осями є нескладною задачею, вони мають і суттєвий недолік: накопичення похибок, оскільки неточність позиціонування однієї осі призводить до неточності позиціонування іншої осі, збільшуючи, таким чином, похибки з кожною наступною ланкою. На додачу до цього, таке обладнання з послідовною кінематикою, мають станину, супорт, інші подібні деталі, що потребує їх встановлення на бетонний фундамент для забезпечення стабільності несучої системи. Це приводить до того, що обладнання потребує велику виробничу площу для установки, і має певні проблеми транспортування.

У зв'язку з цим проектування обладнання, ґрунтованого на замкненій паралельній кінематиці, на сьогодні є однією з перспективних технологій, яка привертає до себе все більшу увагу з боку ведучих верстатобудівних підприємств [3, 12, 16, 17, 21]. Таке обладнання складається з рухомої платформи (на якій встановлено робочий виконавчий орган, наприклад, ріжучий інструмент) та нерухомої основи, які поєднані між собою N незалежними кінематичними ланцюгами. Кожний з цих ланцюгів складається з двох кінематичних ланок. Рух всієї конструкції забезпечується N лінійними приводами, по одному на кожний ланцюг.

Існують різноманітні концепції механізмів паралельної структури та технологічного обладнання, побудованого на їх основі. Найбільш поширеними з них є триподи, гексаподи (в яких кінематичні ланки можуть змінювати довжину) і «дельта» (в яких кінематичні ланки виконані у вигляді паралелограма і можуть працювати за двома принципами: примусового обертання навколо шарнірів або переміщення вздовж напрямних).

1.2. Схеми та технічні рішення верстатів з паралельною кінематикою

Потреби промисловості в обладнанні постійно зростають. Сучасне обладнання повинно бути більш точним, швидким, надійним, продуктивним,

адаптивним тощо. Одним з перспективних трендів, направлених на вирішення проблеми задоволення потреб підприємств у сучасному обладнанні, є проектування верстатів з паралельною кінематикою. Тому дослідження механізмів паралельної структури і обладнання на їх основі, розпочаті ще в минулому столітті, в даний час суттєво збільшились [21].

Один з перший паралельних роботів в 1947 році сконструював доктор Ерік Гауф (рис. 1.2). Цей робот був побудований за схемою октаедрального гексапода і використовувався для випробування автомобільних шин під різним навантаженням.

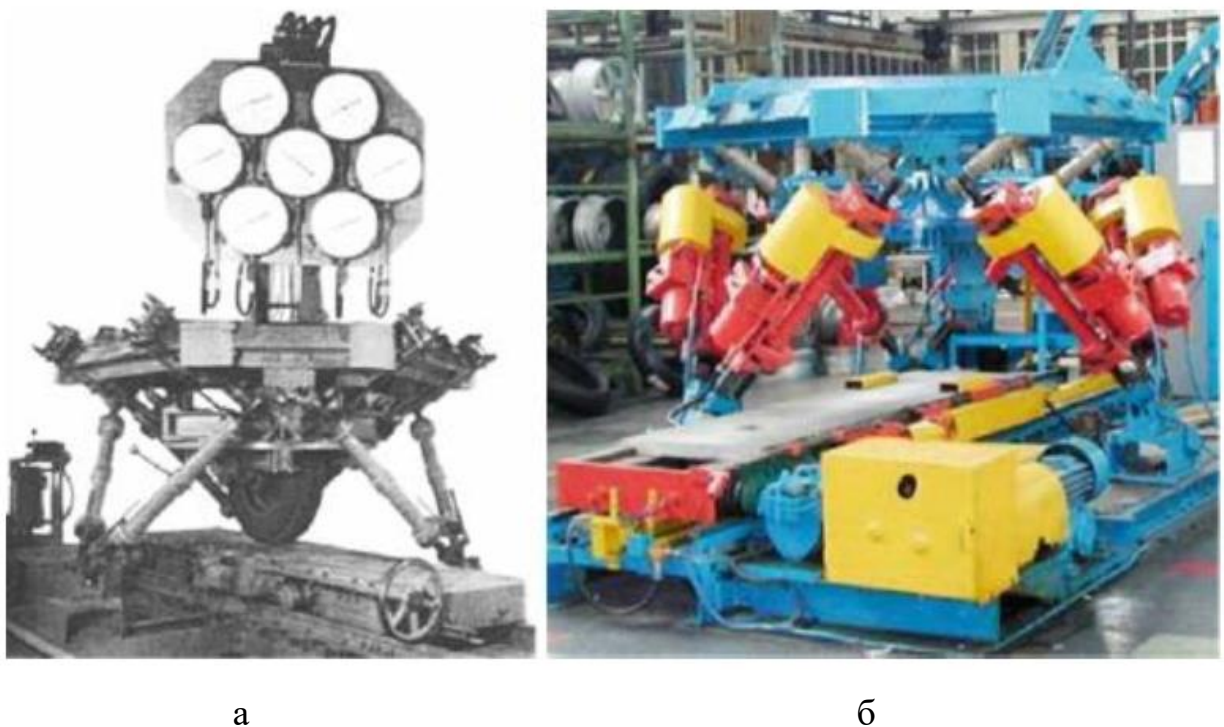


Рис. 1.2. Перший октаедральний гексапод конструкції Е. Гауфа: а – оригінальна конструкція 1954 р.; б – модернізований зразок 2000 р.

Гексапод Гауфа складається з шести однакових штанг змінної довжини, що з'єднують нерухому основу з рухомою платформою, на якій закріплюється шина. Кінематичний ланцюг, пов'язаний з кожною з шести стоек від основи до платформи складається з шарніра Гука, рухомої тяги, призматичного з'єднання, другої рухомої тяги та кульового шарніра, закріпленого на рухомій платформі. Положення та орієнтація рухомої

платформи разом зі закріпленою шиною змінюється відповідно до варіації довжини штанг. Шина обертається конвеєрною стрічкою, і такий механізм дозволяє оператору вимірювати знос та задири шини за різних умов її експлуатації.

Описаний універсальний механізм відіграв важливу роль у галузі промислових роботів і все ще має велике значення у наукових дослідженнях паралельних маніпуляторів, які мають безліч значних переваг порівняно з традиційними механізмами із послідовною кінематикою. До таких переваг відносяться підвищена жорсткість і вантажопідйомність, підвищене відношення сили і моменту, знижені моменти інерції, чудові динамічні характеристики і менша накопичена похибка позиціонування, до того ж для паралельних роботів більш просто вирішується зворотна задача кінематики, що зручно для керування в реальному часі.

В 1980-х рр. професором Реймондом Клавелем і винахідником Карлом-Еріком Ньюманом були розроблені найбільш успішні на сьогоднішній день конструкції роботів з паралельною кінематикою, які отримали назву Delta robot і Tricept robot відповідно. Обидві конструкції мали комерційний успіх і до сьогодні застосовують у різних галузях промисловості.



Рис. 1.3. Загальний вигляд роботів Tricept robot (а) і Delta robot (б)

В 1994 р. дві американські верстатобудівні компанії «Giddings & Lewis» і «Ingersoll» здивували світ, представивши новий тип верстата (рис. 1.4). Обидва представлені верстати були засновані на концепції паралельної кінематики. Обидві компанії назвали свій новий зразок верстата гексаподом.

Прототип компанії «Ingersoll» був 12-вузловим гексаподом, змонтованим на октаедричній рамі зі шпинделем, спрямованим вертикально вниз на оброблювану деталь. Прототип компанії «Giddings & Lewis», який отримав назву «Variax Hexacenter», був фрезерним верстатом для високошвидкісного фрезерування алюмінію, розроблений на основі конструкції авіасимулятора, з стійками, що перехрещуються, і шпинделем, орієнтованим вниз від платформи у напрямку робочого простору, обмеженого верстатом.



а



б

Рис. 1.4. Верстати-гексаподи компаній «Ingersoll» (а) і «Giddings & Lewis» (б)

Особливістю верстата «Variax Hexacenter» є система обробки даних. Вона дозволяє компенсувати зміну деяких його характеристик, що виникають у процесі експлуатації. Наприклад, на довжину штанг впливають теплові деформації, тому кожна штанга має вбудований лазерний інтерферометр, який контролює її довжину та передає отриману інформацію на комп'ютер системи керування, який видає команду на збільшення чи зменшення кожної штанги, внаслідок чого шпиндель переміщується по

заданій траєкторії. При цьому враховуються також кінематичні та теплові похибки розмірів деталей верстата та вносяться відповідні корекції довжини штанг.

Виробник стверджує, що точність кожної координатної осі складає 10 мкм, що наближає верстат до координатних вимірювальних машин. Жорсткість верстат складає 175 Н/мкм. Швидкість установчих переміщень – 66 м/хв, робочих – до 15 м/хв.

Технічні характеристики верстатів-гексаподів «Ingersoll» і «Giddings & Lewis» наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Технічні характеристики верстатів «Ingersoll» і «Giddings & Lewis»

Найменування параметра	Одиниця вимірювання	«Ingersoll»	«Giddings & Lewis»
Кількість управляємих координат		5	5
Частота обертання шпинделя	хв ⁻¹	*	100-15000
Швидкість робочих переміщень виконавчого органу	м/хв	*	15
Швидкість прискорених переміщень виконавчого органу	м/хв	*	66
Точність позиціонування	мм	0.02	0,010
Максимальний кут повороту виконавчого органу	градус	*	25
Розміри робочого простору	мм	600×600×800	630×630×630
Потужність приводу	кВт	*	22,0
Габаритні розміри верстата	мм	6700×5600	6700×6550×4300

* – інформація відсутня

Першим представником технологічного обладнання з паралельною кінематикою, розробленим в Німеччині, є фрезерний верстат-гексапод 6X фірми MIKROMAT (рис. 1.5).

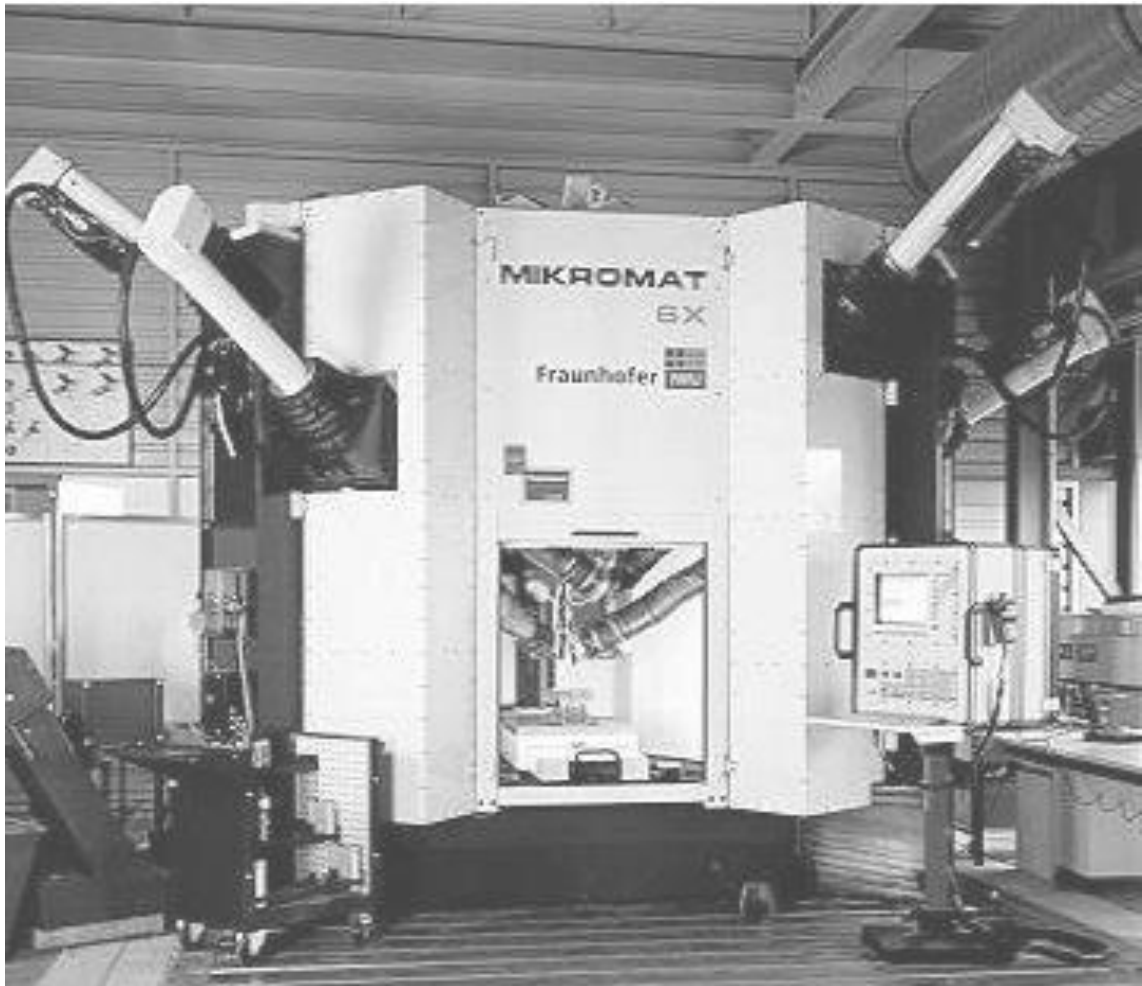
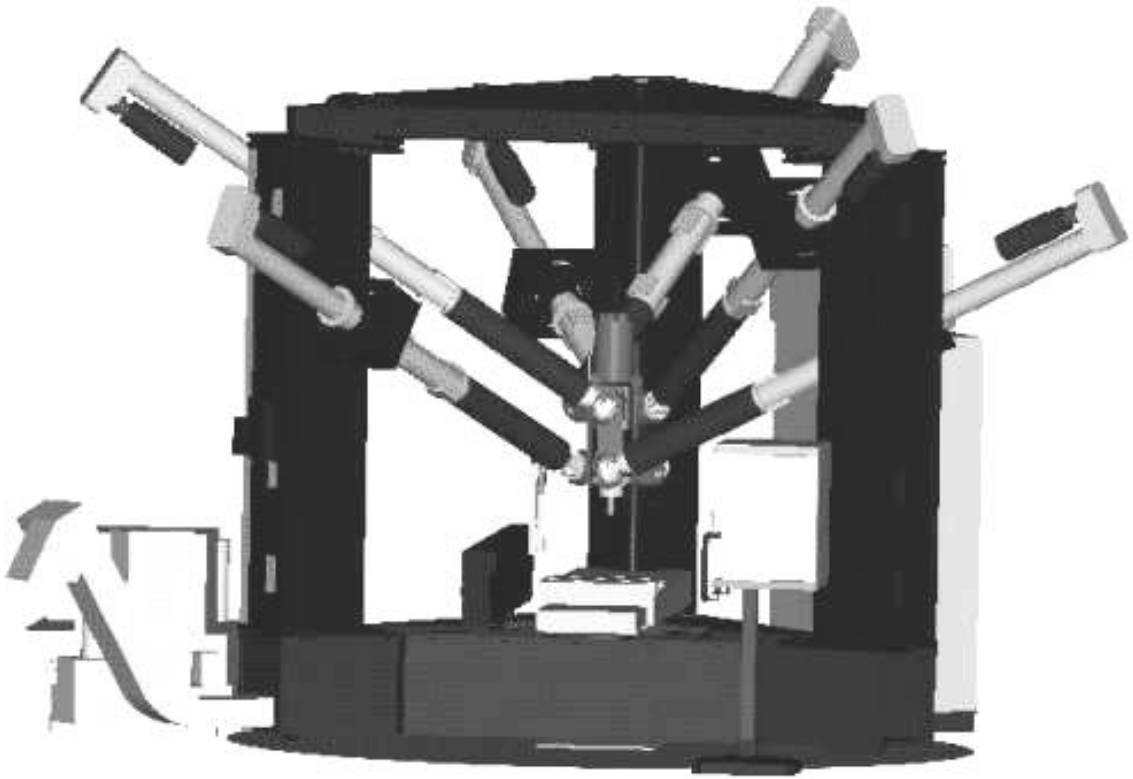


Рис. 1.5. Верстат-гексапод моделі 6X фірми MIKROMAT (Німеччина)

Цей верстат (рис. 1.6) має шість штанг, регулювання довжини яких виконується кульково-гвинтовими парами від цифрових приводів фірми INDRAMAT. Заготовки при обробці розміщуються на робочому столі розміром 630×630 мм вантажопід'ємністю 1000 кг.

Розміри робочої зони (рис. 1.6, б) по осям X, Y, Z складають 630×630×630 мм. Мотор-шпиндель має можливість нахилу у середині робочої зони у будь-якому напрямку на кут до 30°, а по її межах – на кут до 15°. Він містить систему водяного охолодження та за 1.5 с досягає

максимальної частоти обертання $30\,000\text{ хв}^{-1}$. Крутний момент до частоти обертання 9000 хв^{-1} складає не менше як $17\text{ Н}\cdot\text{м}$.



а



б

Рис. 1.6. Компонівка
верстата-гексапода мод. 6Х
(а) і його робоча зона (б)

На верстаті встановлено пристрій ЧПУ мод. ANDRONIC 400 фірми ANDRON (Німеччина) з часом зміни кадрів 0.5 мс. Шестипозиційний інструментальний магазин дозволяє здійснювати обробку складних фасонних інструментів, прес-форм, штампів та гравюр. Діаметр фрез, які розміщуються у магазині, досягає 70 мм при довжині 200 мм та масі 5 кг. Зміна інструментів виконується за 6 с. Маса верстата не перевищує 11 т. Сумарна потужність усіх двигунів досягає 100 кВт. Основні технічні характеристики верстата наведені у табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Технічні характеристики верстата мод. 6X фірми MIKROMAT

Найменування параметра	Одиниця вимірювання	Значення
Кількість керуючих координат		5
Частота обертання шпинделя	хв ⁻¹	30000
Точність позиціонування	мм	0.005
Максимальний кут повороту виконавчого органу	градус	15-30
Розміри робочого простору	мм	630×630×630
Потужність приводу	кВт	16
Габаритні розміри верстата	мм	5400×6200×4000

На п'яти-координатному верстаті-гексаподі мод. HEXVANTAGE фірми PATHFINDER'S INC (США) (рис. 1.7) можна оброблювати заготовки діаметром до 160 мм та висотою до 180 мм з точністю $\pm 0,0125$ мм. Максимальний кут нахилу шпинделя від вертикальної осі складає 15°. Максимальна подача виконавчого органу – 75 м/хв. Частота обертання шпинделя до 25000 хв⁻¹. Управління верстатом здійснюється від персонального комп'ютера.

У верстата мод. G500 (рис. 1.8) фірми GEODETIC (Великобританія) шпиндель встановлений на невеликій платформі та шарнірно зв'язаний з кінцями шести штанг.

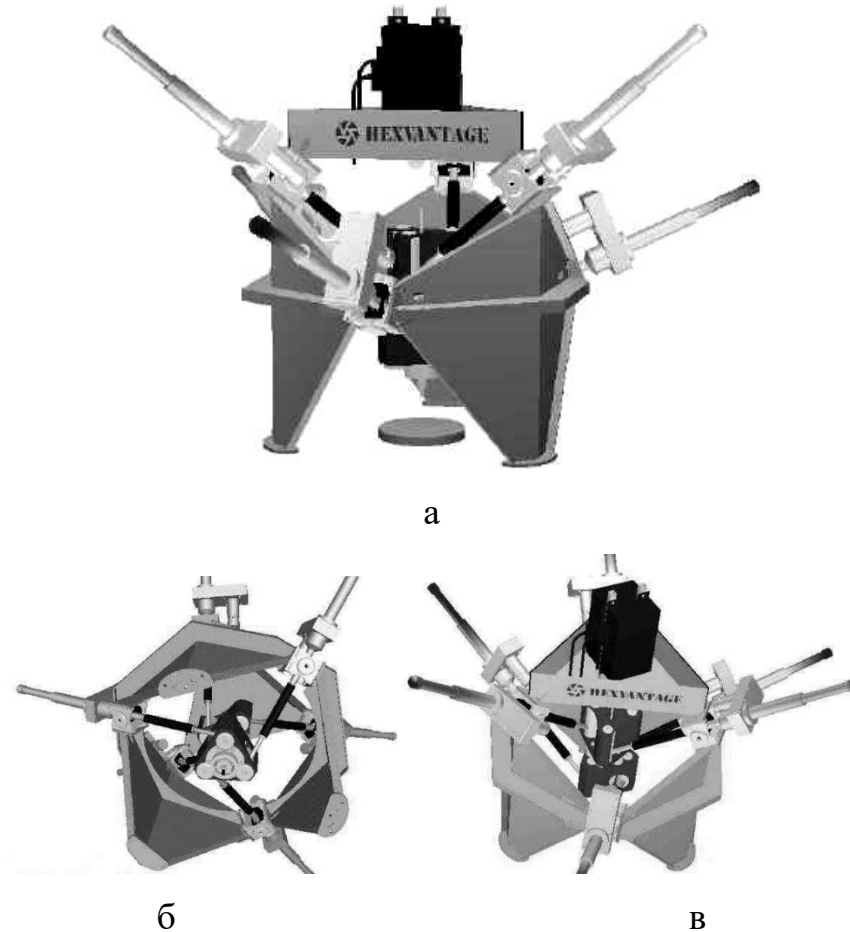


Рис. 1.7. П'яти-координатний верстат-гексапод мод. HEXVANTAGE фірми PATHFINDER'S INCORPORATED (США) (а) і його робоча зона: б – вид знизу; в – вид зверху

Штанги 1 (рис. 1.8, б) з'єднані з виконаною у вигляді рами несучою системою 2 верстата, а їх кінці виступають за її верхню частину. Під час функціонування верстата штанги входять у робочу зону або виходять з неї, що забезпечує відповідні переміщення шпиндельної платформи 3. Нахил шпинделя на кут до 90° забезпечують додаткові шарнірні з'єднання 4. Крім того, шпиндельна платформа також має можливість нахилитися. На рамі, яка може бути встановлена на опорах різних типів, розташовані усі двигуни та

механізми для переміщення штанг та шпindelної платформи. На такому верстаті реалізується 8-координатна обробка деталей.

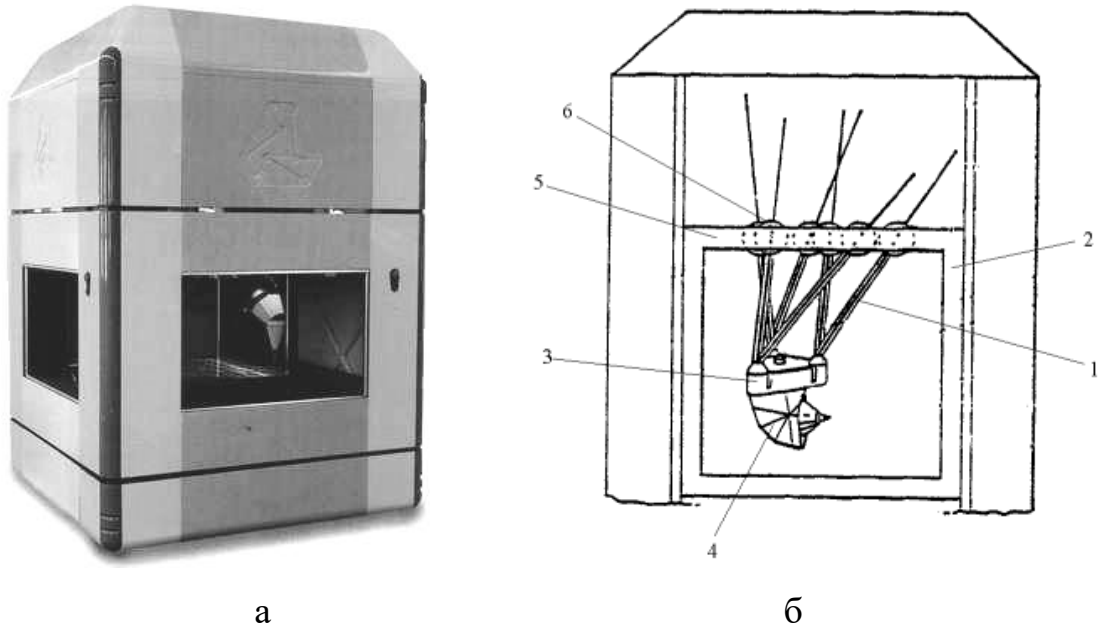


Рис. 1.8. Верстат-гексапод мод. G500 фірми GEODETIC (Великобританія):

а – загальний вигляд; б – схема

Верхня платформа 5 містить шість приводів 6, за допомогою яких забезпечується переміщення штанг. Кожний привод має спеціальні сферичні втулки, вентильний електродвигун постійного струму, пристрій кодування сигналів управління.

З'єднання окремих елементів верстата забезпечуються спеціальними затискувачами. Позиціонування елементів верстату відносно один одного забезпечується трьома циліндрами, встановленими на одному елементі. Завдяки такій системі монтаж та демонтаж вузлів верстату може здійснюватись з великою точністю (долі мікрметра). Це дозволяє вільно знімати відповідні модулі верстата для обслуговування або ремонту, а потім встановлювати їх практично без налагодження.

Шпиндель має безступінчасте регулювання частоти обертання до 60000 хв^{-1} . Шпиндель установлений у керамічних підшипниках кочення та має

примусове повітряне охолодження, яке також забезпечує видалення стружки та змащувально-охолоджувальної рідини з робочої зони.

Основні технічні характеристики верстата мод. G500 наведені в табл. 1.3.

Верстат-гексапод мод. TORNADO 2000 фірми HEXEL (США) (рис. 1.9) має вертикальну компоновку і призначений для 5-координатного фрезерування деталей. Шість штанг змінної довжини розташовані попарно паралельно (рис. 1.9, б). Конструкція штанг дозволяє збільшити діапазон переміщень робочого органу у порівнянні з іншими верстатами подібних розмірів. Керування верстатом здійснюється від персонального комп'ютера. Точність позиціонування 0,025 мм.

Таблиця 1.3

Технічні характеристики верстата мод. G500 фірми GEODETIC

Найменування параметра	Одиниця вимірювання	Значення
Кількість керованих координат		8
Частота обертання шпинделя	хв ⁻¹	60000
Точність позиціонування	мм	0.025
Максимальний кут повороту виконавчого органу	градус	90
Розміри робочого простору	мм	500×500×500
Потужність приводу	кВт	4
Габаритні розміри верстата	мм	2200×1800×2000

Штанги аналогічної конструкції використовуються у верстаті COSMOCENTER PM-600 (рис. 1.10) фірми OKUMA (Японія), призначеного для обробки складних об'ємних поверхонь штамів.



а



б

Рис. 1.9. Верстат-гексапод мод. TORNADO 2000 фірми HEXEL (США):
а – загальний вигляд; б – робоча зона



Рис. 1.10. Загальний вигляд верстата-гексапода мод. COSMOCENTER
PM-600 фірми OKUMA (Японія)

Основним компонентом цього верстата-гексапода є шестикоординатний механізм паралельної структури (рис. 1.11). Його штанги 2 виконані у вигляді кульково-гвинтових пар, розміщених у порожнистому приводі, корпус якого з'єднаний з базовою конструкцією верстата 1 за допомогою опорних шарнірів 4. Така конструкція штанг не обмежує їх максимальну довжину, що дозволяє значно збільшити розміри робочого простору та забезпечити максимальну швидкість переміщення штанг до 120 м/хв з прискоренням до 15 м/с^2 . Частота обертання шпинделя з потужністю привода 7 кВт досягає 30000 хв^{-1} . Виконавчий орган може повертатись у межах робочого простору на кут до 25° від вертикальної осі.

Основні технічні характеристики верстата мод. COSMOCENTER PM-600 наведені у табл. 1.4.

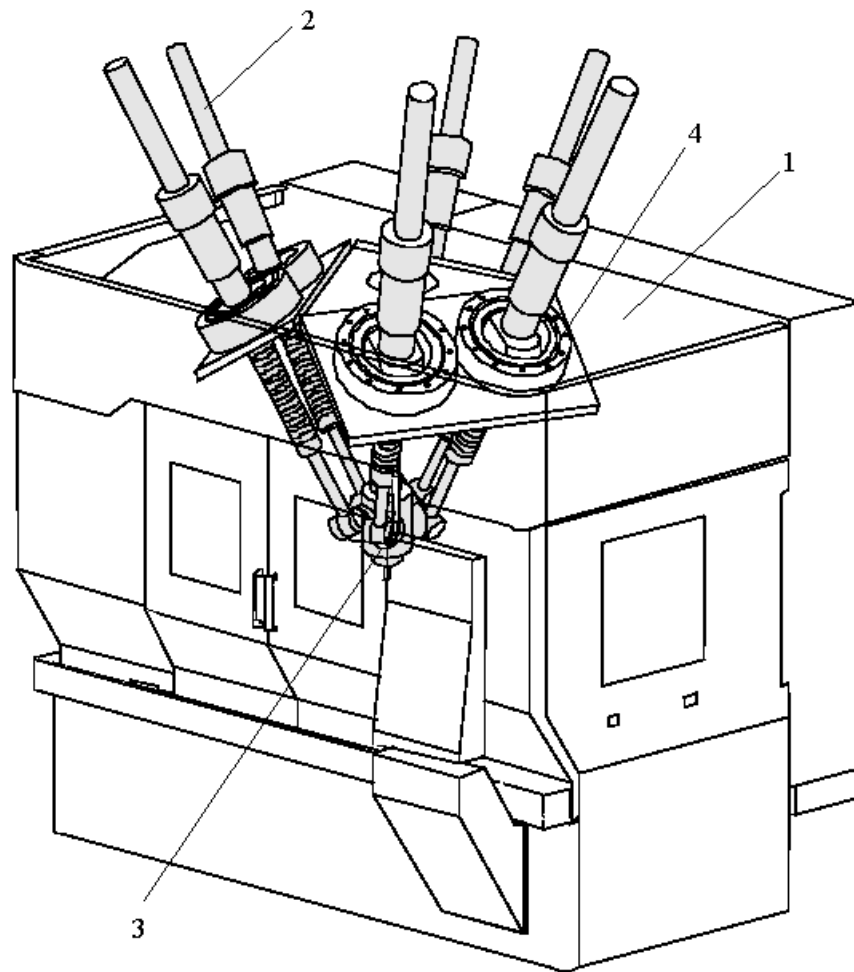


Рис. 1.11. Структура верстата-гексапода мод. COSMOCENTERPM-600

Таблиця 1.4

Основні технічні характеристики верстата-гексапода мод.
COSMOCENTERPM-600 фірми OKUMA (Японія)

Найменування параметра	Одиниця вимірювання	Значення
Частота обертання шпинделя	хв ⁻¹	30000
Швидкість прискорених переміщень виконавчого органу	м/хв	120
Максимальний кут повороту виконавчого органу	градус	25
Розміри робочого простору	мм	420×420×400
Потужність приводу	кВт	7
Габаритні розміри верстата	мм	2270×2030

Дослідження, пов'язані з поліпшенням паралельних верстатів, все ще продовжуються. При цьому головними напрямками досліджень є контроль вібрацій, удосконалення методів калібрування, підвищення жорсткості, визначення траєкторій руху, аналіз точності та розробка нових конструкцій верстатів з розширеними функціональними можливостями. Крім проектування верстатів для відносно важких режимів роботи також ведуться роботи зі створення більш легких верстатів для обробки м'яких матеріалів, таких як деревина. Слід зазначити, що при розробці конструкцій верстатів велика увага приділяється конфігураціям вузлів, якими здійснюється з'єднання платформ, оскільки це вони значно впливають на характеристики верстатів.

1.3. Переваги та недоліки механізмів з паралельною кінематикою

Незважаючи на існування досить перспективних верстатів з паралельною кінематикою, лише деякі з них використовуються у промисловості. Їхнє повільне просування пояснюється різними факторами, серед яких можна виділити наступні [16]:

1) після десятка років розробки такі паралельні структури поки що не досягли рівня опрацювання класичних верстатів, досвід проектування яких накопичувався століттями;

2) властивості паралельних структур докорінно відрізняються від властивостей їх класичних аналогів із послідовною кінематикою. Даним фактом часто нехтують виробники, які концентрують зусилля головним чином на розробці механічних компонентів, тоді як більш загальні конструктивні рішення залишаються поза увагою. Це призводить до створення прототипів із серйозними конструкторськими помилками;

3) паралельні верстати і роботи за своєю суттю є нелінійними, в цей же час, системи ЧПУ, які використовуються для керування паралельними структурами, розроблені насамперед для лінійних машин. Очевидно, що використання класичного контролера ЧПУ для паралельного робота не дозволить керувати ним найкращим чином. Симуляція сукупної виробничої системи (CAD, контролер і паралельний верстат), яка включає всі можливі джерела похибки, показує наступне. Похибка позиціонування паралельного верстата за умови, що він має хорошу конструкцію, на 10-20% складається з похибок, обумовлених CAD-системою, на 70% з похибок, походять від системи управління і лише на 10% з похибок, спричинених власне верстатом. Тому, очевидно, що в даному випадку мають бути розроблені спеціальні контролери для паралельних структур, а вихідні дані CAD-системи повинні бути адаптовані для паралельних верстатів.

Численні переваги верстатів-гексаподів включають наступне:

1) Шість ступенів свободи. Гексапод, з його шістьма штангами, забезпечує шість ступенів вільності інструментальної платформи. Крім поступальних переміщень в ортогональних напрямках X, Y та Z платформа також може здійснювати кутові переміщення (нахилятися та закручуватися). Це дозволяє шпинделю повертатися на довільні кути при обробці складних деталей геометричної форми таких, як лопатки турбін, прес-форми, штампи тощо.

2) Гнучкість та адаптивність. Гексаподи здатні працювати без перерв у відповідності до гнучкого або адаптивного виробничого процесу. При цьому під гнучкістю розуміється здатність реагувати на заплановані зміни, а під адаптивністю – здатність реагувати на незаплановані зміни. Механічна простота та відсутність потреби у спеціальному фундаменті надає користувачеві можливість швидко реконфігурувати обладнання відповідно до змін на потоковій лінії з опцією простого зберігання розібраних верстатів, коли вони не потрібні.

3) Продуктивність. Гексаподи забезпечують більш високу продуктивність за рахунок:

а) використання високошвидкісного пристрою автоматичної зміни інструмента;

б) зниження маси рухомих деталей для досягнення дуже швидких прискорень/уповільнень до 0,5-1 G. Багато конструкцій гексаподів забезпечують швидкості подач до 30 м/хв зі збереженням точності обробки. Така швидкість подачі набагато перевищує швидкість подачі звичайних верстатів, у яких часто заготовка переміщається разом із масивною базовою деталлю;

в) використання високошвидкісних та високоточних шпинделів великої потужності;

4) Жорсткість та стійкість. Конструкція гексапода характеризується своїм жорстким каркасом, де відсутні значні деформації під впливом навантажень. Наприклад, жорсткість гексапода фірми Ingersoll приблизно в

3-4 рази вище, ніж жорсткість звичайного п'ятикоординатного обробного центру того ж класу.

5) Точність та надійність. Будь-які навантаження, що виникають при роботі гексапода, визначаються при розтягненні або стисканні. Отже, верстат не схильний до впливу згинальних моментів, що сприяє підвищенню точності обробки. Паралельне розташування стійок призводить до усереднення похибки позиціонування. Гексаподи легші, ніж традиційні верстати і оскільки тертя ковзання в них практично відсутнє, вони характеризуються набагато меншою величиною мертвого ходу при реверсуванні осей, що сприяє більш плавній траєкторії руху. У цьому ж зв'язку, довжиною стійок можна керувати з точністю до 2,5 мкм із використанням спеціального програмного забезпечення, а в деяких моделях гексаподів забезпечується субмікронна точність.

6) Специфіка встановлення. За рахунок концентрації всіх сил, що виникають у процесі обробки, усередині замкнутої конструкції гексапода досягається важлива перевага, а саме відсутність потреби у спеціальному фундаменті. Розробка та встановлення фундаменту для звичайних верстатів пов'язана із суттєвими витратами. Незалежність гексапода від фундаменту дозволяє йому успішно функціонувати, наприклад, на палубі корабля, що знаходиться у відкритому морі, будучи покладеним на бік або підвішеним до стелі без шкоди для його точності обробки.

7) Простота. Ще одним потенціалом гексаподів є їхня простота конструкції та легкість виробництва. Число деталей у гексаподі становить близько 300 штук, у той час як у звичайному верстаті воно становить близько 1000 штук. Іншою важливою характеристикою є велика кількість однакових деталей. Це настільки спрощує та прискорює складання гексаподу, що він може продаватися у розібраному вигляді, як комплект деталей.

8) Мобільність. Гексапод характеризується високою мобільністю.

9) Висока навантажувальна здатність. Високе номінальне навантаження (потужність/вага) є дуже важливою характеристикою

гексаподів. Сили різання, що діють на рухому платформу, розподіляються приблизно однаково по шести паралельним стійкам. Це означає, що кожна стійка піддається тільки $1/6$ від повного навантаження. Крім того, стійки відчують тільки навантаження стискання або розтягування, внаслідок чого немає необхідності робити їх масивними та великорозмірними, як деталі традиційних верстатів.

10) Масштабованість. Розміри гексаподів можуть масштабуватися, як у більшу, так і в меншу сторону для адаптації до безлічі областей застосування, що варіюються від мікроскладання та хірургії до фрезерних, свердлильних, токарних, зварювальних, фарбувальних та вимірювальних операцій. Різновиди конструкцій гексаподів варіюються за розміром від настільних моделей для напівпровідникової промисловості до величезних таких модулів, що їх октаедрична рама є будівельною конструкцією.

11) Маневреність. Гексаподи мають складний робочий простір, що визначається полярним розмахом стійок між їх максимальним подовженням і укороченням, а також ступенем кутової рухливості. Маневреність суттєво зростає при додаванні в конструкцію гексаподу двокоординатної поворотної голівки.

12) Поліпшені системи керування. Ключовим кроком у проектуванні гексаподів стала розробка комп'ютерної системи керування та програмного забезпечення, здатних виконувати складні алгоритмічні обчислення, необхідні для керування довжинами штанг. Використовуваний в них процесор вимагає обчислювальну потужність, еквівалентну об'єднаної потужності кількох персональних комп'ютерів. Крім того, програмне забезпечення має бути здатним компенсувати усунення, температурні деформації тощо.

13) Вартість. На зміну традиційним верстатам приходять гексаподи. Оскільки створюється дедалі більше гексаподів, очікується, що у найближчому майбутньому їх ціна знизиться на 20% або нижче і буде порівнянна з ціною еквівалентних верстатів з ЧПУ. Це пояснюється тим, що

вони прості в проектуванні та збиранні. Швидке складання означає потребу в меншій кількості інвентарю, у меншому робочому просторі та менших витратах праці. Шість ідентичних штанг спрощують конструкцію гексапода, забезпечуючи легке та швидке складання та зниження витрат на технічне обслуговування. Заміна пошкоджених деталей, схильних до зносу, також не викликає жодних проблем. Управління та перевірка полегшені за рахунок використання високоефективного програмного забезпечення. Крім того, споживання енергії в гексаподах значно менше, ніж у традиційних верстатах.

Однак, незважаючи на зазначені переваги, використання гексаподів пов'язане з низкою проблем, що потребує подальших розробок та покращень конструкції. Серед основних недоліків та обмежень гексаподів можна виділити:

1) Тертя. Ця обставина є ключовою проблемою гексаподів, т.я. високі коефіцієнти тертя в їх вузлах ($\mu = 0,8$) негативно впливають на їхню точність. Однак в більш досконалих конструкціях, де використовуються спеціальні керамічні покриття та мастильні матеріали, коефіцієнт тертя може бути знижено до 0,2.

2) Довжина штанг. Точність гексапода обернено пропорційна довжині телескопічних штанг внаслідок наявності їх можливої кривизни. Ця проблема може бути усунена шляхом попереднього контролю похибок форми кожної штанги перед їх встановленням на верстат.

3) Температурні деформації. Великі температурні деформації в гексаподах спостерігаються внаслідок швидких рухів штанг, а також високих швидкостей шпинделя обертання (20000-30000 об/хв). Одним із шляхів подолання даної проблеми є відстеження температури штанг (кінематичних ланок) в реальному часі та використання заснованого на результатах попереднього інженерного аналізу алгоритму автоматичної компенсації температурного подовження штанг, закладеного в програмне забезпечення верстата.

4) Перевірка. Точність гексапода залежить не тільки від точного контролю за довжиною штанг, а також від інформації про їх геометричні характеристики. Завдяки наявності різних допусків на виготовлення штанг гексаподів їх кінцева точність залежить від багатьох факторів і велика кількість параметрів повинна бути вказана для опису геометричних характеристик механізму. Це здійснюється через трудомістку процедуру перевірки (калібрування) гексапода, яка все ще є невирішеною проблемою. Вирішення цієї проблеми вимагає розробки системи перевірки, яка гарантуватиме високий рівень точності, дозволяючи гексаподу багаторазово проводити обробку деталей із заданим допуском. Така внутрішня система перевірки повинна дозволяти гексаподам контролювати їх власні характеристики та коригувати будь-які виявлені похибки.

Крім того, кінематична структура механізму не запобігає принциповій можливості зіткнення окремих кінематичних ланок. Тому при керуванні гексаподом необхідно контролювати такт інтерполяції зони вірогідного зіткнення.

Також під час функціонування подібних механізмів кінематичні ланки та виконавчий орган можуть створювати особливу конфігурацію, яка викликає втрату однієї або декількох ступенів вільності, що негативно впливає на їх працездатність.

Аналіз технічних характеристик технологічного обладнання з паралельною кінематикою показує, що більшість компоновок мають суттєвий недолік: співвідношення об'єму робочого простору до загального об'єму верстата має значно менші показники, ніж у верстатів традиційної компоновки. При цьому форма робочого простору має складну конфігурацію, що ускладнює визначення розташування оброблюваної деталі в робочій зоні.

1.4. Мета і задачі досліджень

Метою роботи є розширенні функціональних можливостей багатокоординатних верстатів з паралельною кінематикою.

Поставлена мета досягнута шляхом вирішення таких задач:

- аналіз існуючих схем побудови верстатів з паралельною кінематикою та пошук шляхів збільшення коефіцієнта використання робочого простору;
- постановка і розв'язок зворотної задач кінематики для запропонованої компоновки верстата і визначення кінематичних залежностей;
- виконання моделювання робочого простору верстата-гексапода з додатковими напрямними.

РОЗДІЛ 2

КОНСТРУКЦІЯ І КІНЕМАТИЧНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ ТИПУ ГЕКСАПОД

2.1. Конструкція та принцип дії удосконаленої компоновки верстата-гексапода

Однією з особливостей верстатів-гексаподів є складний робочий простір (рис. 2.1, 2.2), форма і розміри якого змінюються при зміні положення виконавчого органу.

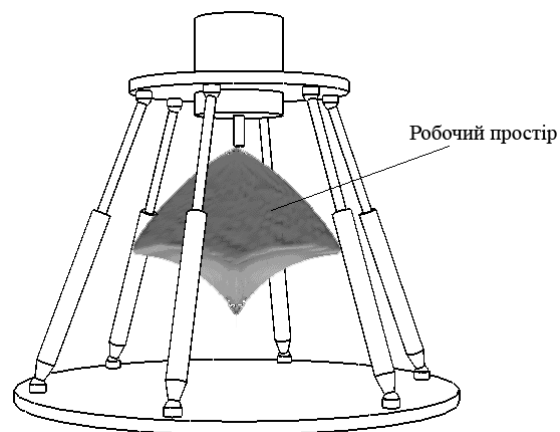


Рис. 2.1. Робочий простір верстата-гексапода

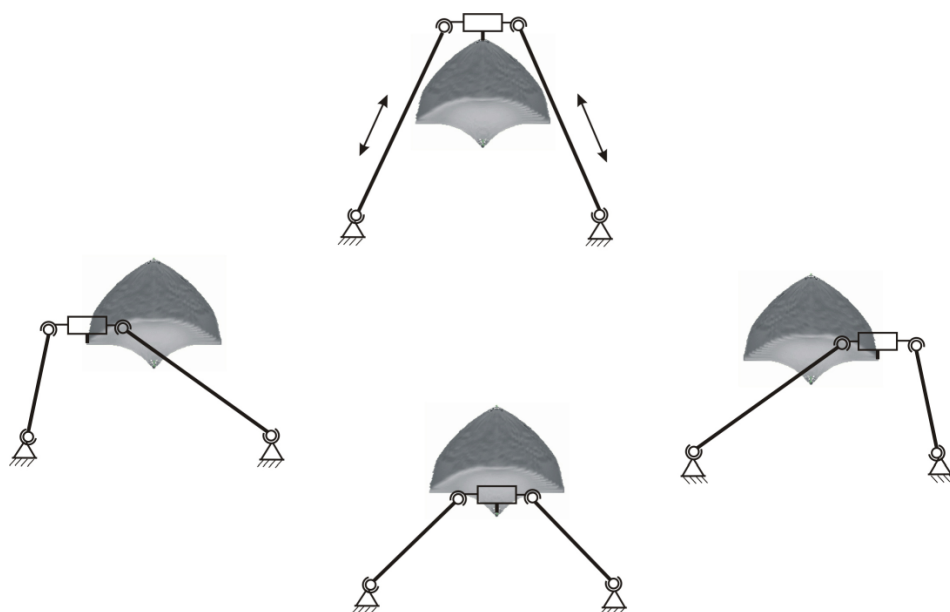


Рис. 2.2. Формування робочого простору верстата-гексапода

Так, при зміні кута нахилу виконавчого органу відносно координатних осей, форма, розміри та розташування у просторі робочого простору також змінюються (рис. 2.2). Це призводить до деяких труднощів технологічного характеру. Наприклад, необхідно оцінювати габаритні розміри і форму оброблюваної заготовки, конфігурацію її поверхонь для того, щоб ефективно розмістити заготовку у межах робочого простору верстата-гексапода. Таким чином, можна побачити, що реальний ефективний робочий простір (тобто такий, в межах якого можна вести багатокоординатну обробку заготовки з доступом до всіх оброблюваних поверхонь всіма необхідними методами обробки), ще менший, ніж теоретично можливий робочий простір.

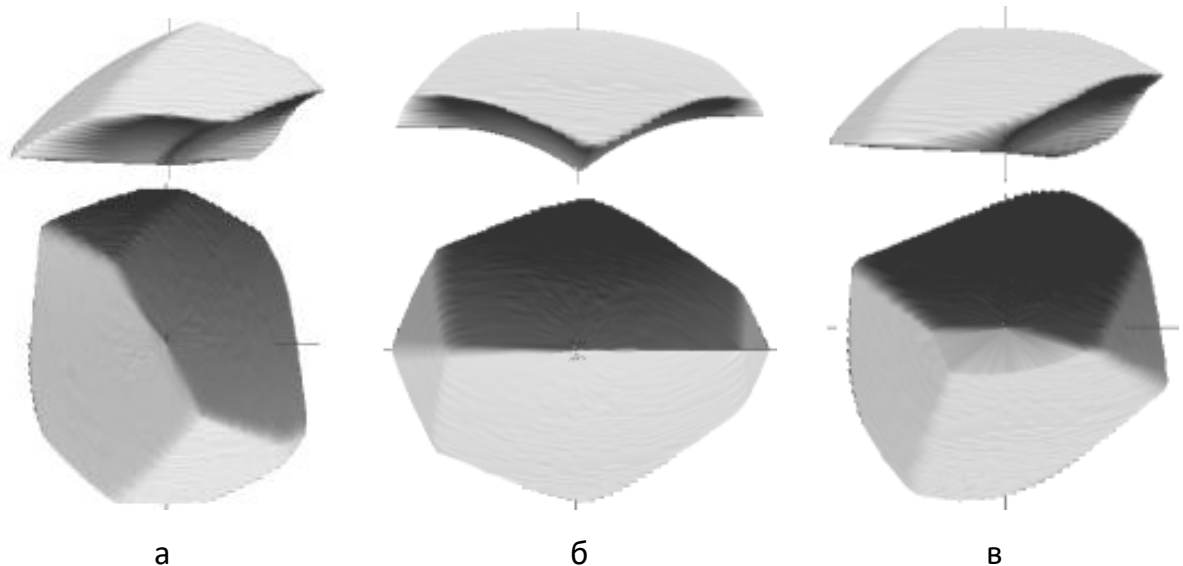


Рис. 2.3. Робочий простір верстата-гексапода:
а) при $\theta=20^\circ$; б) при $\varphi=20^\circ$; в) при $\theta=20^\circ$ та $\varphi=20^\circ$

Для вирішення проблеми невеликих розмірів та складної форми робочого простору нами запропоновано нову компоновку верстата-гексапода з додатковими напрямними.

Верстат-гексапод (рис. 2.4) складається з рухомої платформи 1 (з встановленим на ній виконавчим органом) та нерухомої стаціонарної основи 2, на якій розміщені кругові напрямні 5. Рухома платформа зв'язана з нерухомою за допомогою шести телескопічних кінематичних ланок 3. Один

кінець кожної кінематичної ланки шарнірно з'єднаний з рухомою платформою. А інший кінець шарнірно пов'язаний з повзуном 6, який може рухатись вздовж вертикальних напрямних 4, які, в свою чергу, можуть рухатись вздовж кругових напрямних 5.

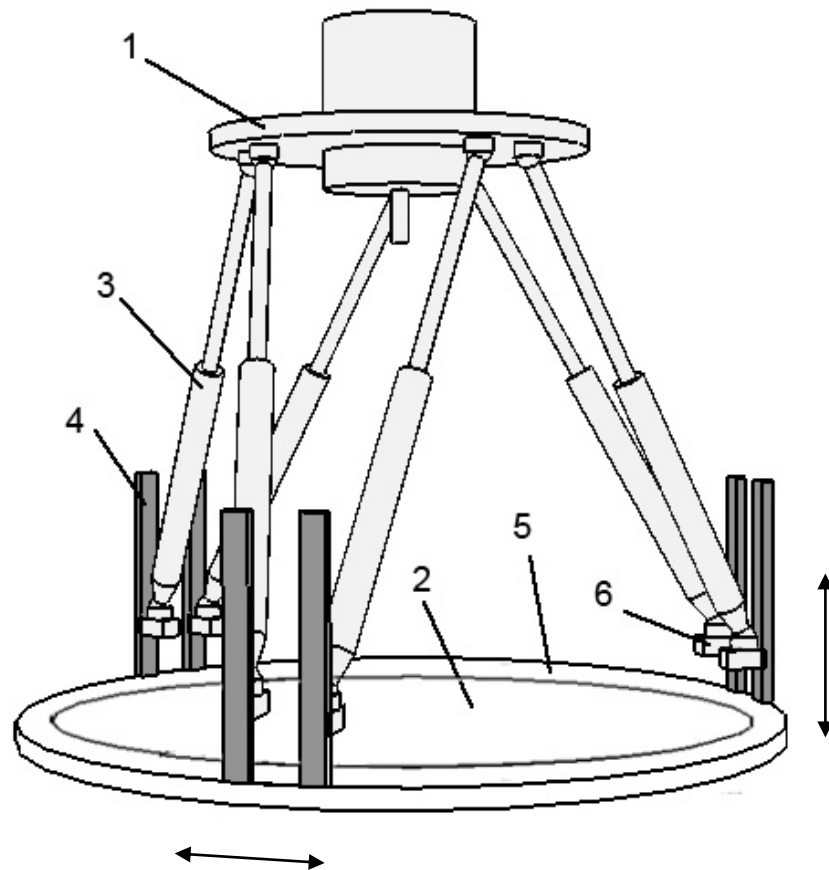


Рис. 2.4. Компонівка верстата-гексапода з додатковими напрямними

Рух виконавчого органа відбувається при одночасній узгодженій зміні довжин кінематичних ланок 3, як і в будь-якому іншому верстаті-гексаподі. А переміщення опорних шарнірів з повзуном 6 вздовж вертикальних напрямних дозволяє збільшити робочий простір верстата по висоті. Кругові напрямні призначені для здійснення кругових рухів інструмента на траєкторіях, точки яких не можуть бути досягнуті тільки за рахунок зміни довжини кінематичних ланок.

Таким чином, при переміщенні інструмента по заданій траєкторії, рух в кожен наступну точку може бути здійснений трьома способами: зміною

довжини кінематичних ланок 3, переміщенням повзунів 6 вздовж напрямних 4 та переміщенням напрямних 4 вздовж кругових напрямних 5. При цьому система керування верстатом повинна в реальному часі для кожної точки траєкторії руху інструмента визначати найбільш оптимальний спосіб досягнення цієї точки.

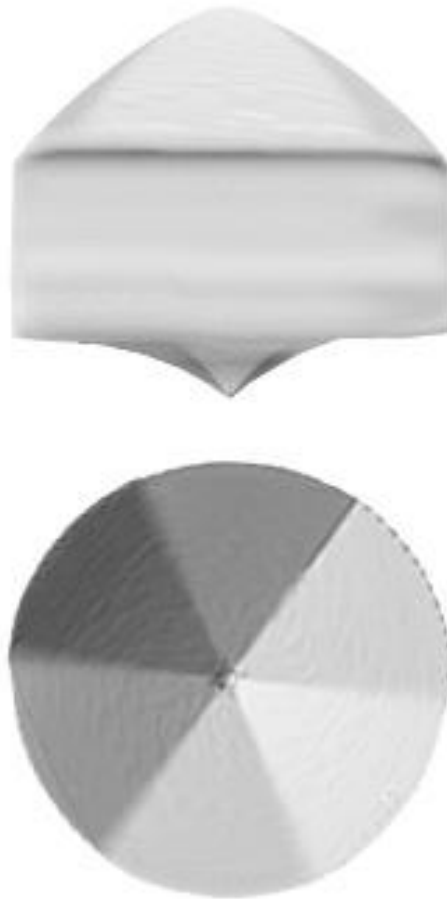


Рис. 2.5. Робочий простір верстата-гексапода з додатковими напрямними

Додаткові рухи (вертикальний і круговий) вносять зміни в робочий простір верста таким чином, що він, на відміну від робочого простору гексапода, має більш просту форму і наближається до циліндра (рис. 2.5).

2.2. Просторові функціональні залежності верстатів-гексаподів

З метою обґрунтування основних конструктивних параметрів верстата-гексапода, виконаємо кінематичний аналіз та визначимо просторові функціональні залежності.

Для вирішення задачі керування верстатом-гексаподом необхідно визначити залежності між заданими координатами точки інструмента і узагальненими координатами (довжинами) кінематичних ланок (такі узагальнені координати також називають l -координатами). Ця залежність є результатом вирішення зворотної задачі кінематики шестикоординатних просторових механізмів [16, 19, 23].

Введемо позначення (рис. 2.6):

$(x, y, z)_n$ – нерухома система координат, яка пов'язана з нерухомою несучою системою верстата;

$A(x_{A(n)}, y_{A(n)}, z_{A(n)}), B(x_{B(n)}, y_{B(n)}, z_{B(n)}), \dots, F(x_{F(n)}, y_{F(n)}, z_{F(n)})$ – координати точок з'єднань кінематичних ланок змінної довжини з несучою системою, які задані у нерухомій системі координат $(x, y, z)_n$;

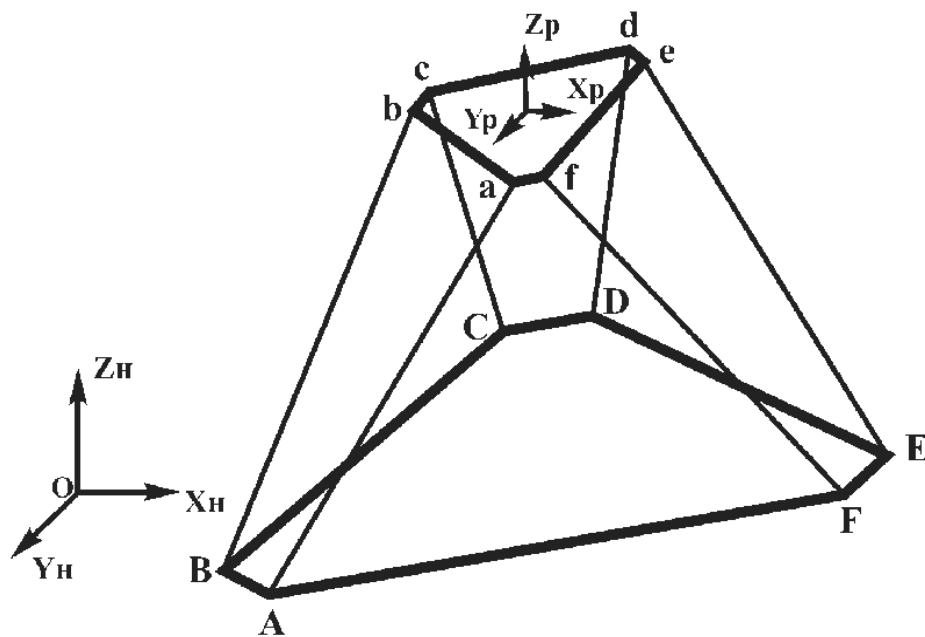


Рис. 2.6. Схема гексапода

$(x, y, z)_p$ – рухома система координат, яка пов'язана з рухомою платформою (виконавчим органом);

$a(x_{a(p)}, y_{a(p)}, z_{a(p)}), b(x_{b(p)}, y_{b(p)}, z_{b(p)}), \dots, f(x_{f(p)}, y_{f(p)}, z_{f(p)})$ – координати точок з'єднань кінематичних ланок змінної довжини з рухомою платформою, у рухомій системі координат $(x, y, z)_p$.

Точку М інструмента, рух якої розглядаємо, приймаємо за початок координат рухомої координатної системи (рис. 2.7).

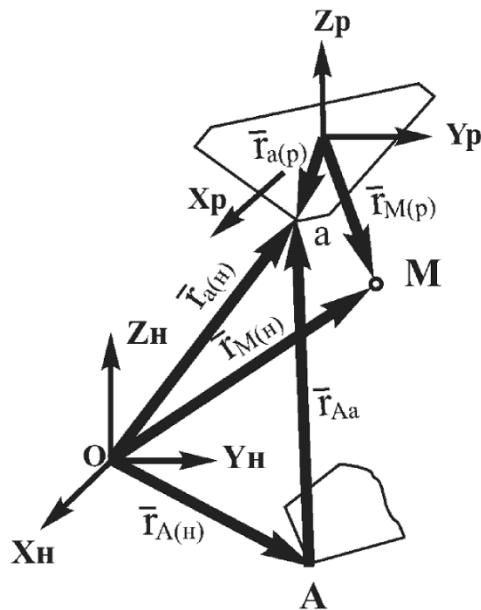


Рис. 2.7. Розрахункова схема ВПК типу гексапод

Складність задачі полягає в тому, що координати точок, відстань між якими необхідно визначити, знаходяться в різних системах координат. Тому спочатку необхідно сформулювати рівняння переводу координат з однієї системи в іншу. Таким чином, для визначення l -координат (відстаней Aa , Bb , ..., Ff між відповідними точками нерухомої несучої системи та виконавчим органом) необхідно знайти координати точок a , b , c , d , e , f , задані в рухомій системі координат виконавчого органа, у нерухомій системі координат верстата.

Положення будь-якої системи координат $(x, y, z)_u$ відносно $(x, y, z)_o$ у загальному випадку задається трьома лінійними координатами (x_u^o, y_u^o, z_u^o) ,

які визначають положення центру O_u у системі координат $(x, y, z)_u$ і трьома кутами Ейлера $(\psi_u^o, \theta_u^o, \varphi_u^o)$, що визначають орієнтацію осей x_u, y_u, z_u відносно осей x_o, y_o, z_o . Кут ψ_u^o характеризує перший поворот системи $(x, y, z)_o$ навколо осі z_o ; θ_u^o – другий поворот навколо нового положення осі x_o ; φ_u^o – третій поворот навколо нового положення осі z_i до суміщення $(x, y, z)_o$ з $(x, y, z)_u$.

Перехід з однієї просторової системи в іншу можна представити у вигляді системи рівнянь

$$\left. \begin{aligned} x_n &= u_{11}x_p + u_{12}y_p + u_{13}z_p + x_p^H \\ y_n &= u_{21}x_p + u_{22}y_p + u_{23}z_p + y_p^H \\ z_n &= u_{31}x_p + u_{32}y_p + u_{33}z_p + z_p^H \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

де x_n, y_n, z_n – координати точки у нерухомій системі координат;

x_p, y_p, z_p – координати цієї точки у рухомій системі координат;

x_p^H, y_p^H, z_p^H – координати, які визначають положення центру O_p рухомої системи координат у нерухомій системі;

u_{ij} – коефіцієнти, що дорівнюють косинусам кутів між осями систем.

Запишемо систему (2.1) у векторній формі

$$\bar{r}_n = M\bar{r}_p + \bar{r}_p^H,$$

У розгорнутому вигляді вона буде мати вигляд

$$\bar{r}_n = M_x M_y M_z \bar{r}_p + \bar{r}_p^H, \quad (2.2)$$

де $\bar{r}_n = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{bmatrix}$ – радіус-вектор, що визначає положення точки в нерухомій

системі координат;

$$\bar{r}_p = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} - \text{радіус-вектор, що визначає положення цієї точки в рухомій}$$

системі координат;

$$\bar{r}_p^H = \begin{bmatrix} x_p^H \\ y_p^H \\ z_p^H \end{bmatrix} - \text{радіус-вектор, що визначає положення початку координат}$$

рухомої системи у нерухомій;

M_x, M_y, M_z – матриці послідовних поворотів навколо осей x , y та z відповідно на кути Ейлера $\theta_p^H, \varphi_p^H, \psi_p^H$.

$$M = M_x M_y M_z = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} \end{bmatrix},$$

$$M_x = \begin{bmatrix} \cos \varphi_p^H & -\sin \varphi_p^H & 0 \\ \sin \varphi_p^H & \cos \varphi_p^H & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$M_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_p^H & -\sin \theta_p^H \\ 0 & \sin \theta_p^H & \cos \theta_p^H \end{bmatrix},$$

$$M_z = \begin{bmatrix} \cos \psi_p^H & -\sin \psi_p^H & 0 \\ \sin \psi_p^H & \cos \psi_p^H & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

В результаті перемноження матриць, отримаємо

$$\begin{aligned}
M_x M_y M_z &= \begin{bmatrix} \cos \varphi_p^H & -\sin \varphi_p^H & 0 \\ \sin \varphi_p^H & \cos \varphi_p^H & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_p^H & -\sin \theta_p^H \\ 0 & \sin \theta_p^H & \cos \theta_p^H \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \psi_p^H & -\sin \psi_p^H & 0 \\ \sin \psi_p^H & \cos \psi_p^H & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix} \cos \varphi_p^H \cdot \cos \psi_p^H & \cos \varphi_p^H \cdot \sin \psi_p^H & \sin \varphi_p^H \\ \cos \varphi_p^H \cdot \sin \psi_p^H + \sin \theta_p^H \cdot \sin \varphi_p^H \cdot \cos \psi_p^H & \cos \theta_p^H \cdot \cos \psi_p^H - \sin \theta_p^H \cdot \sin \varphi_p^H \cdot \sin \psi_p^H & -\sin \theta_p^H \cdot \cos \varphi_p^H \\ \sin \theta_p^H \cdot \sin \psi_p^H - \sin \theta_p^H \cdot \cos \psi_p^H & \sin \theta_p^H \cdot \cos \psi_p^H - \cos \theta_p^H \cdot \sin \varphi_p^H \cdot \sin \psi_p^H & \cos \theta_p^H \cdot \cos \varphi_p^H \\ -\cos \theta_p^H \cdot \sin \varphi_p^H \cdot \cos \psi_p^H & -\cos \theta_p^H \cdot \sin \varphi_p^H \cdot \sin \psi_p^H & \cos \theta_p^H \cdot \cos \varphi_p^H \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Таким чином, коефіцієнти косинусів кутів між осями систем будуть дорівнювати:

$$\begin{aligned}
u_{11} &= \cos \varphi_p^H \cdot \cos \psi_p^H; \\
u_{12} &= \cos \varphi_p^H \cdot \sin \psi_p^H; \\
u_{13} &= \sin \varphi_p^H; \\
u_{21} &= \cos \varphi_p^H \cdot \sin \psi_p^H + \sin \theta_p^H \cdot \sin \varphi_p^H \cdot \cos \psi_p^H; \\
u_{22} &= \cos \theta_p^H \cdot \cos \psi_p^H - \sin \theta_p^H \cdot \sin \varphi_p^H \cdot \sin \psi_p^H; \\
u_{23} &= -\sin \theta_p^H \cdot \cos \varphi_p^H; \\
u_{31} &= \sin \theta_p^H \cdot \sin \psi_p^H - \cos \theta_p^H \cdot \sin \varphi_p^H \cdot \cos \psi_p^H; \\
u_{32} &= \sin \theta_p^H \cdot \cos \psi_p^H - \cos \theta_p^H \cdot \sin \varphi_p^H \cdot \sin \psi_p^H; \\
u_{33} &= \cos \theta_p^H \cdot \cos \varphi_p^H.
\end{aligned}$$

Координати (x_p^H, y_p^H, z_p^H) центру рухомої системи у нерухомій співпадають з координатами точки M , заданої у нерухомій системі координат.

$$\bar{r}_p^H = \bar{r}_{M(n)}$$

Таким чином, формула переходу з рухомої системи координат у нерухому буде мати вигляд

$$\bar{r}_n = M\bar{r}_p + \bar{r}_{M(n)}$$

Запишемо рівняння для визначення відстані між точками a і A , розміщеними на несучій системі та на виконавчому органі відповідно. Довжина вектора (кінематичної ланки) $\bar{r}_{Aa} = \overrightarrow{Aa}$

$$l_{Aa} = \sqrt{x_{Aa}^2 + y_{Aa}^2 + z_{Aa}^2}, \quad (2.3)$$

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

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

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

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

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

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

Таким чином,

$$\bar{r}_{Aa} = M \cdot \bar{r}_{a(p)} + \bar{r}_{M(n)} - \bar{r}_{A(n)}, \quad (2.4)$$

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

$$\bar{r}_{M(H)} = \begin{bmatrix} X_{M(H)} \\ Y_{M(H)} \\ Z_{M(H)} \end{bmatrix};$$

M – матриця поворотів

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

$\bar{r}_{a(p)}$ – радіус-вектор, що визначає точку a несучої системи верстата у 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 (2.4), отримаємо

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

$$\times \begin{bmatrix} x_{a(p)} \\ y_{a(p)} \\ z_{a(p)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{M(p)} \\ y_{M(p)} \\ z_{M(p)} \end{bmatrix}$$

Звідси

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

Таким чином, можна записати формули визначення довжини кінематичних ланок.

Довжина кінематичної ланки Aa

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

$$\text{де } x_{Aa} = x_{A(n)} - x_{M(n)} - \cos \varphi_p^H \cdot \cos \psi_p^H \cdot (x_{a(p)} - x_{M(p)}) + \\ + \cos \varphi_p^H \cdot \sin \psi_p^H \cdot (y_{a(p)} - y_{M(p)}) - \sin \varphi_p^H \cdot (z_{a(p)} - z_{M(p)});$$

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

$$z_{Aa} = z_{A(n)} - z_{M(n)} - (\sin \theta_p'' \cdot \sin \psi_p'' + \cos \theta_p'' \cdot \sin \varphi_p'' \cdot \cos \psi_p'') \cdot (x_{a(p)} - x_{M(p)}) - \\ - (\sin \theta_p'' \cdot \cos \psi_p'' - \cos \theta_p'' \cdot \sin \varphi_p'' \cdot \sin \psi_p'') \cdot (y_{a(p)} - y_{M(p)}) + \cos \theta_p'' \cdot \cos \varphi_p'' \cdot (z_{a(p)} - z_{M(p)})$$

Довжина кінематичної ланки Bb

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

$$\text{де } x_{Bb} = x_{B(n)} - x_{M(n)} - \cos \varphi_p'' \cdot \cos \psi_p'' \cdot (x_{b(p)} - x_{M(p)}) + \\ + \cos \varphi_p'' \cdot \sin \psi_p'' \cdot (y_{b(p)} - y_{M(p)}) - \sin \varphi_p'' \cdot (z_{b(p)} - z_{M(p)});$$

$$y_{Bb} = y_{B(n)} - y_{M(n)} - (\cos \theta_p'' \cdot \sin \psi_p'' + \sin \theta_p'' \cdot \sin \varphi_p'' \cdot \cos \psi_p'') \cdot (x_{b(p)} - x_{M(p)}) - \\ - (\cos \theta_p'' \cdot \cos \psi_p'' - \sin \theta_p'' \cdot \sin \varphi_p'' \cdot \sin \psi_p'') \cdot (y_{b(p)} - y_{M(p)}) + \sin \theta_p'' \cdot \cos \varphi_p'' \cdot (z_{b(p)} - z_{M(p)});$$

$$z_{Bb} = z_{B(n)} - z_{M(n)} - (\sin \theta_p'' \cdot \sin \psi_p'' + \cos \theta_p'' \cdot \sin \varphi_p'' \cdot \cos \psi_p'') \cdot (x_{b(p)} - x_{M(p)}) - \\ - (\sin \theta_p'' \cdot \cos \psi_p'' - \cos \theta_p'' \cdot \sin \varphi_p'' \cdot \sin \psi_p'') \cdot (y_{b(p)} - y_{M(p)}) + \cos \theta_p'' \cdot \cos \varphi_p'' \cdot (z_{b(p)} - z_{M(p)})$$

Довжина кінематичної ланки Cc

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

$$\text{де } x_{Cc} = x_{C(n)} - x_{M(n)} - \cos \varphi_p'' \cdot \cos \psi_p'' \cdot (x_{c(p)} - x_{M(p)}) + \\ + \cos \varphi_p'' \cdot \sin \psi_p'' \cdot (y_{c(p)} - y_{M(p)}) - \sin \varphi_p'' \cdot (z_{c(p)} - z_{M(p)});$$

$$y_{Cc} = y_{C(n)} - y_{M(n)} - (\cos \theta_p'' \cdot \sin \psi_p'' + \sin \theta_p'' \cdot \sin \varphi_p'' \cdot \cos \psi_p'') \cdot (x_{c(p)} - x_{M(p)}) - \\ - (\cos \theta_p'' \cdot \cos \psi_p'' - \sin \theta_p'' \cdot \sin \varphi_p'' \cdot \sin \psi_p'') \cdot (y_{c(p)} - y_{M(p)}) + \sin \theta_p'' \cdot \cos \varphi_p'' \cdot (z_{c(p)} - z_{M(p)});$$

$$z_{Cc} = z_{C(n)} - z_{M(n)} - (\sin \theta_p'' \cdot \sin \psi_p'' + \cos \theta_p'' \cdot \sin \varphi_p'' \cdot \cos \psi_p'') \cdot (x_{c(p)} - x_{M(p)}) - \\ - (\sin \theta_p'' \cdot \cos \psi_p'' - \cos \theta_p'' \cdot \sin \varphi_p'' \cdot \sin \psi_p'') \cdot (y_{c(p)} - y_{M(p)}) + \cos \theta_p'' \cdot \cos \varphi_p'' \cdot (z_{c(p)} - z_{M(p)})$$

Довжина кінематичної ланки Dd

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

$$\begin{aligned} \text{де } x_{Dd} = & x_{D(h)} - x_{M(h)} - \cos \varphi_p^h \cdot \cos \psi_p^h \cdot (x_{d(p)} - x_{M(p)}) + \\ & + \cos \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h \cdot (y_{d(p)} - y_{M(p)}) - \sin \varphi_p^h \cdot (z_{d(p)} - z_{M(p)}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_{Dd} = & y_{D(h)} - y_{M(h)} - (\cos \theta_p^h \cdot \sin \psi_p^h + \sin \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \cos \psi_p^h) \cdot (x_{d(p)} - x_{M(p)}) - \\ & - (\cos \theta_p^h \cdot \cos \psi_p^h - \sin \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h) \cdot (y_{d(p)} - y_{M(p)}) + \sin \theta_p^h \cdot \cos \varphi_p^h \cdot (z_{d(p)} - z_{M(p)}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z_{Dd} = & z_{D(h)} - z_{M(h)} - (\sin \theta_p^h \cdot \sin \psi_p^h + \cos \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \cos \psi_p^h) \cdot (x_{d(p)} - x_{M(p)}) - \\ & - (\sin \theta_p^h \cdot \cos \psi_p^h - \cos \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h) \cdot (y_{d(p)} - y_{M(p)}) + \cos \theta_p^h \cdot \cos \varphi_p^h \cdot (z_{d(p)} - z_{M(p)}). \end{aligned}$$

Довжина кінематичної ланки Ee

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

$$\begin{aligned} \text{де } x_{Ee} = & x_{E(h)} - x_{M(h)} - \cos \varphi_p^h \cdot \cos \psi_p^h \cdot (x_{e(p)} - x_{M(p)}) + \\ & + \cos \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h \cdot (y_{e(p)} - y_{M(p)}) - \sin \varphi_p^h \cdot (z_{e(p)} - z_{M(p)}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_{Ee} = & y_{E(h)} - y_{M(h)} - (\cos \theta_p^h \cdot \sin \psi_p^h + \sin \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \cos \psi_p^h) \cdot (x_{e(p)} - x_{M(p)}) - \\ & - (\cos \theta_p^h \cdot \cos \psi_p^h - \sin \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h) \cdot (y_{e(p)} - y_{M(p)}) + \sin \theta_p^h \cdot \cos \varphi_p^h \cdot (z_{e(p)} - z_{M(p)}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z_{Ee} = & z_{E(h)} - z_{M(h)} - (\sin \theta_p^h \cdot \sin \psi_p^h + \cos \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \cos \psi_p^h) \cdot (x_{e(p)} - x_{M(p)}) - \\ & - (\sin \theta_p^h \cdot \cos \psi_p^h - \cos \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h) \cdot (y_{e(p)} - y_{M(p)}) + \cos \theta_p^h \cdot \cos \varphi_p^h \cdot (z_{e(p)} - z_{M(p)}). \end{aligned}$$

Довжина кінематичної ланки Ff

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

$$\begin{aligned} \text{де } x_{Ff} = & x_{F(n)} - x_{M(n)} - \cos \varphi_p^h \cdot \cos \psi_p^h \cdot (x_{f(p)} - x_{M(p)}) + \\ & + \cos \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h \cdot (y_{f(p)} - y_{M(p)}) - \sin \varphi_p^h \cdot (z_{f(p)} - z_{M(p)}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_{Ff} = & y_{F(n)} - y_{M(n)} - (\cos \theta_p^h \cdot \sin \psi_p^h + \sin \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \cos \psi_p^h) \cdot (x_{f(p)} - x_{M(p)}) - \\ & - (\cos \theta_p^h \cdot \cos \psi_p^h - \sin \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h) \cdot (y_{f(p)} - y_{M(p)}) + \sin \theta_p^h \cdot \cos \varphi_p^h \cdot (z_{f(p)} - z_{M(p)}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z_{Ff} = & z_{F(n)} - z_{M(n)} - (\sin \theta_p^h \cdot \sin \psi_p^h + \cos \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \cos \psi_p^h) \cdot (x_{f(p)} - x_{M(p)}) - \\ & - (\sin \theta_p^h \cdot \cos \psi_p^h - \cos \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h) \cdot (y_{f(p)} - y_{M(p)}) + \cos \theta_p^h \cdot \cos \varphi_p^h \cdot (z_{f(p)} - z_{M(p)}). \end{aligned}$$

Визначимо додаткові переміщення вздовж напрямних.

При переміщенні шарнірів вздовж вертикальних напрямних, координати x та y будуть постійними, буде змінюватись тільки координата z від 0 до $z_{\max}$ (залежить від конструкції та довжини напрямних).

Для врахування руху вздовж кругових напрямних необхідно визначити кут, на який треба повернути гексапод для досягнення необхідної точки траєкторії руху інструмента. Тобто, якщо є два вектори, що визначають точки a_1 та a_2 , які виходять в однієї точки на осі Z системи координат, початок якої співпадає з центром нерухомої платформи, то косинус кута, на який треба повернути один вектор до співпаданя з іншим буде дорівнювати скалярному добутку векторів, поділеному на добуток модулів цих векторів.

$$\cos \alpha = \frac{\vec{a}_1 \cdot \vec{a}_2}{|\vec{a}_1| \cdot |\vec{a}_2|}$$

Таким чином, якщо точку М інструмента має координати (x_M, y_M) , то для переміщення в точку М1 (x_{M1}, y_{M1}) необхідно повернути гексапод на кут

$$\alpha = \arccos \frac{x_M \cdot x_{M1} + y_M \cdot y_{M1}}{\sqrt{x_M^2 + y_M^2} \cdot \sqrt{x_{M1}^2 + y_{M1}^2}}$$

Слід зауважити, що внаслідок того, що в формулах визначення довжин кінематичних ланок, координати точок $A_{(H)}$, $B_{(H)}$, $C_{(H)}$, $D_{(H)}$, $E_{(H)}$, $F_{(H)}$ є величинами змінними (зміна координат при переміщенні вздовж напрямних), то одне й те саме положення рухомої платформи може бути досягнуто різними способами (зміною довжин кінематичних ланок, переміщення шарнірів вздовж лінійних та кругових напрямних). Тому система керування в реальному часі повинна обчислювати всі варіанти і вибирати найоптимальніший для кожної точки заданої траєкторії руху інструменту.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО ПРОСТОРУ ВЕРСТАТИВ-ГЕКСАПОДІВ

3.1. Аналіз робочого простору верстатів-гексаподів

Багатокоординатні верстати з паралельною кінематикою типу гексапод мають низький коефіцієнт використання робочого простору, параметри якого закладені при їх проектуванні. Робочий простір розташовано у центрі симетрії верстата (рис. 3.1).

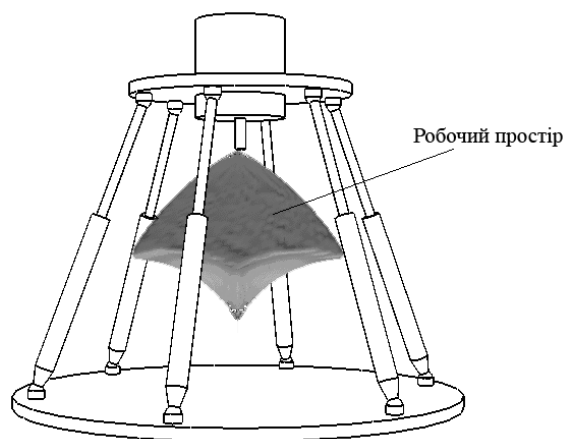


Рис. 3.1. Розташування робочого простору верстата-гексапода

Результати попередніх досліджень показують, що робочий простір верстатів-гексаподів має складну форму і невеликий об'єм в порівнянні з загальним об'ємом верстата. А з урахуванням того, що можливість здійснення рухів виконавчого органу обмежена тим більше, чим більше відстань від центру симетрії робочого простору і кута нахилу рухомої платформи, можна стверджувати, що реальний робочий простір, в якому можна виконувати широкий спектр технологічних операцій, ще менший, ніж теоретично можливий. Розглянемо вплив різних конструктивних параметрів на параметри робочого простору верстата-гексапода.

3.1.1. Вплив діапазону довжин кінематичних ланок

Рух інструмента по заданій траєкторії здійснюється за допомогою одночасної узгодженої зміни довжини кінематичних ланок верстата. Таким чином, кожній точці траєкторії відповідає шість узагальнених l -координат (довжин кінематичних ланок).

Математичне моделювання та теоретичні дослідження виконувались при зміні довжин кінематичних ланок від $l_{\min} = 0,4$ м до $l_{\max} = 0,72$ м. Максимальне співвідношення максимальної і мінімальної довжин кінематичних ланок було прийняте $l_{\max}/l_{\min} = 1.8$ (для врахування забезпечення необхідної жорсткості кінематичних ланок та мінімальних пружних деформацій стрижневої просторової конструкції механізму паралельної структури).

Як показано на рис. 3.2 збільшення співвідношення $l_{\max}/l_{\min}$ призводить до зміни конфігурації робочого простору та збільшення його об'єму.

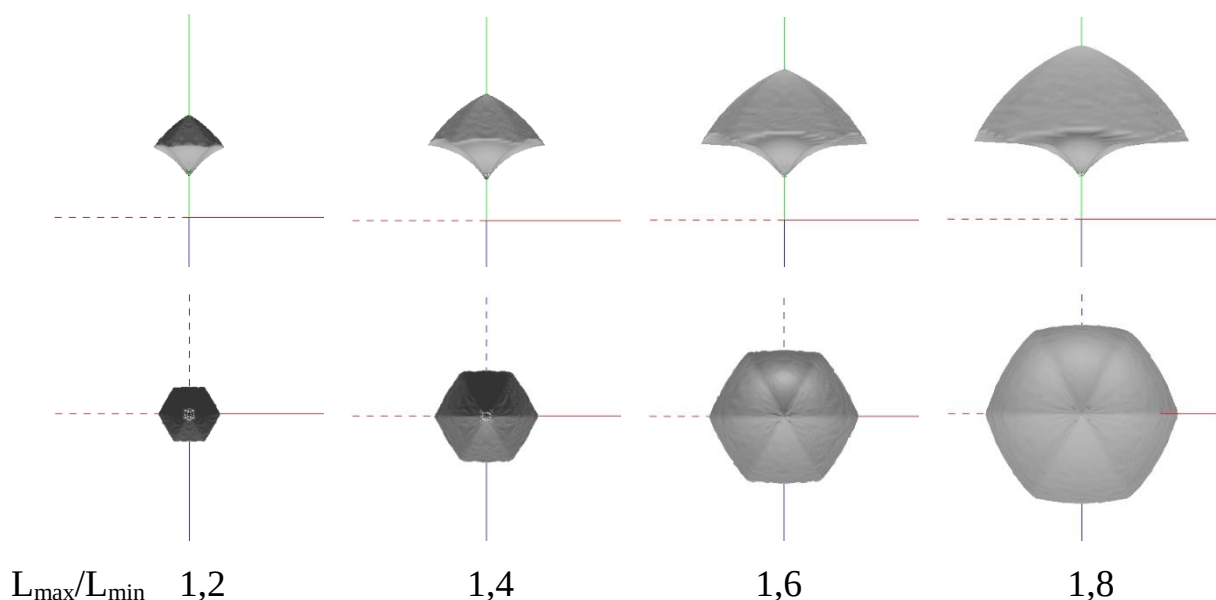


Рис. 3.2. Залежність форми і розмірів робочого простору від діапазону довжин кінематичних ланок ($L_{\max}/L_{\min}$)

Збільшення об'єму робочого простору при збільшенні діапазону довжин кінематичних ланок відбувається за рахунок збільшення його діаметра (D) та висоти (H) (рис. 3.3).

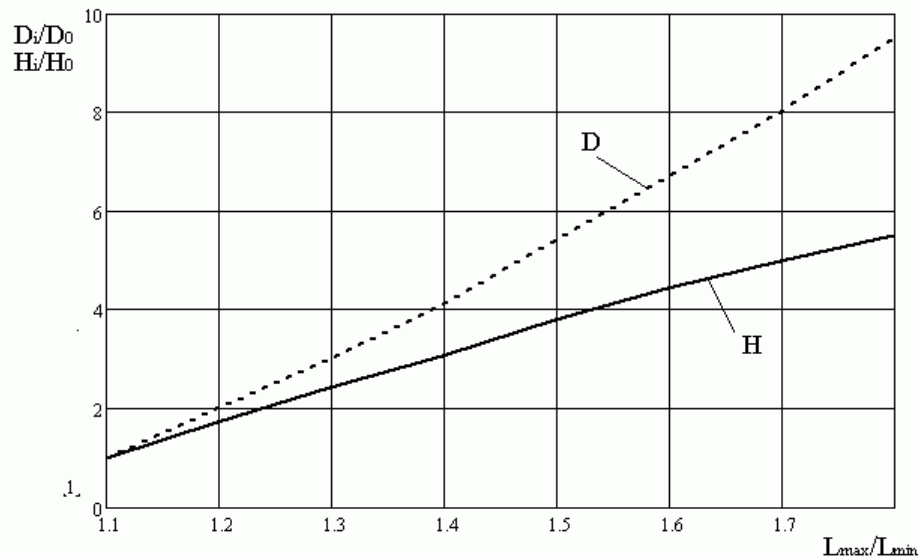


Рис. 3.3. Залежність параметрів робочого простору від діапазону довжин кінематичних ланок ($L_{\max}/L_{\min}$)

При збільшенні діапазону зміни довжини кінематичних ланок у 1.8 рази, діаметр D робочого простору зростає у 9.6 разів, а його висота – у 5.3 рази. Об'єм робочого простору при цьому зростає майже у 100 разів (рис. 3.4).

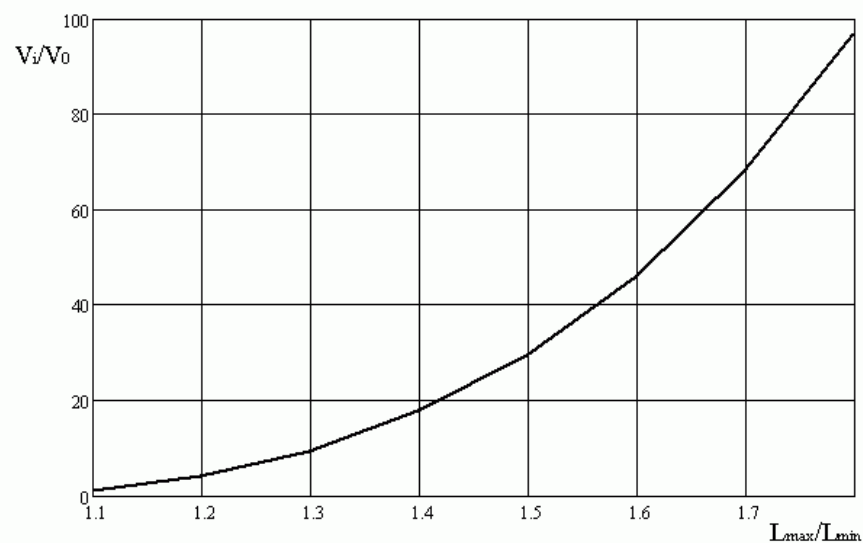


Рис. 3.4. Залежність об'єму робочого простору від діапазону довжини кінематичних ланок ($L_{\max}/L_{\min}$)

Таким чином, можна відмітити, що діапазон зміни довжини кінематичних ланок значно впливає на зростання об'єму робочого простору.

3.1.2. Вплив кута нахилу виконавчого органа

Нахил виконавчого органу на відповідний кут при обробці похилих поверхонь або отворів впливає на форму та розміри робочого простору (рис. 3.5) та на його об'єм (рис. 3.6).

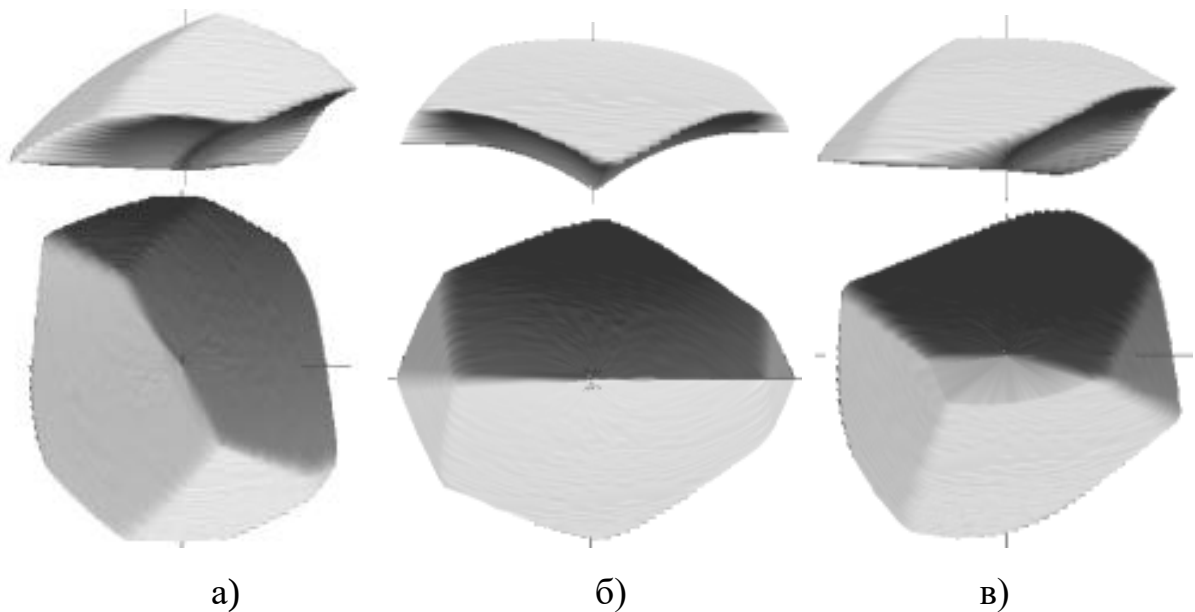


Рис. 3.5. Форма робочого простору верстата-гексапода: а) при $\theta=20^\circ$; б) при $\varphi=20^\circ$; в) при $\theta=20^\circ$ та $\varphi=20^\circ$

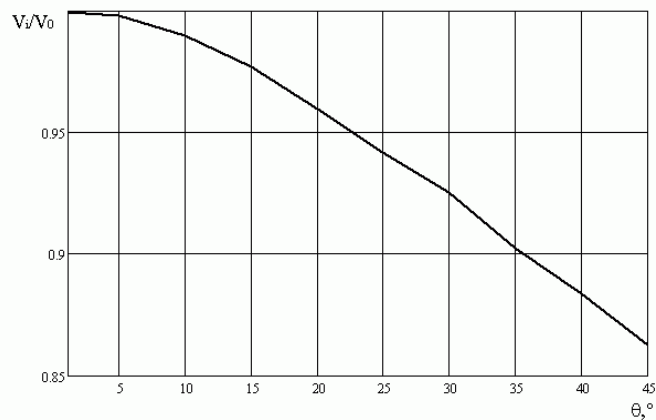


Рис. 3.6. Залежність об'єму робочого простору від кута θ нахилу ВО відносно осі X

Так, при зростанні кута нахилу виконавчого органу до 45° діаметр робочого простору зменшується у 1,25 рази, а його висота – у 1,6 разів, об'єм робочого простору при цьому зменшується у 1,2 рази.

3.1.3. Робочий простір верстата-гексапода з додатковими напрямними

При дослідження впливу переміщення опорних шарнірів вздовж додаткових вертикальних напрямних послідовно змінювалися координати одного, двох та трьох опорних шарнірів у вертикальному напрямку (рис. 3.7) на величину від $h_{\min} = 0$ до $h_{\max} = 0.25$ м з інтервалом 0.05 м.

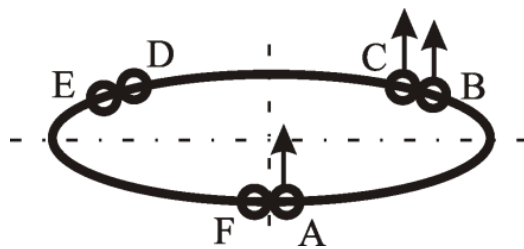


Рис. 3.7. Схема зміни координат опорних шарнірів у вертикальному напрямку

Теоретичні дослідження показали, що при переміщенні опорних шарнірів у вертикальному напрямку форма робочого простору змінюється. При переміщенні всіх шарнірів на однакову величину робочий простір просто змінює висоту. При переміщенні окремих шарнірів робочий простір змінює також і форму (рис. 3.8).

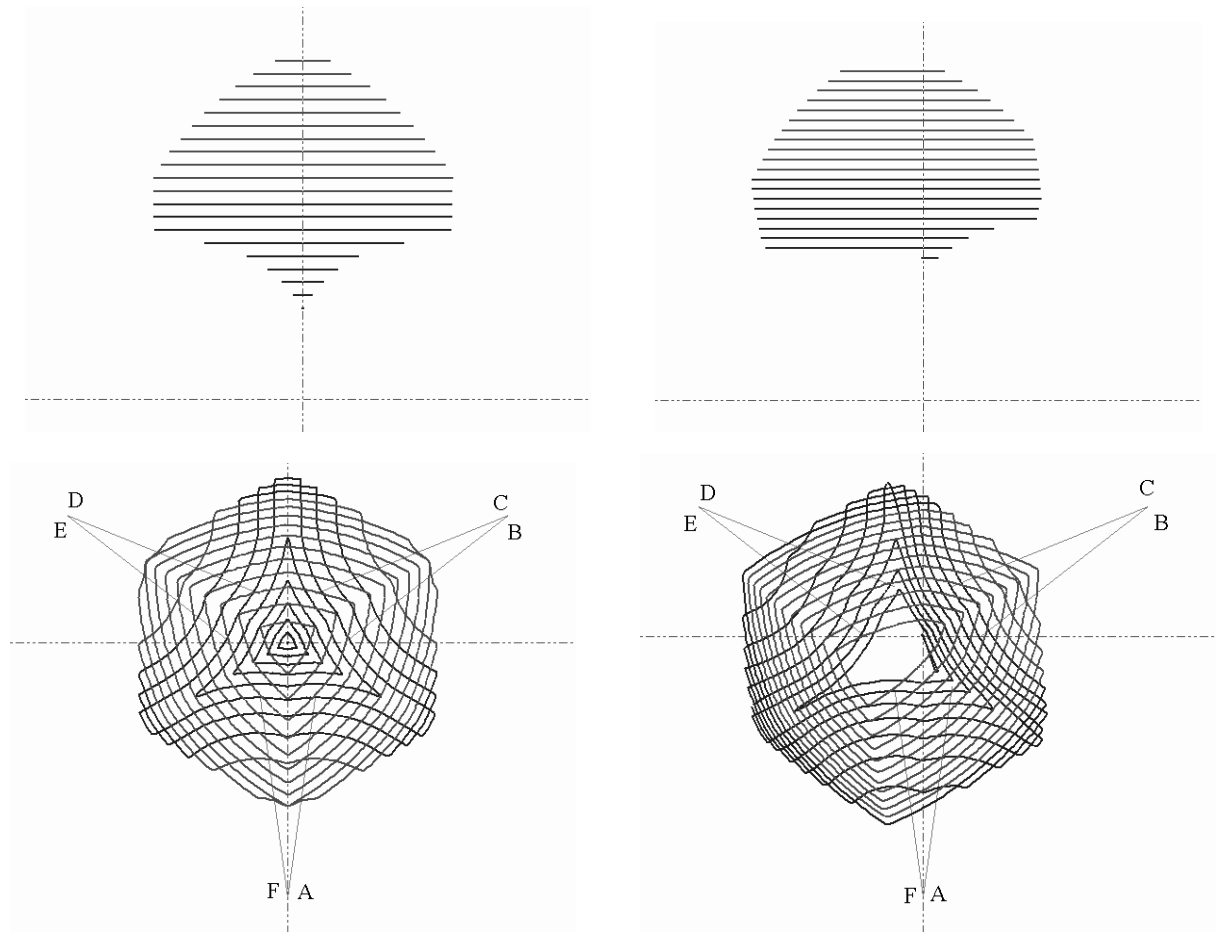
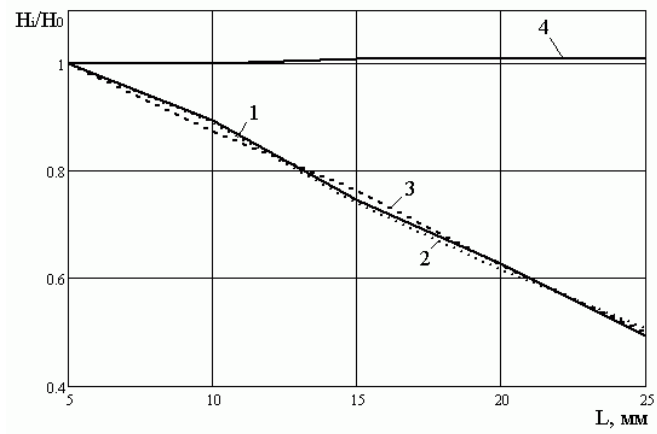


Рис. 3.8. Зміна форми робочого простору верстата-гексапода при переміщенні шарнірів у вертикальному напрямку: а) нульове положення ВО; б) при зміні координат опорних шарнірів В, С

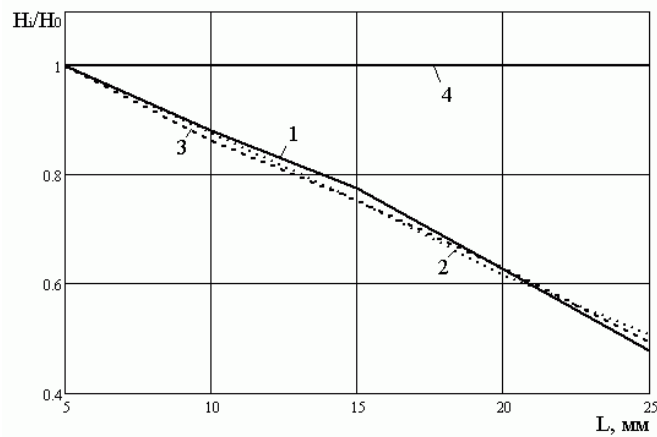
Зміна координат опорних шарнірів у вертикальному напрямку впливає на висоту (рис. 3.9) та діаметр (рис. 3.10) робочого простору і, в результаті, на його об'єм (рис. 3.11).

Зміна координат опорних шарнірів значно зменшує об'єм робочого простору: переміщення одного шарніру – у 0.3 рази, двох шарнірів – у 0.45 рази.

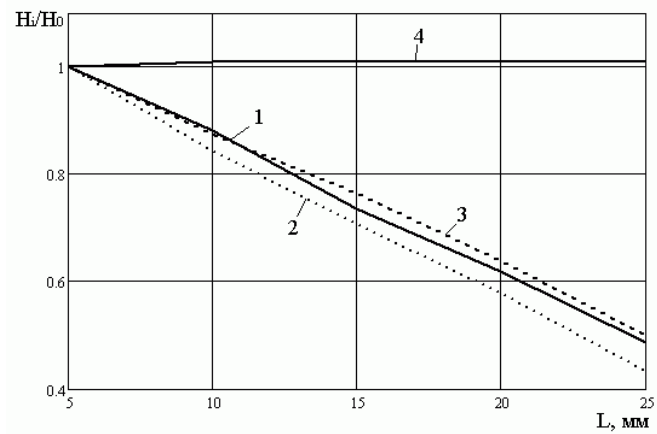
Отже, послідовна зміна координат опорних шарнірів у вертикальному напрямку змінює параметри робочого простору (рис. 3.12). При цьому загальний робочий простір, що є сукупністю всіх можливих при цьому робочих просторів формує загальний робочий простір (рис.3.13).



а)

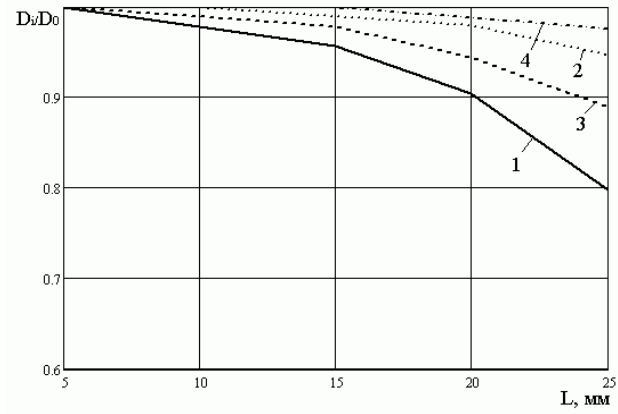


б)

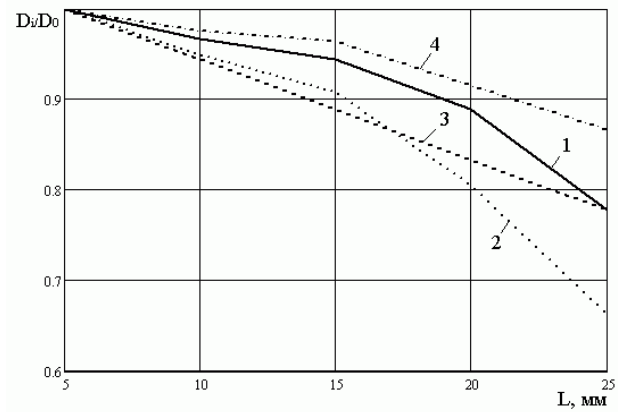


в)

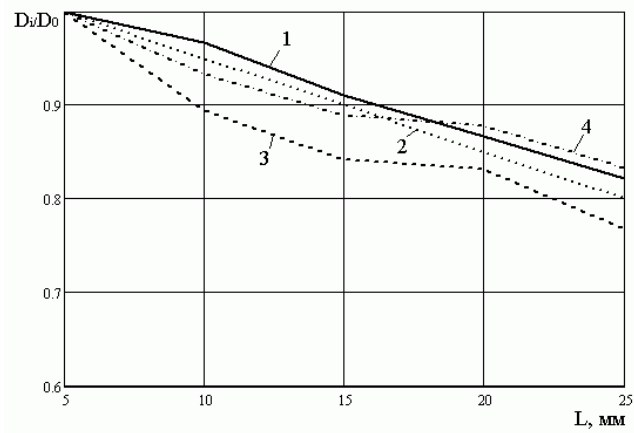
Рис. 3.9. Залежність висоти робочого простору від зміни координат опорних шарнірів у вертикальному напрямку: а) при зміні координат одного шарніру (А); б) двох шарнірів (А, В); в) трьох сусідніх шарнірів (А, В, С)



а)

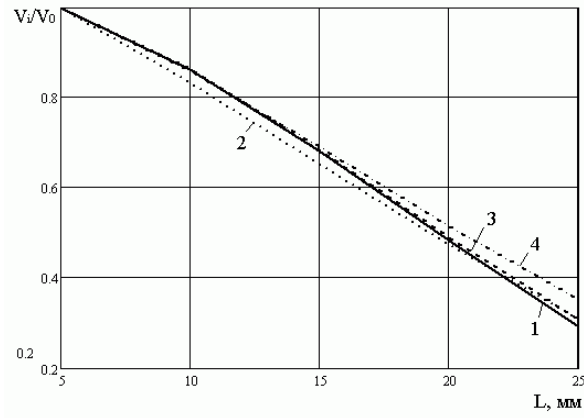


б)

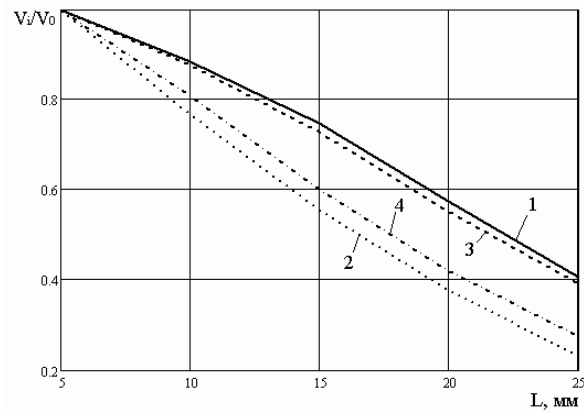


в)

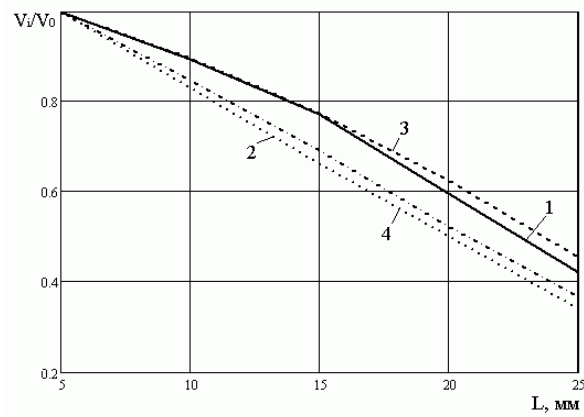
Рис. 3.10. Залежність діаметру робочого простору від зміни координат опорних шарнірів у вертикальному напрямку: а) при зміні координат одного шарніру (А); б) двох шарнірів (А, В); в) трьох сусідніх шарнірів (А, В, С)



а)



б)



в)

Рис. 3.11. Залежність об'єму робочого простору від зміни координат опорних шарнірів у вертикальному напрямку: а) при зміні координат одного шарніру (А); б) двох шарнірів (А, В); в) трьох сусідніх шарнірів (А, В, С)

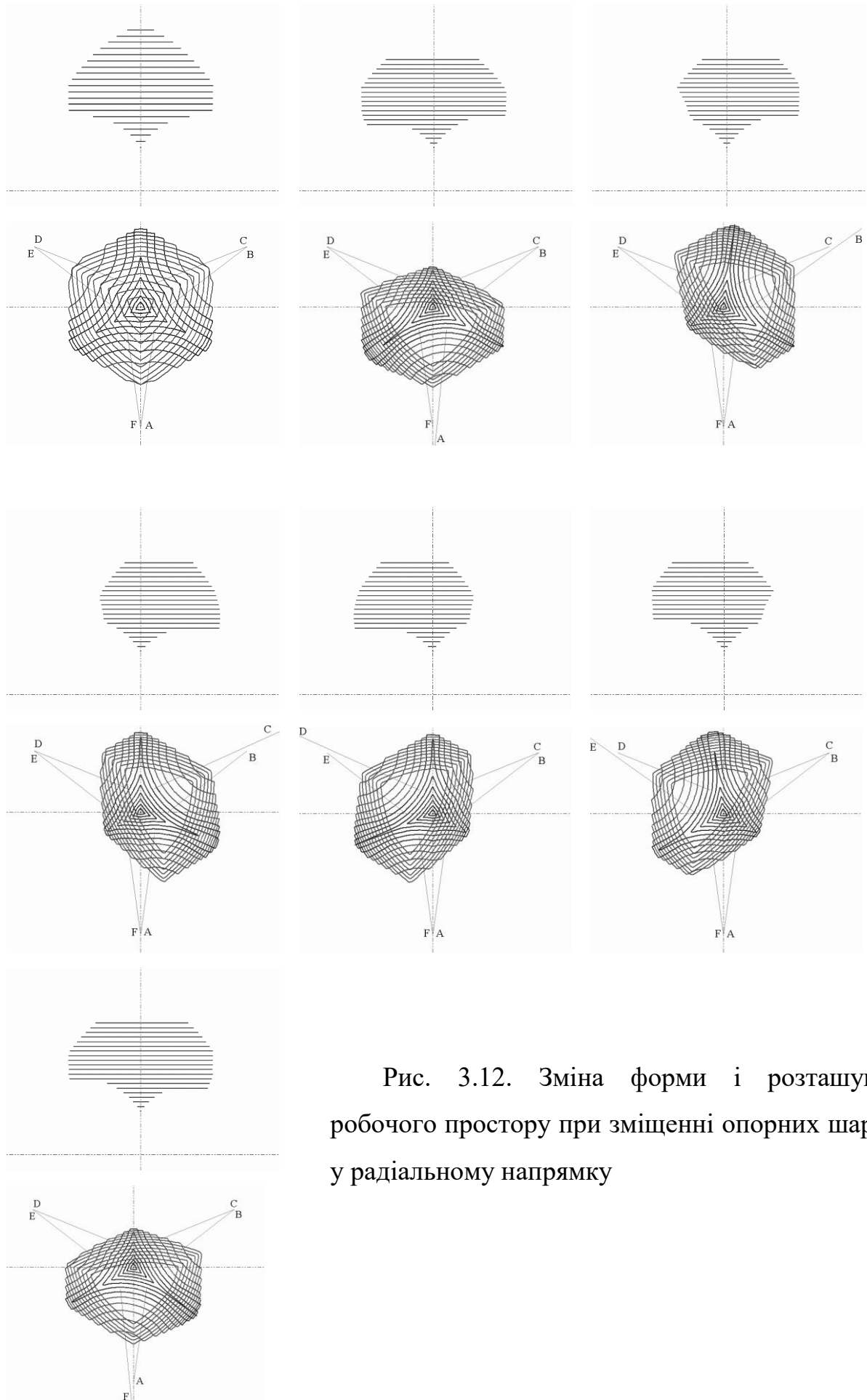


Рис. 3.12. Зміна форми і розташування робочого простору при зміщенні опорних шарнірів у радіальному напрямку

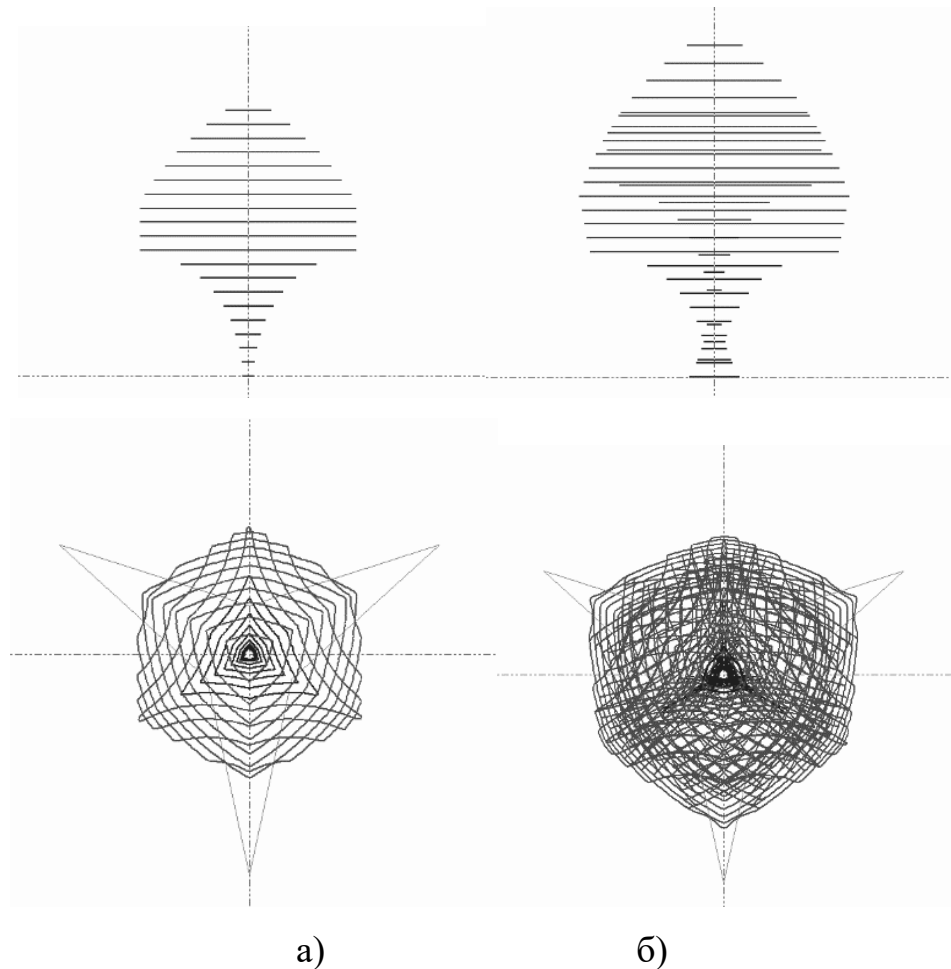


Рис. 3.13. Загальна форма робочого простору верстата-гексапода структури: а) вихідна форма РП; б) при переміщенні шарнірів у вертикальному напрямку

Наявність в компоновці верстата додаткових кругових напрямних спрощує форму робочого простору, оскільки в цьому випадку він має циліндричну форму, що також спрощує геометричні розрахунки параметрів робочого простору.

Отримані результати досліджень свідчать, що загальний робочий простір верстата-гексапода з додатковими напрямними значно більший, порівняно з вихідним (рис. 3.14).

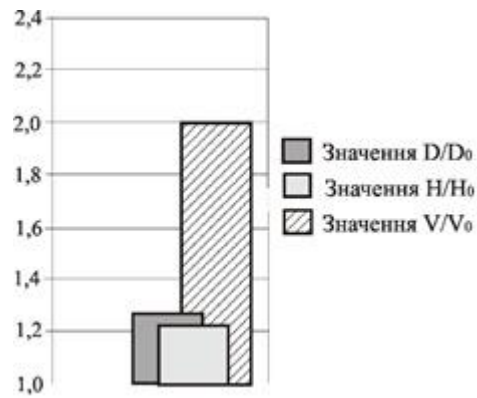


Рис. 3.14. Характеристики робочого простору верстата-гексапода з додатковими напрямними

Отже, використання додаткових напрямних збільшує об'єм загального робочого простору у 1,9-2,3 разів.

РОЗДІЛ 4

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ОБГРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Загальні вихідні дані

Метою даної випускної кваліфікаційної роботи є вдосконалення механізму верстата з паралельною кінематикою для підвищення його рухомості й коефіцієнту використання робочого простору. А саме, ми додаємо в конструкцію верстата додаткові напрямні – лінійні та кругові, тим самим збільшуючи його можливості та загальну продуктивність. Завдяки зміні конструкції з'являється можливість обробити заготовку з різних боків без необхідності переносити її на інші верстати, що збільшить як продуктивність так і якість обробки. Так наприклад, за рахунок більшої рухомості вихідного органу, заготовка складної форми може бути оброблена за меншу кількість перевстановлень, що сприяє суттєвому зменшенню штучного часу. Ці зміни роблять верстат не лише ефективним, а й більш універсальним за рахунок збільшення робочої площі та збільшення можливостей для обробки деталей. Для отримання економічного ефекту приймаємо базу для порівняння – трьох координатний фрезерний верстат мод. 6Б75ВФ1. На відміну від базового, проектний має менші розміри, та більшу продуктивність.

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

Таблиця 4.1

Загальні вихідні техніко-економічні показники базового та нового верстатів

№ п/ п	Показник	Одиниця	Варіанти	
			базовий	проект
1	2	3	4	5
1.	Програма виробництва деталей	шт./рік	10000	10000
2.	Штучний час обробки деталі	хв.	2,1	1,44
3.	Площа, яку займає верстат	м ²	7,03	5,6

Продовження табл. 4.1

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

4.2 Визначення витрат на підготовку виробництва

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

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

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

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

$Z_{сз}^к$ – середньогодинна заробітна плата конструктора, грн./год.;

K_d – додаткова заробітна плата конструктора, %;

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

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

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

4.2.2 Витрати на технологічну підготовку виробництва інструменту:

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

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

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

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

4.3. Визначення витрат на проведення модернізації верстата

Після визначення трудомісткості модернізації розраховуємо:

а) основну заробітну плату виробничих робітників:

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

де n – кількість i -тих видів робіт;

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

Так, основна заробітна плата виробничих робітників на механічних роботах:

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

б) витрати на утримання та експлуатацію обладнання:

$$B_o = \sum_{i=1}^n Z_{opi} \cdot \frac{\Pi_{ppi}}{100}, \quad (4.4)$$

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

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

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

в) цехові витрати:

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

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

Для механічних робіт:

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

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

Таблиця 4.2

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

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

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

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

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

P_n – покупні напівфабрикати, комплектуючі вироби та послуги

сторонніх підприємств, грн.;

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

T_v – транспортно-заготівельні витрати, грн.;

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

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

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

B_c – відрахування у соціальні фонди (єдиний соціальний внесок), грн.;

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

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

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

Таблиця 4.3

Склад матеріальних витрат на модернізацію верстата

№ п/п	Матеріали, покупні напівфабрикати та комплектуючі вироби	Оди- ниця	Витрати (шт., кг)	Ціна, грн.	Витрати на виріб, грн.
Основні матеріали					
1.	Чавун СЧ15	кг	90,0	65,00	5850,00
2.	Сталь 45	кг	20,0	43,50	870,00
	Всього основних матеріалів				6720,00
Покупні комплектуючі вироби					
1.	Кулька Ø20 мм	шт.	50	20,00	1000,00
2.	Метизи	кг	1,2	124	148,80
3.	Лінійні напрямні	шт.	6	5000,0	30000,00
	Всього покупних комплектуючих				31148,80

Розрахунок собівартості зводимо до табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Виробнича собівартість модернізації

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

Балансову вартість модернізованого верстата визначаємо за формулою:

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

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

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

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

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

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

m – кількість анульованих у процесі модернізації деталей та вузлів;

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

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

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

4.4. Визначення експлуатаційних витрат (собівартості обробки)

Розрахунок виконуємо за формулою:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

В базовому варіанті:

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

В проектному варіанті:

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

Витрати на електроенергію силову:

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

де N_b – встановлена потужність електродвигунів силового вузла, кВт;

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

K_N – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за потужністю (для свердлильних верстатів $K_N=0,5...0,6$);

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

η_c – середній коефіцієнт корисної дії електродвигунів ($\eta_c=0,86...0,9$);

η_m – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі підприємства ($\eta_m=0,92...0,96$);

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

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

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

Витрати на допоміжні матеріали:

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

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

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

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

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

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

Витрати на ремонт обладнання:

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

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

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

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

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

Витрати на утримання приміщення:

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

де $F_{\text{о}}$ – виробнича площа, яку займає одиниця обладнання, м²;

$K_{\text{д}}$ – коефіцієнт, який враховує додаткову площу (на проходи, проїзди, побутові та службові приміщення);

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

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

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

Витрати на амортизацію верстата:

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

де H_a – норма амортизації, %;

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

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

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

Витрати на налагодження верстата:

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

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

A – кількість налагоджень за рік;

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

$N_{\text{д}}$ – річна програма випуску деталей, шт./рік.

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

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

Результати розрахунків зводимо до табл. 4.5.

Таблиця 4.5

Експлуатаційні витрати (собівартість обробки)

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

4.5 Розрахунок показників економічної ефективності

Річний економічний ефект від проведеної модернізації розрахуємо за формулою:

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

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

K_d – додаткові капітальні витрати, грн.

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

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

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

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

Потребу в обладнанні визначаємо за формулою:

$$Q_p = \frac{N_d \cdot T_{нор}}{F_{дрм} \cdot 60 \cdot \kappa_\epsilon}, \quad (4.19)$$

де κ_ϵ – коефіцієнт виконання норм (за даними підприємства).

Так потреба в проектному варіанті:

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

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

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

Строк окупності додаткових капітальних вкладень:

$$T_{ок} = \frac{K_d}{(B_e^{баз} - B_e^{пр}) \cdot N_d}, \quad (4.20)$$

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

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

Таблиця 4.6

Підсумкові техніко-економічні показники базового та проектного варіантів

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

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі для освітнього ступеня «магістр» визначено конструктивні залежності багатокоординатного верстата з паралельною кінематикою типу «гексапод» з додатковими напрямними.

При розв’язанні даного завдання вирішено наступні задачі:

- проаналізовано існуючі схеми побудови технологічного обладнання з паралельною кінематикою та їх технічні характеристики;
- поставлено і розв’язано зворотну задачу кінематики для технологічного обладнання типу гексапод;
- запропоновано нову компоновку верстата-гексапода з додатковими напрямними (лінійними і круговими);
- побудовано робочий простір для запропонованої компоновки верстата;
- проведено теоретичні дослідження впливу переміщення опорних шарнірів вздовж напрямних на геометричні характеристики робочого простору.

Результати моделювання свідчать, що кожна переміщення опорних шарнірів вздовж вертикальних напрямних змінює висоту, об’єм, конфігурацію та розташування робочого простору, а переміщення вздовж кругових напрямних спрощує форму робочого простору і наближає його до циліндра. При переміщенні опорних шарнірів у вертикальному напрямку спостерігається збільшення об’єму загального робочого простору у 1,9-2,3 разів.

В роботі проведено економічне обґрунтування впровадження результатів досліджень при експлуатації верстатів-гексаподів. Використання запропонованого верстата дозволить отримати у користувача річний економічний ефект у розмірі 6960 грн.

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. Астанин В. О. Исследование металлорежущего станка нетрадиционной компоновки / В. О. Астанин, В. М. Сергиенко // Станки и инструмент. – 1993. – № 3. – С. 5–8.

5. Валявський І.А. Комп'ютерне моделювання робочого простору верстата-гексапода / І. А. Валявський // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – Запоріжжя, ЗНТУ, 2003. – №2. – С. 109-114

6. Валявський І. А. Математичне моделювання положення вихідного органу *l*-координатного механізму / І. А. Валявський, В. А. Крижанівський // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : збірник наук. праць. – Кіровоград : КДТУ, 2003. – Вип. 12. – С. 223–229.

7. Валявський І. А. Графічне моделювання робочого простору верстата-гексапода / І. А. Валявський, В. А. Крижанівський // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : збірник наук. праць. – Кіровоград : КДТУ, 2003. – Вип. 13.
8. Валявський І. А. Особливості проектування верстатів-гексаподів // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : збірник наук. праць. – Кіровоград : КНТУ, 2007. – Вип. 18. – С. 82–85.
9. Валявський І. А. Теоретичне дослідження особливих положень верстатів-гексаподів / І. А. Валявський, І. І. Павленко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. – Кіровоград : КНТУ, 2008. – Вип. 38. – С. 238–243.
10. Воробьев Е. И. Пространственные шарнирные механизмы / Е. И. Воробьев, Ф. М. Диментберг. – М. : Наука, 1991. – 264 с.
11. Врагов Ю. Д. Анализ компоновок металлорежущих станков : основы компонетики / Ю. Д. Врагов. – М. : Машиностроение, 1978. – 208 с.
12. Глазунов В. А. Пространственные механизмы параллельной структуры / В. А. Глазунов, А. Ш. Колискор, А. Ф. Крайнев. – М. : Наука, 1991. – 95 с.
13. Колискор А. Ш. Разработка и исследование промышленных роботов на основе l -координат / А. Ш. Колискор // Станки и инструмент. – 1982. – № 12. – С. 21–24.
14. Корендясев А. И. Автоматические манипуляторы с приводом на основании / А. И. Корендясев // Станки и инструмент. – 1980. – № 12. – С. 3–8.
15. Костюк В.І. Робототехніка / В.І. Костюк, Г.О. Спину, Л.С. Ямпольський. – К. : Вища школа, 1994. – 446 с.
16. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою : навчальний посібник для ВНЗ / [В. А. Крижанівський, Ю. М. Кузнецов, І. А. Валявський, Р. А. Склярів]; під ред. Ю. М. Кузнецова. – Кіровоград, 2004. – 449 с.

17. Кузнєцов Ю. М. Сучасний стан, прогнозування і перспективи розвитку верстатів з паралельною кінематикою / Ю. М. Кузнєцов, В. А. Крижанівський, Р. А. Скляр // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : (зб. наукових праць). – ЖДТУ, 2005. – Вип. 1. – С. 320–333.
18. Кузнєцов Ю. М. Візуалізація формоутворюючих рухів механізмами паралельної структури в верстатах нових компоновок / Ю. М. Кузнєцов, Д. О. Дмитрієв // Вісник ТДТУ. – 2008. – № 1.
19. Кузнєцов Ю. М. Моделювання технологічних рухів в верстатах паралельної структури при обробці складнопрофільних поверхонь / Ю. М. Кузнєцов, Д. О. Дмитрієв // Современные технологии в машиностроении : (зб. науковых праць НТУ «ХП»). – 2008. – Вип. 1.
20. Кузнєцов Ю. Н. Проектирование токарных многоцелевых станков с механизмами параллельной структуры / Ю. Н. Кузнєцов, Д. Н. Дмитриев, Г. Диневич // Вестник НТУУ «КПИ» : машиностроение. – 2008. – № 53.
21. Кузнєцов Ю. М. Світові тенденції і перспективи розвитку верстатобудування в Україні / Ю. М. Кузнєцов // Зб. наук. праць за матеріалами науково-методичної конф. «Вища освіта – 2006». – 2007. – С. 45–55.
22. Кузьмина Е. В. Гибкий производственный модуль нетрадиционной компоновки / Е. В. Кузьмина // Технология, оборудование, организация и экономика машиностроительного производства. Отечественный опыт. – М. : ВНИИТЭМР, 1987. – С. 11–15. – (Серия 7 ; вып. 2).
23. Лебедев П. А. Явное определение положений механизма параллельной структуры / П. А. Лебедев // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1991. – №3. – С. 92–97.
24. Павленко І. І. Промислові роботи: основи розрахунку та проектування / І. І. Павленко. – Кіровоград : КНТУ, 2007. – 420 с.
25. Павленко І. І. Рухові характеристики промислових роботів / І. І. Павленко. – Кіровоград : КДТУ, 2000. – 124 с.

26. Трояковский Е. И. Сравнительный анализ кинематических схем промышленных роботов и манипуляторов по коэффициенту использования рабочего объема / Е. И. Трояковский, В. Л. Жовнер // Интенсификация процессов и оборудование пищевых производств. – М.: ЛТИХП, 1975. – С. 31–36.

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

28.Расчеты экономической эффективности новой техники: Справочник // Под общ. ред. К.М. Великанова. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1990. 448 с.

29. Расчет экономической эффективности новой техники. Справочник /Под ред. К.М. Великанова – Л.: Машиностроение, 1975. – 432 с.

30.Ткачук К.Н., Зацарний В.В. Сабарно Р.В. та ін. Охорона праці та промислова безпека : Навч. посіб. – К.: Лібра, 2010. – 268 с.

31. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці. Підручник. – Львів: Афіша. 2004 – 230 с.