

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

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
на здобуття освітнього ступеня «Магістр»
за спеціальністю 131 «Прикладна механіка»
на тему:

**Дослідження функціональних можливостей верстата з
паралельною кінематикою з круговою напрямною**

**Research into the functional capabilities of a machine tool with
parallel kinematics and a circular guide**

Виконавець: здобувач вищої освіти 2 року
магістратури, групи ПМ-24М-3,
спеціальність 131 «Прикладна механіка»

_____ Микита ПЕЧКУР

Керівник: канд. техн. наук, доцент

_____ Іван ВАЛЯВСЬКИЙ

Рецензент: канд. техн. наук, доцент

_____ Завідувач кафедри: канд. техн. наук, доцент

_____ Андрій ГРЕЧКА

Центральноукраїнський національний технічний університет	
Факультет	Механіко-технологічний
Кафедра	Машинобудування, мехатроніки і робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Галузь знань	13 Механічна інженерія
Спеціальність	131 Прикладна механіка
Освітньо-наукова програма	Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ММР
Андрій ГРЕЧКА

«_____» _____ 2025 р.

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

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження функціональних можливостей верста паралельною кінематикою з круговою напрямною

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

3. Строк подання роботи до захисту «12» грудня 2025 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи:

Метою роботи є: дослідження багатокоординатного верстата з паралельною кінематикою з круговою напрямною

Завдання:

- проаналізувати існуючі схеми побудови механізмів паралельної структури;
- розробити компоновку верстата з круговою напрямною і вирішити зворотну задачу кінематики для цієї компоновки;
- дослідити робочий простір та рухи виконавчого органу запропонованої компоновки;
- розрахувати техніко-економічні показники ефективності проектування та використання обладнання з паралельною кінематикою.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	ВСТУП	Вересень 2025	Вик.
	АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ТА НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ОБЛАДНАННЯ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ		
		Вересень 2025	Вик.
2	РОЗРОБКА КОМПОНОВКИ БАГАТОКООРДИНАТНОГО ВЕРСТАТА З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ		
	З КРУГОВОЮ НАПРЯМНОЮ	Жовтень 2025	Вик.
3	ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ		
	ДОСЛІДЖЕННЯ РУХІВ ВИКОНАВЧОГО ОРГАНУ	Листопад 2025	Вик.
4	ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОБОТИ	Листопад 2025	Вик.
5	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	Грудень 2025	Вик.
6	ОФОРМЛЕННЯ РОБОТИ	Грудень 2025	Вик.

Дата видачі завдання «01» вересня 2025 р.

Керівник роботи _____ Іван ВАЛЯВСЬКИЙ
(підпис)

Завдання прийнято до виконання «01» вересня 2025 р.

Здобувач _____ Микита ПЕЧКУР
(підпис)

Анотація

Микита ПЕЧКУР. Дослідження функціональних можливостей верстата з паралельною кінематикою з круговою напрямною. Кваліфікаційна робота для освітнього ступеня «магістр»: ЦНТУ, 2025. – 71 с. Матеріали презентації 12 аркушів.

Метою роботи є дослідження багатокоординатного верстата з паралельною кінематикою з круговою напрямною.

Для досягнення мети дослідження було вирішено такі задачі: проаналізовано існуючі схеми побудови механізмів паралельної структури; розроблено компоновку верстата з круговою напрямною; вирішено зворотну задачу кінематики для цієї компоновки; досліджено рухи виконавчого органу та робочий простір запропонованої компоновки; розраховано техніко-економічні показники ефективності проектування та використання обладнання з паралельною кінематикою.

Актуальність. Функціональні можливості технологічного обладнання з паралельною кінематикою з круговими напрямними недостатньо досліджені.

Наукова новизна. Запропоновано компоновку багатокоординатного верстата з паралельною кінематикою з круговою напрямною та досліджено рухи виконавчого органу цього верстата.

Ключові слова: верстат, робочий простір, паралельна кінематика, кругові напрямні.

Abstract

Mykyta PECHKUR. Research into the functional capabilities of a machine tool with parallel kinematics and a circular guide. Master's Thesis: CNTU, 2025. - 71 p. Presentation materials 12 il.

The aim of the work is to investigate a multi-axis machine tool with parallel kinematics and a circular guide.

To achieve the goal, the following research tasks were solved:

- Analysis of existing structural schemes for parallel mechanism design.
- Development of a machine tool configuration incorporating a circular guide.
- Solving the inverse kinematics problem for this configuration.
- Investigation of the end-effector motions and the workspace of the proposed configuration.
- Calculation of technical and economic performance indicators for the design and use of parallel kinematics equipment.

Relevance. The functional capabilities of technological equipment with parallel kinematics utilizing circular guides have been insufficiently studied.

Scientific novelty. A configuration of a multi-axis machine tool with parallel kinematics and a circular guide is proposed, and the motions of the end-effector of this machine tool are investigated.

Keywords: machine tool, workspace, parallel kinematics, circular guideways.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ОБЛАДНАННЯ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ.....	10
1.1. Поняття та особливості кінематичної структури.....	10
1.2. Еволюція та історичний розвиток паралельних механізмів	15
1.3. Сучасний етап промислового впровадження	18
1.3.1. Обладнання для механічної обробки матеріалів	23
1.3.2. Високоточні позиціонуючі пристрої.....	27
1.3.3. Робототехніка: від пакування до адитивних технологій.....	29
1.3.4. Медичні та вимірювальні системи.....	31
1.4. Мета і задачі досліджень	33
РОЗДІЛ 2 КОНСТРУКЦІЯ І КІНЕМАТИЧНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ.....	34
2.1. Конструкція та принцип дії верстату з круговою напрямною.....	34
2.2. Просторові функціональні залежності компоновки верстата	35
2.2.1. Опис кінематичної схеми	35
2.2.2. Вирішення зворотної задачі кінематики.....	37
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО ПРОСТОРУ ВЕРСТАТА З КРУГОВОЮ НАПРЯМНОЮ.....	41
3.1. Визначення робочого простору верстата з круговою напрямною	41
3.1.1. Метод визначення розмірів та конфігурації	41
3.1.2. Обмеження, що впливають на розміри робочого простору....	42
3.1.3. Алгоритм побудови робочого простору.....	43
3.2. Дослідження рухів верстата з круговою напрямною	44
3.3. Визначення конструктивних параметрів верстата з круговою напрямною	50

РОЗДІЛ 4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ОБГРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	52
4.1. Загальні вихідні дані.....	52
4.2. Визначення витрат на підготовку виробництва	53
4.3. Визначення витрат на проведення модернізації верстата	54
4.4. Визначення експлуатаційних витрат (собівартості обробки)	58
4.5. Розрахунок показників економічної ефективності	62
ВИСНОВКИ.....	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	67

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасна епоха цифрової трансформації виробництва висуває підвищені вимоги до продуктивності, гнучкості та надійності технологічного обладнання. Хоча впровадження комп'ютерного зору, штучного інтелекту, вдосконаленого програмного забезпечення, датчиків і систем керування суттєво оптимізувало виробничі процеси, обмежувальним фактором (або «вузьким місцем») для кінцевої продуктивності незмінно залишається апаратне забезпечення. Тому виробничий сектор постійно шукає проривні технології, центральне місце серед яких посідають металообробні верстати.

Традиційні верстати побудовані на основі послідовної кінематичної архітектури. На противагу цьому, паралельні механізми пропонують значні вдосконалення кінематичних та динамічних характеристик, особливо щодо жорсткості та швидкості.

У послідовній системі інструмент прикріплений до нерухомої основи через ланцюг жорстких елементів, з'єднаних послідовно приводними ланками (лінійними або обертальними двигунами). Натомість, паралельний верстат оснащений кількома незалежними кінематичними ланцюгами (штангами), які одночасно з'єднують інструмент із нерухомою станиною.

Ця архітектура забезпечує дві фундаментальні переваги для механізмів:

- Висока жорсткість та точність. Архітектура із замкненим контуром дає змогу розподіляти навантаження між усіма ланцюгами. Це не лише підвищує корисне навантаження та зменшує деформації під робочим навантаженням, але й сприяє внутрішньому зменшенню та частковій компенсації похибок обертання та позиціонування, які неминуче поширюються у послідовних схемах.

- Висока динаміка та швидкість. Приводи (двигуни), які є одними з найважливіших елементів, можуть бути розміщені біля основи або безпосередньо

на ній. Таке розміщення зменшує рухому масу механізму, що значно покращує інерційні та динамічні характеристики.

Обладнання з паралельною кінематикою є надзвичайно перспективним для обробної промисловості, оскільки воно може безпосередньо підвищити продуктивність виробництва.

Незважаючи на значні переваги та інтенсивні дослідження паралельних механізмів протягом останніх трьох десятиліть, їхнє промислове впровадження залишається обмеженим. Послідовні механізми все ще домінують в обробній промисловості. Це обмежує потенціал зростання високотехнологічних галузей, що вимагає подальшого розвитку та вдосконалення конструкцій обладнання з паралельною кінематикою.

Метою роботи є дослідження багатокоординатного верстата з паралельною кінематикою з круговою напрямною.

Для досягнення мети дослідження було вирішено такі **задачі**:

- проаналізовано існуючі схеми побудови механізмів паралельної структури;
- розроблено компоновку верстата з круговою напрямною;
- вирішено зворотну задачу кінематики для цієї компоновки;
- досліджено рухи виконавчого органу та робочий простір запропонованої компоновки;
- розраховано техніко-економічні показники ефективності проектування та використання обладнання з паралельною кінематикою.

Елементи наукової новизни роботи: запропоновано компоновку багатокоординатного верстата на основі механізму з паралельною кінематикою з круговою напрямною та досліджено рухи виконавчого органу.

Об'єкт дослідження: багатокоординатний верстат з паралельною кінематикою з круговою напрямною.

Предмет дослідження: конструктивні залежності обладнання з паралельною кінематикою.

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ОБЛАДНАННЯ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ

1.1. Поняття та особливості кінематичної структури

Більшість сучасного металообробного обладнання, що використовується у промисловості (фрезерні, токарні верстати, промислові роботи), традиційно будується на основі кінематики з послідовними або розімкненими ланцюгами. В таких системах кожна вісь механізму несе на собі наступну вісь разом із її приводами та з'єднаннями. Зазвичай така архітектура базується на ортогональному поєднанні трьох лінійних осей, до яких можуть додаватися обертальні осі для реалізації переміщень у декартовій системі координат (рис. 1.1).

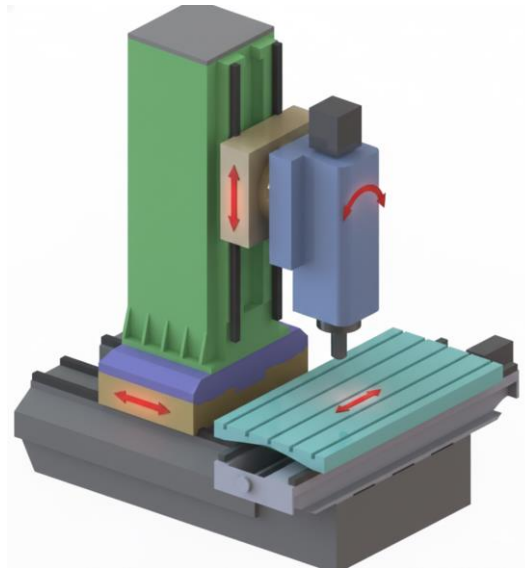


Рис. 1.1. Верстат з послідовною кінематикою

Попри поширеність, схеми з послідовною кінематикою мають суттєві недоліки. Вони схильні до накопичення похибок, оскільки неточне позиціонування однієї ланки призводить до зміщення наступної, що помножує сумарну похибка на кінцевому органі. Крім того, наявність масивних станин

та супортів вимагає встановлення обладнання на важкі бетонні фундаменти, що робить верстати громіздкими та складними для транспортування [1, 9].

Альтернативою традиційним (послідовним) схемам є верстати із замкненою паралельною кінематикою, які вважаються перспективною технологією XXI століття. Такі системи визначаються як механізми, що дозволяють здійснювати переміщення з N ступенями вільності. Конструктивно вони складаються з рухомої платформи (на якій закріплено інструмент) та нерухомої основи, які з'єднані між собою N незалежними кінематичними ланцюгами (рис. 1.2). Рух платформи забезпечується N лінійними приводами — по одному на кожну кінематичну ланцюг. Найбільш поширеними типами таких механізмів сьогодні є триподи та гексаподи [1, 9, 14, 16].



Рис. 1.2. Верстат з паралельною кінематикою

Детальніше розглянемо особливості послідовної та паралельної кінематики механізмів.

Послідовна кінематика

В механізмах із послідовною кінематикою (наприклад, типові промислові роботи-маніпулятори) ланки з'єднані послідовно, утворюючи кінематичний ланцюг, де вихідна ланка (виконавчий орган) є кінцем ланцюга. Рух кожної наступної ланки залежить від руху попередньої.

Особливості:

- **Накопичення похибок.** Похибки позиціонування та люфти (зазори) накопичуються від основи до кінцевого ефектора.
- **Великий робочий простір.** Можуть мати великий робочий об'єм відносно своєї маси та габаритів основи.
- **Складне керування.** Кінематика (пряма та обернена задачі) часто є складною (нелінійною), оскільки рух виконавчого органу є результатом усіх послідовних рухів ланок.
- **Розміщення приводів.** Приводи (двигуни) часто розташовані вздовж усього ланцюга, що призводить до високої інерції рухомих частин і вимагає потужніших приводів для компенсації.
- **Співвідношення вантажопідйомності / власна вага.** Вантажопідйомність зазвичай менша, ніж власна вага механізму.

Переваги:

- **Великий і гнучкий робочий простір.** Забезпечують високу маневреність та можливість обходу перешкод.
- **Проста конструкція ланок.** Кожна ланка зазвичай простіша у виготовленні та має лише один ступінь свободи.
- **Легка зміна конфігурації.** Можна легко додавати або видаляти ступені свободи.

Недоліки:

- **Низька жорсткість.** Схильні до деформацій під навантаженням, що знижує точність позиціонування.
- **Низька швидкодія.** Велика інерція через розташування приводів на рухомих ланках обмежує швидкість і прискорення.
- **Низька точність.** Через накопичення похибок та низьку жорсткість.

Паралельна кінематика

У механізмах із паралельною кінематикою (наприклад, платформа Стюарта, Дельта-роботи) кінцева ланка (рухома платформа) з'єднана з основою кількома незалежними кінематичними ланцюгами (штангами). Усі приводи зазвичай розташовані на нерухомій основі.

Особливості:

- **Розподіл навантаження.** Навантаження розподіляється між усіма «штангами», що значно підвищує жорсткість.
- **Малий робочий простір.** Робочий простір зазвичай менший і більш обмежений, ніж у послідовних механізмів.
- **Складне керування.** Пряма задача кінематики (визначення положення виконавчого органа за координатами приводів) може бути складною, тоді як зворотна задача (визначення координат приводів за положенням виконавчого органу) є відносно простою.
- **Розміщення приводів.** Приводи зазвичай розташовані на нерухомій основі, що значно знижує інерцію рухомих частин.
- **Співвідношення вантажопідйомність / власна вага.** Можуть підіймати вантажі, які значно перевищують їхню власну вагу.

Переваги:

- **Висока жорсткість і точність.** Завдяки багатоланковому з'єднанню та розподілу навантаження.
- **Висока швидкодія.** Низька інерція (невелика маса) рухомих частин (приводи розташовані на основі) дозволяє досягати дуже високих швидкостей та прискорень.
- **Висока вантажопідйомність.** Відмінне співвідношення вантажопідйомності до власної ваги.

Недоліки:

- **Обмежений робочий простір.** Зазвичай менший, ніж у послідовних механізмів, і має складну форму.
- **Складна конструкція ланок / з'єднань.** Більша складність у виготовленні та складанні через велику кількість з'єднань і необхідність високоточної синхронізації.
- **Складність обходу перешкод.** Через фіксовану конфігурацію кінематичних ланок (штанг).

Порівняння послідовної і паралельної кінематики наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Порівняння послідовної та паралельної кінематики

Характеристика	Послідовна кінематика (Serial)	Паралельна кінематика (Parallel/PKM)
Жорсткість	Низька (зменшується з вильотом стріли)	Висока (замкнений силовий контур)
Точність	Накопичення похибок від ланки до ланки	Відсутність накопичення похибок (усереднення)
Динаміка	Обмежена інерцією власних приводів	Висока (двигуни нерухомі, легкі рухомі ланки)
Робоча зона	Велика відносно розмірів робота	Обмежена, складної форми
Співвідношення вантаж/вага	Низьке (близько 1:10)	Високе (може досягати 1:1 і більше)
Керування	Проста кінематика, лінійні рівняння	Складна нелінійна динаміка, сингулярні зони

1.2. Еволюція та історичний розвиток паралельних механізмів

Розвиток механізмів з паралельною кінематикою зумовлений потребою у підвищенні точності, жорсткості та вантажопідйомності обладнання для автоматизації виробництва. Теоретичні основи таких структур були закладені ще у працях математиків минулих століть, таких як Рен (1645 р.), Коші (1813 р.) та Лебег (1867 р.). Завдяки їм з'явилися перші теоретичні роботи, присвячені паралельним механізмам і, зокрема, платформам на шести стійках. Однак ці роботи не набули широкого розповсюдження.

Першим просторовим паралельним механізмом вважається винахід Джеймса Е. Гвіннета (James E. Gwinnet) 1928 року — розважальний атракціон у вигляді платформи для кінотеатру, що могла нахилитися у будь-якому напрямку для імітації руху (рис. 1.3).

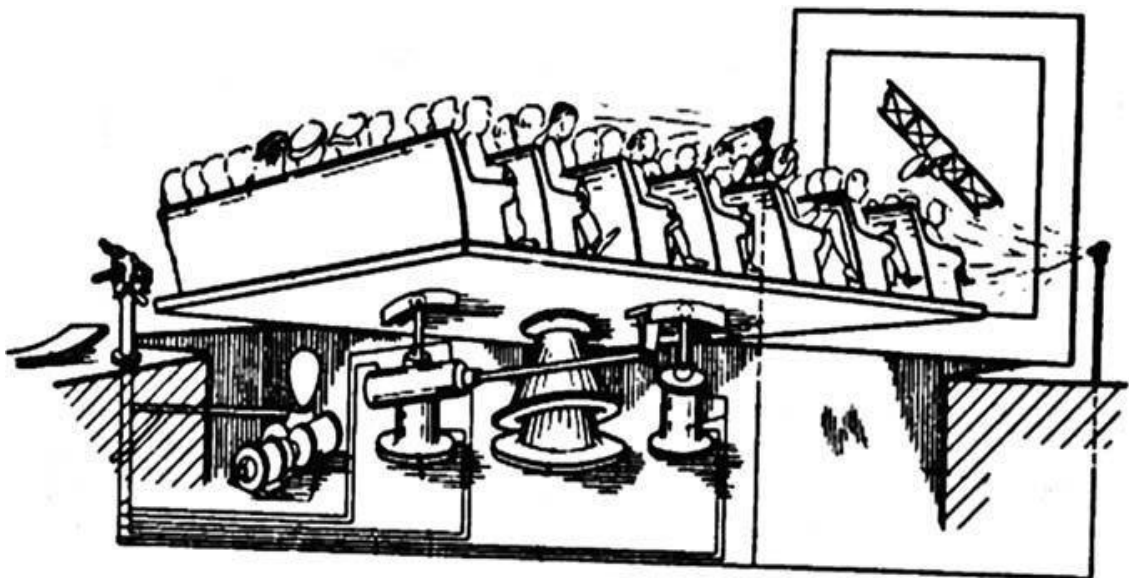


Рис. 1.3. Просторовий механізм Джеймса Е. Гвіннета

У 1938 році Уїллард Поллард (Willard L.V. Pollard) запропонував концепцію першого промислового робота для фарбування розпиленням (рис. 1.4), який мав п'ять ступенів вільності, проте цей проект так і не був реалізований у «металі» самим винахідником.

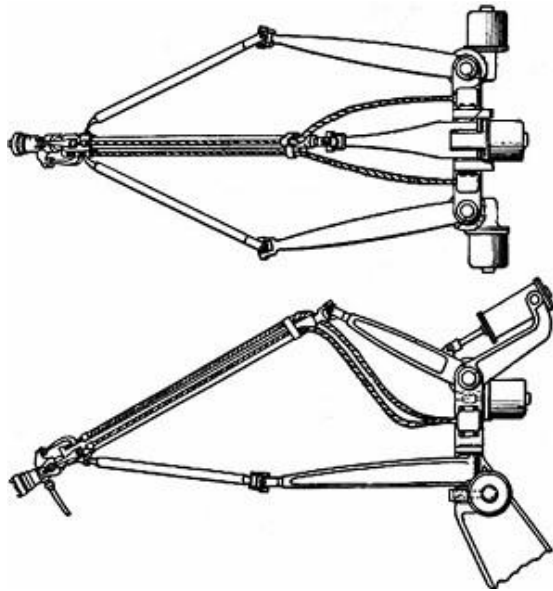


Рис. 1.4. Перший промисловий робот з паралельною кінематикою, розроблений на основі концепції Уілларда Полларда

Револьюційним кроком стала розробка доктора Еріка Гофа (Eric Gough), який у 1947 році сконструював перший октаедральний гексапод (шестиногий механізм). Ця машина, яку автор назвав «універсальним механізмом», використовувалася для випробувань автомобільних шин під навантаженням (рис. 1.5). Конструкція Гофа складалася з шести стійок змінної довжини, що з'єднували основу з рухомою платформою за допомогою шарнірів Гука та кульових опор [25]. Саме Ерік Гоф заклав фундамент для промислового застосування паралельних роботів, довівши їхні переваги: високу жорсткість, низьку інерційність та відсутність накопичення похибок.

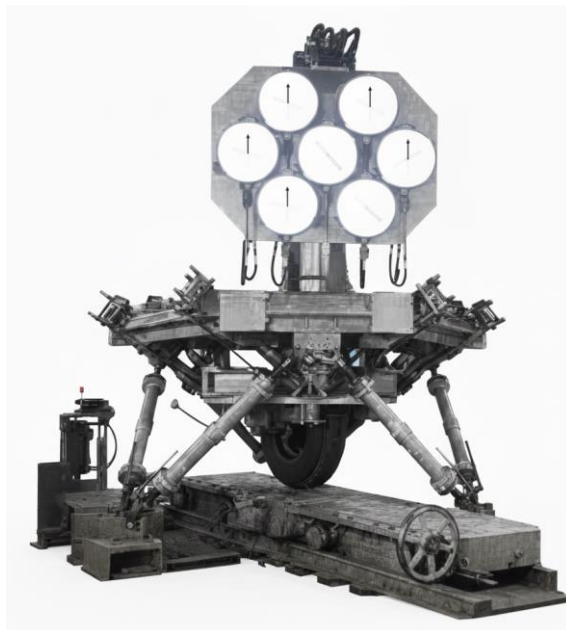


Рис. 1.5. Перший октаедральний гексапод конструкції Еріка Гофа

У 1965 році значний внесок у наукову популяризацію цих механізмів зробив Стюарт, опублікувавши роботу про платформу з шістьма ступенями вільності для авіасимуляторів (рис. 1.6) [33]. Хоча конструкція базувалася на ідеях Гофа, саме «платформа Стюарта» стала загальноновживаним терміном у науковій спільноті. Паралельно з цим, у 1962 році інженер Клаус Каппель запропонував використовувати гексапод як симулятор руху, що пізніше було реалізовано у першому авіасимуляторі гелікоптера для компанії «Sikorsky Aircraft Division of United Technologies» (рис. 1.7).

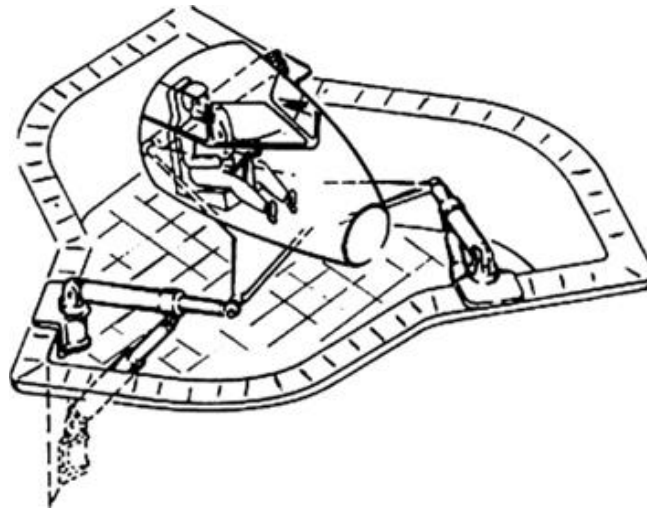


Рис. 1.6. Авіасимулятор на основі платформи Стюарта

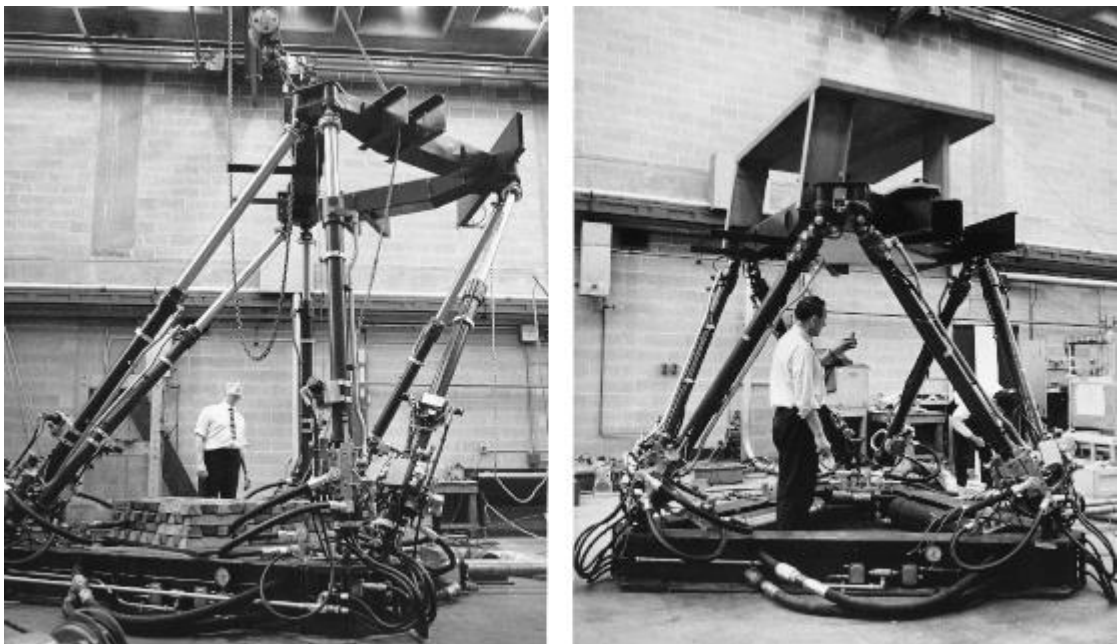


Рис. 1.7. Авіасимулятор компанії «Sikorsky Aircraft Division of United Technologies»

1.3. Сучасний етап промислового впровадження

Комерційний успіх роботів з паралельною кінематикою розпочався у 1980-х роках. Професор Реймонд Клавель розробив робот «Delta» (рис. 1.8), а Карл-Ерік Ньюманн — робот «Tricept» (рис. 1.9). Обидві конструкції знайшли широке застосування у різних галузях промисловості [29, 30].



Рис. 1.8. Робот «Delta»



Рис. 1.9. Робот «Tricept»

Переломним моментом для верстатобудування став 1994 рік, коли на виставці в Чикаго американські компанії «Giddings & Lewis» та «Ingersoll» представили перші металорізальні верстати-гексаподи.

Прототип компанії «Ingersoll» був виконаний у вигляді 12-вузлового гексапода на октаедричній рамі з вертикальним шпинделем (рис. 1.10).

Верстат «Variax Hexacenter» від компанії «Giddings & Lewis» призначався для високошвидкісного фрезерування алюмінію і мав конструкцію з перехресними стійками (рис. 1.11) [1, 9].

Ці події дали поштовх до появи нових моделей верстатів на основі паралельної кінематики від інших виробників, що підтвердило загальну доцільність та ефективність використання такої архітектури у сучасному машинобудуванні.



Рис. 1.10. Гексапод фірми «Ingersoll»

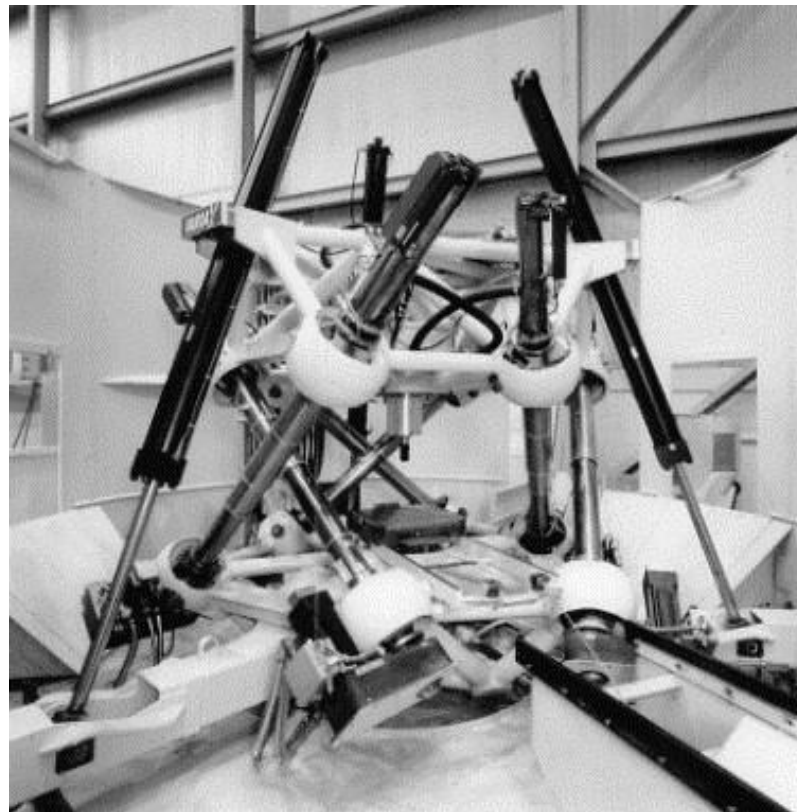


Рис. 1.11. Верстат «Variax Hexacenter» від компанії «Giddings & Lewis»

Незважаючи на те, що «чисті» верстати-гексаподи не витіснили традиційне обладнання так масово, як прогнозувалося у 90-х роках, технологія паралельної кінематики знайшла свої унікальні ніші та еволюціонувала у нові форми. За даними аналітиків, ринок промислових роботів (включаючи паралельні) продовжує зростати, причому сегмент Delta-роботів та спеціалізованих гексаподів демонструє стійкий попит у сферах, де критичними є швидкість або надвисока точність.

Еволюція архітектур: від гексаподів до гібридів. Сучасні дослідження змістили фокус з універсальних верстатів-гексаподів на «гібридні кінематичні схеми» (Hybrid Kinematics). Такі системи поєднують жорсткість паралельної структури з великим робочим простором послідовної.

«Cognibotics SigmaTau»: Приклад нового покоління полегшених роботів для високоточної обробки у великих робочих зонах (рис. 1.12). Завдяки використанню легких штанг та передових алгоритмів калібрування, ці роботи забезпечують точність, недосяжну для класичних антропоморфних маніпуляторів, при цьому зберігаючи велику зону досяжності.



Рис. 1.12. Робот SigmaTau для обробки великих деталей

«Multi-arm Parallel Robots»: Розвиток систем, що використовують кілька паралельних маніпуляторів, які працюють узгоджено для виконання складних складальних операцій в електроніці та медицині (рис. 1.13).



1.13. Паралельний робот компанії Grif-Tools

Кабельні роботи (Cable-Driven Parallel Robots — CDPR). Окремим напрямком, що стрімко розвивається, є роботи з тросовим приводом. Замість жорстких штанг у них використовуються троси, керовані лебідками (рис. 1.14). Це дозволяє масштабувати робочу зону до десятків і сотень метрів (наприклад, для 3D-друку будівель, обслуговування літаків або логістики на стадіонах), зберігаючи високу вантажопідйомність та динаміку.

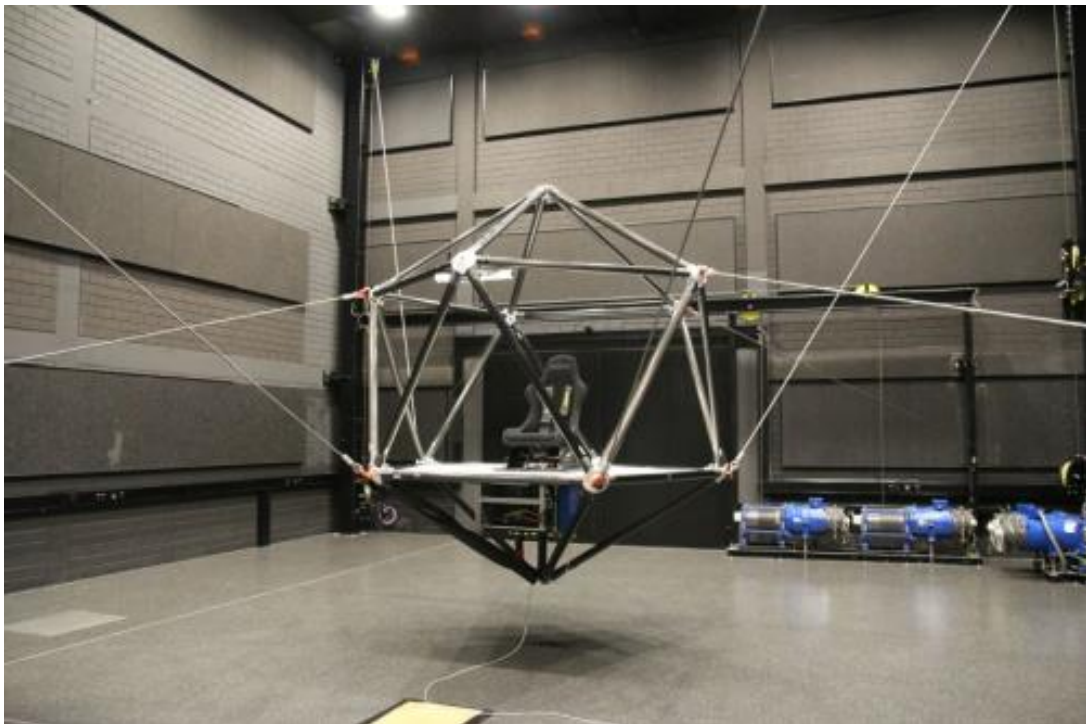


Рис. 1.14. Робот з тросовим приводом

Мікропозиціонування та фотоніка. У сфері нанотехнологій паралельна кінематика стала стандартом. Системи на кшталт SMARPOD (рис. 1.15) або гексаподів від Physik Instrumente (PI) (рис. 1.16) забезпечують позиціонування оптичних волокон та лазерів з точністю до нанометрів, що фізично неможливо для послідовних механізмів через люфти та пружні деформації консольних частин.



Рис. 1.15. Система позиціювання SMARPOD



Рис. 1.16. Гексапод фірми Physik Instrumente (PI)

Основною проблемою впровадження механізмів з паралельною структурою у виробництво є те, що вони є суттєво нелінійними системами, тоді як більшість промислових ЧПК-контролерів розроблені для лінійних послідовних машин. Дослідження показують, що похибка позиціонування паралельного верстата на 70% обумовлена недосконалістю системи керування, на 10-20% — помилками CAD-системи, і лише на 10% — власне механікою верстата. Це вимагає розробки спеціалізованих алгоритмів керування, адаптованих саме для паралельних структур.

1.3.1. Обладнання для механічної обробки матеріалів

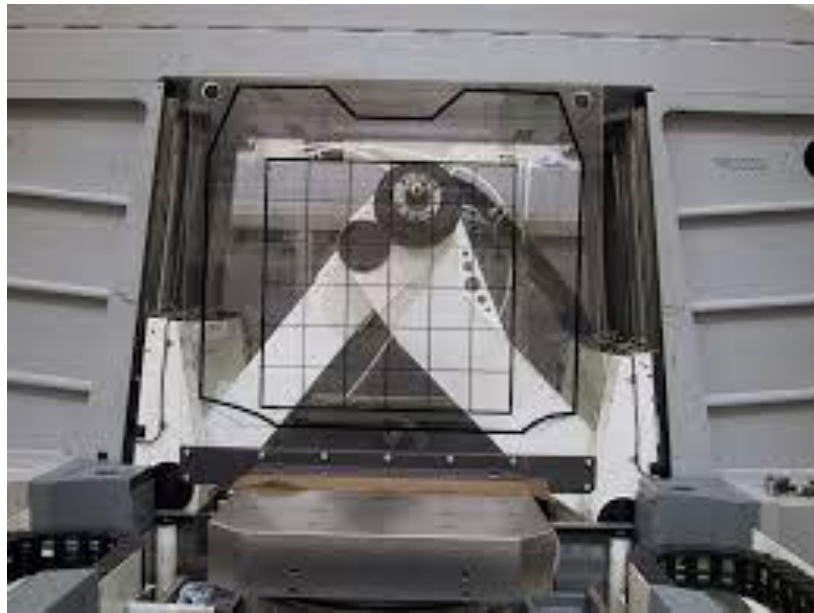
Верстати з обмеженою кількістю ступенів вільності (2-3 DOF)

Для багатьох технологічних операцій повна шестикоординатна рухливість є надлишковою. Більшість завдань механічної обробки вимагають від 3 до 5 ступенів вільності.

Найпростішими є верстати з двома ступенями вільності, які використовують плоскі кінематичні ланцюги. Прикладами є верстат «Genius 500» (рис. 1.17) від німецької компанії «Cross Hüller» та «Trijoint 900H» (рис. 1.18) від чеської «Kovosvit Mas». Обидві моделі використовують плоску кінематичну структуру для забезпечення двох лінійних переміщень шпинделя.



1.17. Верстат «Genius 500» від німецької компанії «Cross Hüller»



1.18. Верстат «Trijoint 900H» від чеської «Kovosvit Mas»

Особливу увагу привертають гібридні кінематичні головки, такі як «Sprint Z3» (DS Technology) (рис. 1.19). Ця головка має три ступені вільності (два кутових $\pm 45^\circ$ і одну лінійну), що робить її ідеальною для авіаційної промисловості.



1.19. Трикоординатна фрезерна головка «Sprint Z3» (DS Technology)

Сучасний розвиток: Технологія Ecospeed

На базі концепції «Sprint Z3» компанія Starrag (раніше DST) розробила серію верстатів Ecospeed (рис. 1.20). Це обладнання стало стандартом у виробництві алюмінієвих силових елементів літаків (шпангоутів, лонжеронів). Завдяки паралельній кінематиці головки, шпиндель може виконувати надзвичайно агресивне врізання в матеріал під довільними кутами з прискореннями, недостижними для традиційних вилкових головок, забезпечуючи коефіцієнт видалення матеріалу (MRR) до 10 000 см³/хв.



Рис. 1.20. Верстат Ecospeed компанії Starrag

П'яти- та шестикоординатні обробні центри (Гексаподи)

У класі повнофункціональних просторових механізмів виділяються кілька знакових моделей.

Німецька компанія «Metrom» розробила унікальну лінійку пентаподів (5 ступенів вільності), призначених для високошвидкісної обробки [9]. Їхньою особливістю є «ікосаедрична» конструкція рами (рис. 1.21), що забезпечує надзвичайно високу жорсткість на одиницю маси.

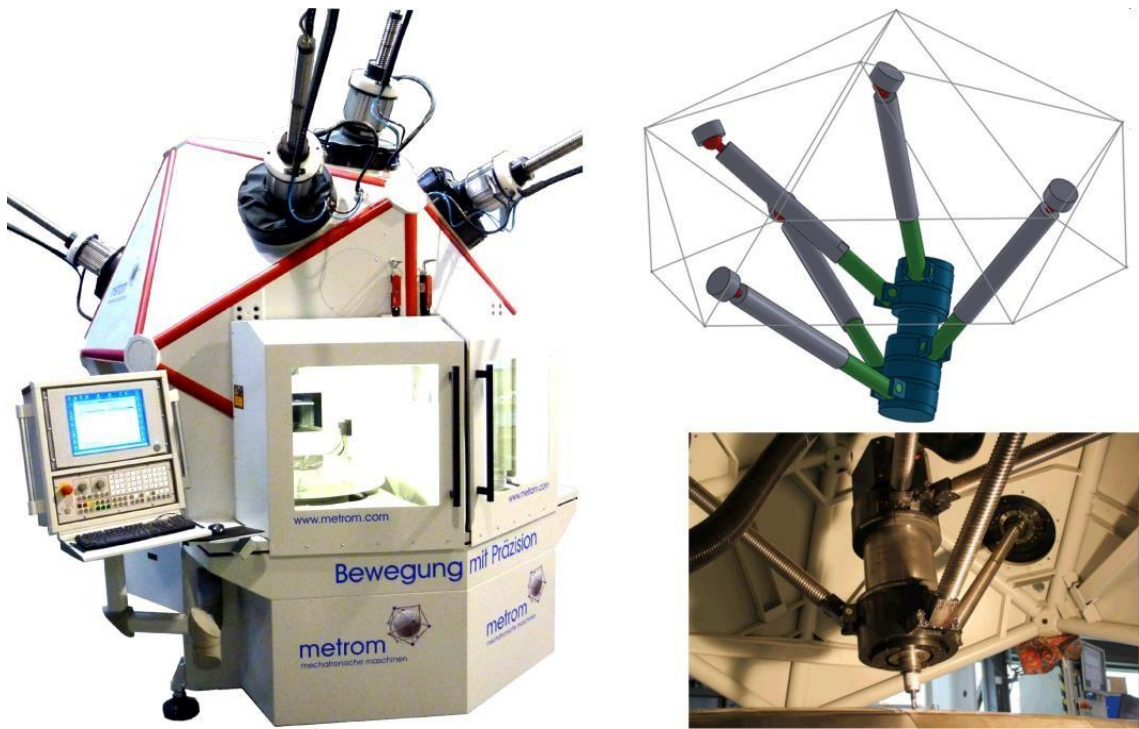


Рис. 1.21. Верстат-пентапод «P1000» компанії «Metrom»

Іншим прикладом є верстат «Mikromat 6X», який позиціонується як прецизійний гексапод (рис. 1.22). Завдяки симетричній конструкції та термостабільним компонентам, він використовується для фінішної обробки деталей оптики та прецизійного машинобудування.



1.22. Верстат-гексапод моделі «Mikromat 6X»

Новітні рішення: Exechon та модульні верстати

Сучасним розвитком ідей шведської компанії Exechon (спадкоємця технології Tricept) є верстат XMini (рис. 1.23). На відміну від масивних верстатів минулого, XMini виготовлений з вуглепластику (карбону). Це вирішує дві критичні проблеми: знижує інерційність рухомих частин і усуває температурні деформації. XMini є модульним і може монтуватися безпосередньо на великі збірні конструкції (наприклад, крила літаків або корпуси підводних човнів) для виконання локальних операцій свердління та фрезерування, що неможливо зробити на стаціонарних порталних верстатах.



Рис. 1.23. Верстат XMini шведської компанії Exechon

1.3.2. Високоточні позиціонуючі пристрої

Високоточні позиціонуючі пристрої є, мабуть, найпопулярнішою областю застосування паралельних механізмів у науці та мікроелектроніці. У цих системах практично завжди використовуються стійки змінної довжини, що

приводяться в дію лінійними п'єзоелектричними або кулько-гвинтовими приводами.

Світовим лідером у цій галузі є компанія «Physik Instrumente» (PI). Їхні гексаподи забезпечують роздільну здатність менше 1 мкм. Такі системи критично важливі для:

- Юстування оптичних волокон та фотонних кристалів.
- Позиціонування зразків у синхротронах та електронних мікроскопах.
- Астрономічних телескопів (керування вторинними дзеркалами).

Розширення спектру: Symétrie (Франція)

Компанія Symétrie значно розширила межі застосування позиціонуючих гексаподів. Окрім лабораторних мікро-гексаподів (як модель BORA з точністю 0.1 мкм), вони виробляють важкі системи для космічної галузі.

Гексаподи серії BREVA та JORAN (рис. 1.24, 1.25). Використовуються для тестування супутників та оптичних інструментів. Вони здатні не лише точно позиціонувати об'єкт вагою в кілька тонн, але й симулювати вібрації та мікропоштовхи, які виникають під час запуску ракети або розгортання сонячних батарей на орбіті. Це вимагає від системи не лише статичної точності, але й видатних динамічних характеристик.



1.24. Гексапод серії BREVA



Рис. 1.25. Гексапод серії JORAN

1.3.3. Робототехніка: від пакування до адитивних технологій

Високошвидкісні маніпулятори (Delta-роботи)

Паралельні роботи довели свою перевагу над послідовними в задачах, що вимагають високої швидкості та жорсткості. Найвідомішим представником є Delta-робот, який завдяки малій вазі рухомих частин може розвивати прискорення до 20g і точність до 10 мкм.

Класичним застосуванням є пакувальна промисловість (Pick-and-Place). Тут лідерами є роботи ABB FlexPicker (рис. 1.26) та Fanuc M-series (рис. 1.27).



Рис. 1.26. Робот ABB FlexPicker



Рис. 1.27. Робот Fanuc M-1

Адитивні технології (3D-друк)

Принципи Delta-кінематики знайшли нове життя в технологіях 3D-друку.

WASP (Італія) використовує Delta-архітектуру для створення великогабаритних будівельних 3D-принтерів (наприклад, WASP 40100 Clay (рис. 1.28)). Нерухомі двигуни дозволяють переміщувати важкий екструдер з бетоном або глиною на високих швидкостях без розгойдування конструкції, що неможливо для портальних принтерів аналогічного розміру.



Рис. 1.28. 3D-принтер WASP 40100 Clay

Тросові роботи (Cable-Driven Parallel Robots)

Окремим класом паралельних механізмів, який набуває популярності, є тросові роботи. У цих системах замість жорстких штанг використовуються троси, довжина яких регулюється лебідками.

Fraunhofer IPAnema (рис. 1.29): Сімейство роботів, розроблених німецьким інститутом Фраунгофера. Вони дозволяють автоматизувати логістику у величезних просторах (стадіони, ангари), де встановлення жорстких конструкцій неможливе. IPAnema може маніпулювати вантажами на площі в тисячі квадратних метрів з високою динамікою.



Рис. 1.29. Паралельний тросовий робот Fraunhofer IPAnema

1.3.4. Медичні та вимірювальні системи

Медична робототехніка

Паралельна кінематика стала золотим стандартом у високоточній радіохірургії.

Elekta HexaPOD evo RT System: Роботизований стіл пацієнта з 6 ступенями вільності (рис. 1.30). Під час променевої терапії пухлина може

зміщуватися через дихання або м'язову релаксацію пацієнта. Система NехаPOD, інтегрована з лінійним прискорювачем, автоматично коригує положення тіла пацієнта в шести координатах (зміщення X, Y, Z та нахили Pitch, Roll, Yaw) перед кожним сеансом, забезпечуючи субміліметрову точність опромінення і захист здорових тканин.



Рис. 1.30. Роботизований стіл Elekta NехаPOD evo RT System

Координатно-вимірювальні машини (КВМ)

Гексапод є ідеальною структурою для цехової КВМ. У таких машинах відсутні зношувані напрямні, а похибки компенсуються програмно.

Renishaw Equator (рис. 1.31): Це сучасний пристрій, який фактично створив новий клас обладнання — «гнучкі калібри». Він працює на основі паралельної кінематики і використовується безпосередньо в цехах поруч із верстатами. На відміну від класичних КВМ, Equator працює за принципом порівняння: він сканує еталонну деталь, а потім серію виготовлених деталей, виявляючи відхилення. Паралельна кінематика забезпечує йому необхідну швидкість сканування та жорсткість конструкції при компактних розмірах.



Рис. 1.31. Координатно-вимірвальна машина Renishaw Equator

1.4. Мета і задачі досліджень

Метою роботи є дослідження функціональних можливостей верстата з паралельною кінематикою з круговою напрямною.

Поставлена мета досягнута шляхом вирішення таких задач:

- аналіз існуючих схем побудови обладнання з паралельною кінематикою;
- постановка і розв'язок зворотної задач кінематики для запропонованої компоновки верстата і визначення кінематичних залежностей;
- виконання моделювання робочого простору верстата з круговою напрямною.

РОЗДІЛ 2

КОНСТРУКЦІЯ І КІНЕМАТИЧНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО
ОБЛАДНАННЯ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ

2.1. Конструкція та принцип дії верстату з круговою напрямною

Традиційне просторове технологічне обладнання з паралельною кінематикою (гексаподи, триподи тощо), не завжди здатні забезпечити необхідну область робочого простору вихідної ланки, зокрема, щодо кутів повороту навколо вертикальної осі Z. У відповідь на ці обмеження була запропонована схема верстата, яка дозволяє вирішити проблему недостатнього кута повороту вихідної ланки.

Верстат з паралельною кінематикою з круговою напрямною (рис. 2.1) являє собою механізм паралельної структури з шістьма ступенями вільності, який об'єднує переваги гексаподів та унікальну архітектуру приводу. У даному випадку розглядається компоновка, де рух вихідної ланки забезпечується ланками незмінної довжини, а приводи розташовані на нерухомій основі у вигляді кругової напрямної. Така компоновка забезпечує унікальні кінематичні можливості, зокрема, повний поворот навколо вертикальної осі.

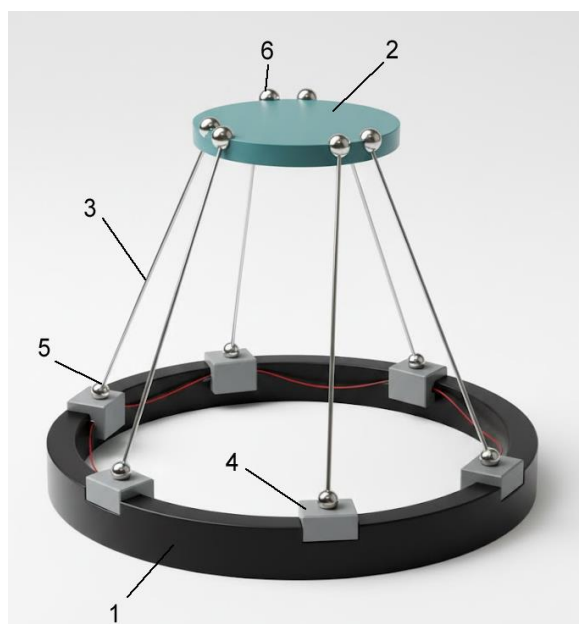


Рис. 2.1. Схема верстату з круговою напрямною

Верстат складається з трьох основних функціональних вузлів: нерухомої основи 1, виконаної у вигляді кругових напрямних, рухомої платформи (виконавчого органу) 2 та шести кінематичних ланок постійної довжини 3. Один кінець кінематичної ланки зв'язаний з повзуном 4 за допомогою шарніра 5, інший – з виконавчим органом за допомогою шарніра 6. Повзуни 4 можуть рухатись вздовж напрямної 1.

Шестикоординатний рух виконавчого органу 2 (три лінійні і три обертальні координати) повністю визначається положенням шести повзунів 4 на круговій напрямній 1. Постійна довжина кінематичних ланок 3 виступає як геометричне обмеження, що зв'язує положення шарнірів 5 і 6.

Таким чином, описаний верстата є ефективною альтернативою класичним гексаподам, дозволяючи досягати широкої області робочого простору з високою точністю, що робить його незамінним для використання в матеріалобробці, симуляторах руху, тренажерах та високоточних позиціонуючих пристроях.

2.2. Просторові функціональні залежності компоновки верстата

2.2.1. Опис кінематичної схеми

Верстат являє собою механізм паралельної структури з шістьма ступенями вільності, який має шість незалежних кінематичних ланцюгів (рис. 2.2). Особливістю цієї схеми, на відміну від класичних гексаподів, є забезпечення повного повороту рухомої платформи (виконавчого органу) відносно вертикальної осі. Кожен із шести кінематичних ланцюгів містить одну обертальну пару (каретку) та дві сферичні пари (шарніри). Нижня (нерухома) основа представлена круговою напрямною, по якій переміщуються вхідні обертальні пари – повзуни B_i . Радіус основи позначається як R .

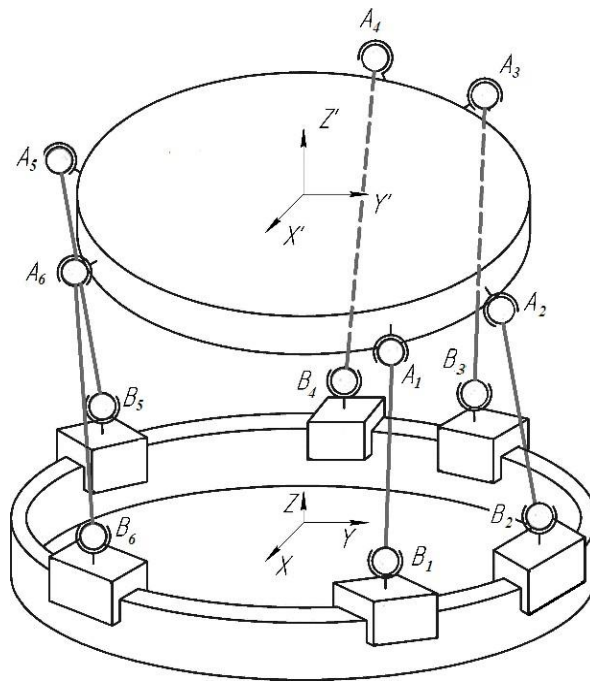


Рис. 2.2. Компоновка верстата з круговою напрямною

Верхня (рухома) платформа (виконавчий орган) має шість точок кріплення сферичних шарнірів, які позначаються $A_1, A_2, \dots, A_6$. Радіус вихідної ланки позначається як r . З'єднувальні кінематичні ланки (штанги) з'єднують точки A_i та B_i . Для даного механізму штанги мають незмінну довжину L . Узагальнені координати механізму — це кути повороту φ_i повзунів B_i навколо вертикальної осі Z відносно осі X нерухомої системи координат (рис. 2.3).

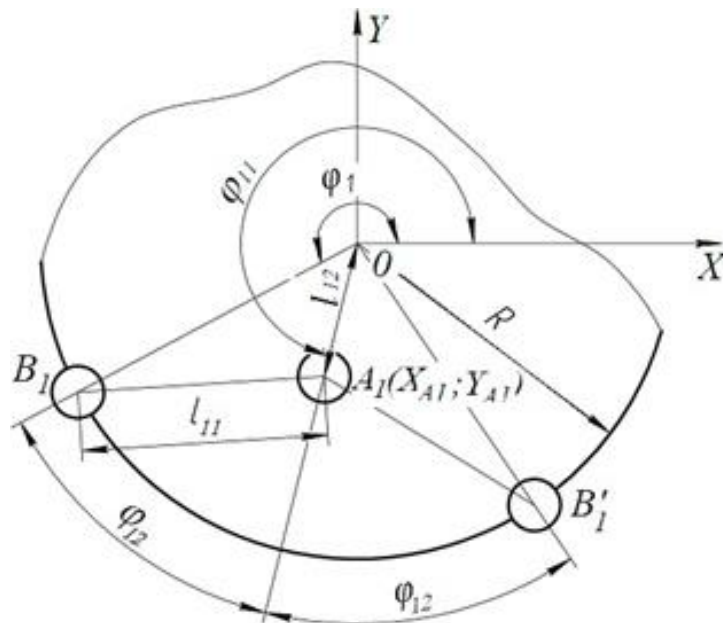


Рис. 2.3. Розміщення повзунів на круговій напрямній

2.2.2. Вирішення зворотної задачі кінематики

Для вирішення задачі керування верстатом з паралельною кінематикою необхідно вирішити зворотню задачу кінематики шестикоординатних просторових механізмів. Зворотна задача кінематики полягає у визначенні необхідних узагальнених координат — кутів $\varphi_1, \dots, \varphi_6$ положення повзунів на круговій напрямній, які забезпечують задане положення та орієнтацію рухомої платформи. Для вирішення цієї задачі використовуємо геометричний підхід, заснований на незмінній довжині кінематичних ланок L та відомій геометрії платформи.

Визначення координат точок рухомої платформи

Задане положення та орієнтація рухомої платформи визначається матрицею переходу M , що описує перехід з рухомої системи координат $X'Y'Z'$ вихідної ланки в нерухому систему координат XYZ основи (кругової напрямної). Матриця M є результатом послідовного перемноження матриць обертання навколо осей OX , OY , OZ відповідно на кути Ейлера θ , φ , ψ та зміщення на величини x_1, y_1, z_1 .

Таким чином, в результаті перемноження матриць

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_1 \\ 0 & 1 & 0 & y_1 \\ 0 & 0 & 1 & z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

отримаємо загальну матрицю

$$M = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \varphi & \cos \psi \sin \varphi \sin \theta - \sin \psi \cos \theta & \sin \psi \sin \theta + \cos \psi \cos \theta \sin \varphi & x_1 \\ \sin \psi \cos \varphi & \cos \psi \cos \theta + \sin \psi \sin \varphi \sin \theta & \sin \psi \cos \theta \sin \varphi - \cos \psi \sin \theta & y_1 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \sin \theta & \cos \varphi \cos \theta & z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Координати точок кріплення A_i на вихідній ланці в нерухомій системі координат XYZ (матриця A) визначаються добутком перехідної матриці M та матриці координат точок A_i у рухомій системі P_I :

$$A = M \times P_1$$

Кожен стовпець матриці A представляє координати $[X_{Ai}, Y_{Ai}, Z_{Ai}, 1]^T$ відповідної точки A_i у системі XYZ .

Обчислення кутів повзунів φ_i

Для вирішення зворотної задачі про положення для заданого механізму, необхідно визначити узагальнені координати $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_6$ між додатним напрямком осі X та радіус-векторами OB точок $(B_1, B_2, \dots, B_6)$ положення повзунів.

Для визначення кута φ_i використовується трикутник OA_iB_i на площині XOY основи (де O – центр основи) (рис. 2.3).

Проекція точки A_i на площину XOY має координати (X_{Ai}, Y_{Ai}) . Відстань від центру O до цієї проекції позначається як l_{i2} :

$$l_{i2} = \sqrt{X_{Ai}^2 + Y_{Ai}^2}$$

Кут φ_{i1} — це кут між радіусом-вектором l_{i2} та позитивним напрямком осі X . Від місця знаходження в площині основи XOY проекції точки A_i залежить знак кута (знак $+$ або $-$ перед координатою Y_{Ai}):

якщо $Y_{Ai} > 0$, то

$$\varphi_{i1} = \arccos\left(\frac{X_{Ai}}{l_{i2}}\right);$$

якщо $Y_{Ai} < 0$, то

$$\varphi_{i1} = 2\pi - \arccos\left(\frac{X_{Ai}}{l_{i2}}\right).$$

Наступним крок полягає у визначенні проекції довжини ланки l_{i1} . Оскільки довжина штанги L (гіпотенуза) постійна, а координата Z_{Ai} відома, можна знайти проекцію l_{i1} штанги A_iB_i на площину XOY :

$$l_{i1} = \sqrt{L^2 - Z_{Ai}^2}$$

Зауважимо, що оскільки Z_{Ai} — координата точки A_i в нерухомій системі координат основи, то у випадку $Z_{Ai}^2 > L^2$ задане положення неможливе (штанга не дістане).

Для визначення кута φ_{i2} застосуємо теорему косинусів до трикутника OA_iB_i (на площині XOY), сторони якого: R (радіус кругової напрямної), l_{i2} (проекція OA_i) та l_{i1} (проекція A_iB_i).

$$\cos \varphi_{i2} = \frac{R^2 + l_{i2}^2 - l_{i1}^2}{2Rl_{i2}}$$

$$\varphi_{i2} = \arccos\left(\frac{R^2 + l_{i2}^2 - l_{i1}^2}{2Rl_{i2}}\right)$$

З рис. 2.3 видно, що задача має два рішення: можна взяти кут за годинниковою стрілкою (точка B_i) або проти годинникової стрілки (точка B'_i). Вибір розташування опорних точок (повзунів) визначає стійкість механізму.

Для надання стабільності структурі механізму, щоб виключити перетин кінематичних ланок, необхідно зробити симетричне розташування повзунів $B_1, B_2, \dots, B_6$ на напрямній. Приймемо правило, що повзуни B_i з парним індексом ($i = 2, 4, 6$) встановлюємо в одному напрямку (проти годинникової стрілки), а повзуни B_i з непарним індексом ($i = 1, 3, 5$) — в іншому напрямку (за годинниковою стрілкою).

Остаточно обчислюємо кут розміщення повзуна φ_i — це кут, що визначає положення повзуна B_i на круговій напрямній. Він дорівнює сумі (або різниці) кутів φ_{i1} та φ_{i2} .

$$\varphi_i = \varphi_{i1} \pm \varphi_{i2}$$

Для непарних індексів ($i = 1, 3, 5$) використовується знак «+» (по ходу годинникової стрілки), для парних індексів ($i = 2, 4, 6$) використовується знак «−» (проти ходу годинникової стрілки).

Таким чином, для заданого положення вихідної ланки, зворотна задача кінематики зводиться до однозначного визначення необхідних кутів φ_i для керування шістьма повзунами основи.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО ПРОСТОРУ ВЕРСТАТА З КРУГОВОЮ НАПРЯМНОЮ

3.1. Визначення робочого простору верстата з круговою напрямною

Робочий простір механізму паралельної структури визначається як множина всіх можливих положень та орієнтацій центру рухомої платформи, яких можна досягти без порушення фізичних та кінематичних обмежень. Для верстата з круговою напрямною робочий простір має форму тіла обертання навколо осі Z , що відображає його симетрію та унікальну здатність забезпечувати повний поворот вихідної ланки навколо вертикальної осі (рис. 3.1).

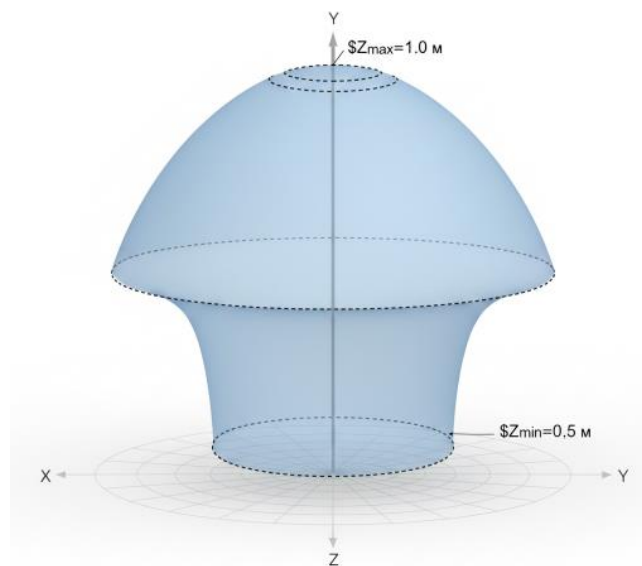


Рис. 3.1. Робочий простір верстата з круговою напрямною

3.1.1. Метод визначення розмірів та конфігурації

Визначення розмірів і конфігурації робочого простору здійснюється методом «сканування» [4, 6, 13]. Цей метод передбачає перевірку кінцевої точки (положення центру платформи) в дискретних точках тривимірного

простору XYZ з фіксованими кроками (наприклад, 0.05 м по X , 0.1 м по Y та 0.01 м по Z). Для кожної тестової точки проводиться розв'язання зворотної задачі кінематики для визначення необхідних вхідних координат (φ_i) і перевірка на виконання всіх конструктивних та кінематичних обмежень. Якщо зворотна задача кінематики має рішення і всі обмеження здійснюються, точка належить робочому простору.

3.1.2. Обмеження, що впливають на розміри робочого простору

Розмір та конфігурація робочого зони безпосередньо залежать від низки фізичних та кінематичних обмежень, які необхідно враховувати під час сканування:

1. Геометричні обмеження довжини ланки. Найважливіше обмеження, що визначає вертикальні межі простору. Воно вимагає, щоб вертикальна координата точки кріплення платформи Z_{Ai} була меншою за довжину штанги L ($Z_{Ai} < L$), що запобігає перевищенню максимальної робочої висоти.

2. Кінематичні обмеження повзунів. Обмеження кутового положення сусідніх повзунів необхідне для запобігання їхньому зіткненню під час руху по круговій напрямній.

3. Обмеження кутів нахилу. Кути нахилу штанг повинні залишатися в межах робочих діапазонів сферичних шарнірів і не перевищувати критичних значень відносно нормалей рухомої платформи та основи.

4. Умова неперетину кінематичних ланцюгів. Повинна бути забезпечена умова, що кінематичні ланцюги не перетинаються в просторі, що є критичним для функціональності механізму.

5. Умова уникнення особливих положень (сингулярності). Для гарантування керованості та точності необхідно, щоб центр платформи не перебував поблизу особливих положень.

6. Умова стійкості (неопрокидання). Для забезпечення стійкості вихідної ланки проекція центру мас платформи на площину основи (XOY) повинна

завжди залишатися всередині шестикутника, утвореного точками розташування повзунів $B_1, \dots, B_6$.

3.1.3 Алгоритм побудови робочого простору

Як вже зазначалось, побудова робочого простору здійснюється шляхом «сканування» положень центру вихідної ланки у тривимірному просторі та перевірки кожного положення на відповідність усім конструктивним та кінематичним обмеженням.

«Сканування» проводилося всередині паралелепіпеда, визначеного в нерухомій системі координат XYZ .

Визначаємо кроки сканування (дискретизація) вздовж кожної з осей X , Y , Z .

Для кожної точки в просторі та заданої орієнтації платформи виконується наступний алгоритм:

1. Розв'язання зворотної задачі кінематики. За заданими параметрами положення платформи (P, R) та константними довжинами L , обчислюються необхідні кути повзунів φ_i . Якщо зворотна задача кінематики не має розв'язку, точка відкидається.

2. Перевірка геометричних обмежень (розміри).

Довжина штанги L . Перевіряється, чи не перевищує вертикальна координата точок кріплення Z_{Ai} довжину штанги L .

Обмеження повзунів. Перевіряється, чи відповідають обчислені кути φ_i допустимому мінімальному та максимальному куту розташування між сусідніми повзунами (наприклад, $12^\circ \leq \angle B_i O B_{i+1} \leq 120^\circ$).

3. Перевірка кінематичних обмежень (кути нахилу). Перевіряється кут нахилу штанги відносно нормалі до основи (осі Z) та нормалі до рухомої платформи.

4. Перевірка на сингулярність (особливі положення). Сингулярне положення означає втрату керованості, і точка відкидається.

5. Перевірка на стійкість (опрокидання). Перевіряється, чи знаходиться проекція центру мас вихідної ланки на площину XOY всередині шестикутника (або іншого багатокутника), утвореного точками повзунів B_i .

Точки, які успішно пройшли всі перевірки, формують робочий простір. Оскільки простір є тілом обертання навколо Z , достатньо побудувати його переріз у площині XZ . Найбільші та найменші значення Z для кожного значення X наносяться на графік, формуючи контур робочої зони (рис. 3.2).

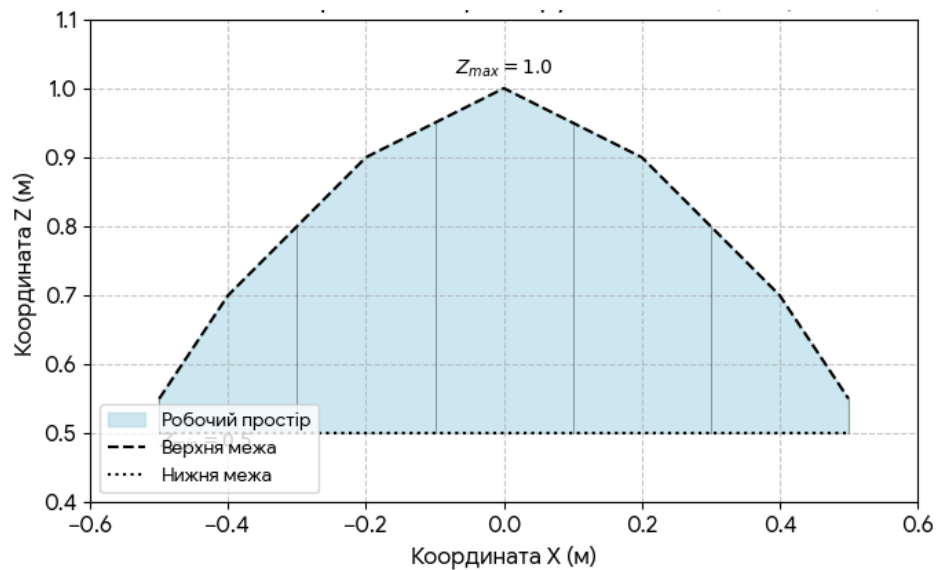


Рис. 3.2. Приклад перерізу робочого простору верстата в площині XZ

3.2. Дослідження рухів верстата з круговою напрямною

Дослідження зміни кутів переміщення повзунів кінематичних ланок вздовж кругової напрямної виконувались для наступних параметрів верстата:

- довжина штанги $L = 0,98$ м;
- радіус рухомої платформи $r = 0.95$ м;
- радіус основи $R = 1.0198$ м.

Графік, що ілюструє зміну кутів φ_i (узагальнених координат) повзунів при переміщенні виконавчого органу (рухомої платформи) вздовж осі Z , наведено на рис. 3.3

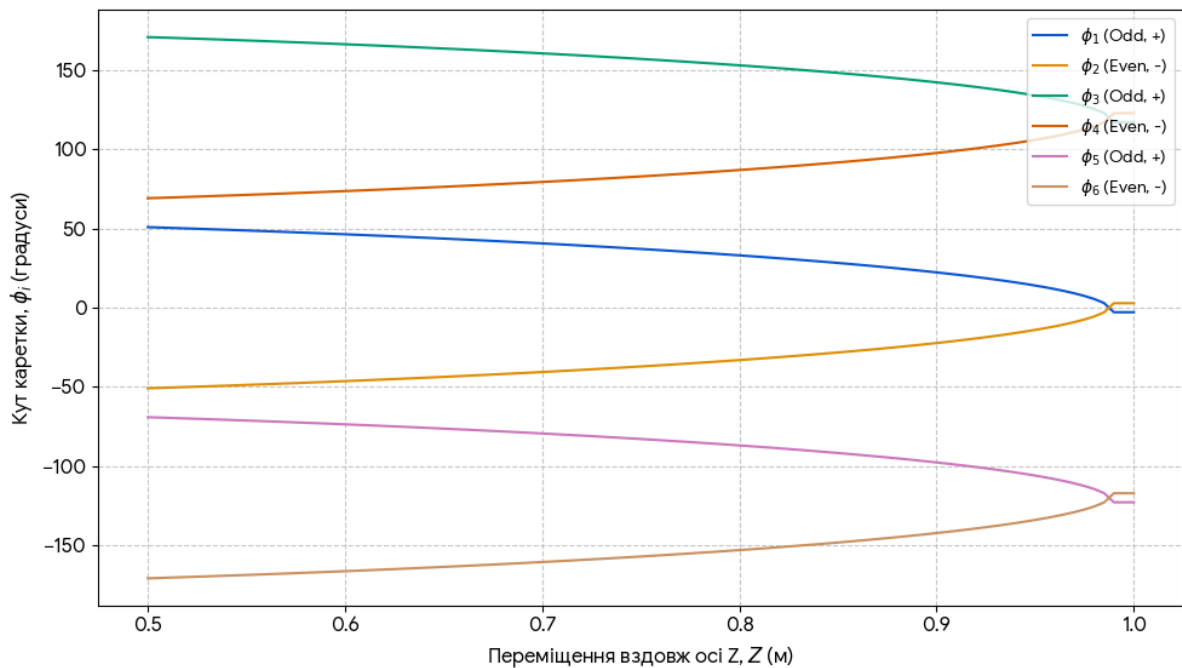


Рис. 3.3. Зміна кутів φ_i повзунів при переміщенні виконавчого органу вздовж осі Z

Для побудови графіка було використано рішення зворотної задачі кінематики для випадку чистого вертикального переміщення ($x = 0$, $y = 0$, $\theta = 0$, $\varphi = 0$, $\psi = 0$) та діапазону переміщення по осі Z : від 0.5 м до 1 м.

Кут φ_i визначається за формулою $\varphi_i = \varphi_{i1} \pm \varphi_{i2}$. Кут φ_{i1} (кут проекції шарніра платформи) є константою для кожного приводу, оскільки платформа лише підіймається і не обертається. Кут φ_{i2} (кут трикутника OA_iB_i на нерухомій основі) залежить від величини Z через зміну горизонтальної проекції штанги $l_{i1} = \sqrt{L^2 - Z^2}$. Знак « $\pm$ » визначає кінцеву конфігурацію механізму, згідно з правилом: « $+$ » для непарних індексів ($\varphi_1, \varphi_3, \varphi_5$) та « $-$ » для парних індексів ($\varphi_2, \varphi_4, \varphi_6$).

Аналіз графіка:

- **Діапазон Z .** Графік показує поведінку кутів у межах $Z = 0.5 \dots 1.0$ м. Точка $Z = 1.0$ м відповідає максимальній висоті (де штанги стають майже вертикальними).

- **Залежність від Z .** Зі збільшенням висоти Z (рух вгору), всі кути φ_i прагнуть до нуля. Це означає, що повзуни, які на меншій висоті були

розташовані по-різному (наприклад, φ_3 близько 120° , а φ_4 близько 130°), зближуються до своїх базових кутів (положення, де $\varphi_i = \varphi_{i1}$).

- **Поведінка кутів.** Криві φ_i демонструють монотонний (нелінійний) спад або зростання, що типово для подібної кінематики механізму.

- **Симетрія.** Графік відображає симетрію, властиву обладнанню з паралельною кінематикою. Наприклад, φ_1 та φ_2 симетричні відносно осі X , а φ_3 та φ_6 симетричні відносно осі Y .

Графіки зміни кутів φ_i при переміщенні виконавчого органу вздовж осі Y не будуть симетричними внаслідок нелінійної залежності та асиметрії, викликані зміщенням вздовж однієї осі. Найбільші зміни кутів будуть спостерігатися у штанг, розташованих ближче до осі Y (наприклад, φ_3 та φ_5).

Для побудови графіка (рис. 3.4) використано параметри: $L = 1$ м, $R = 1.0198$ м, а також координати точок A_i у власній системі платформи. Діапазон переміщення по осі Y обрано симетрично: $y = -0.5 \dots 0.5$ м.

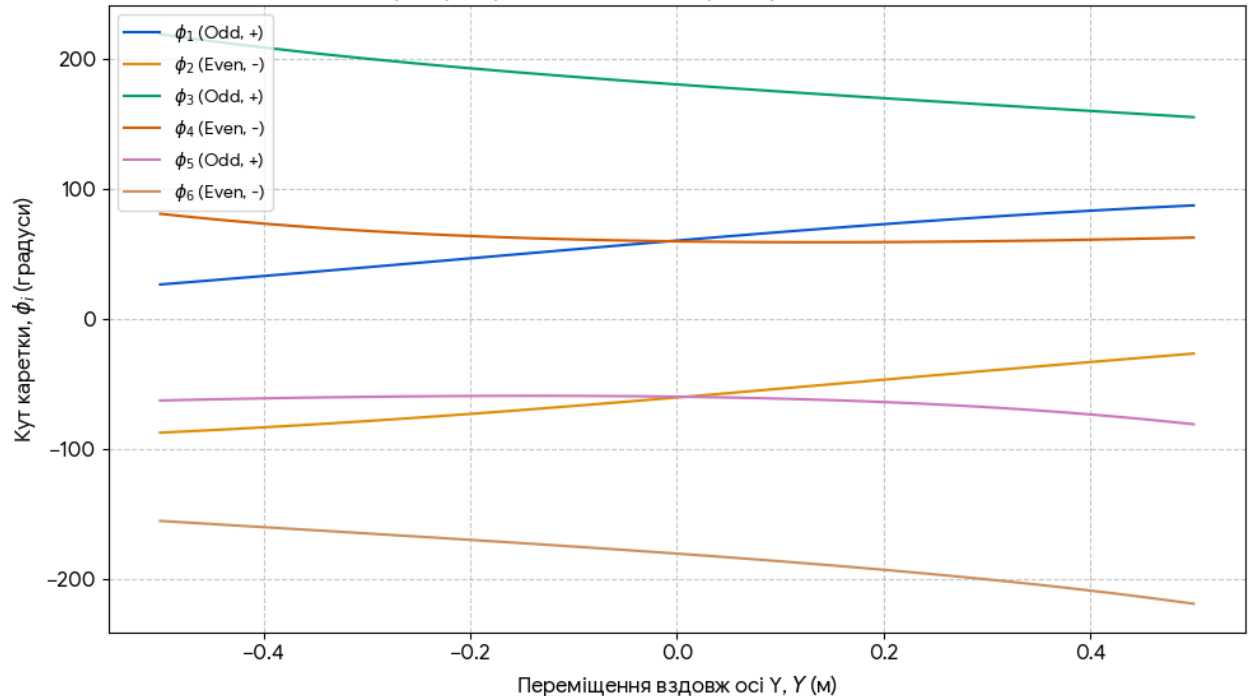


Рис. 3.4. Зміна кутів φ_i повзунів при переміщенні виконавчого органу вздовж осі Y

Аналіз графіка:

- **Асиметрія.** На відміну від руху по Z , графік є асиметричним відносно точки $Y = 0$, оскільки зміщення по Y змінює положення шарнірів A_i у просторі, і ця зміна є різною для штанг, розташованих перед ($Y > 0$) і за ($Y < 0$) центром.

- **Найбільша чутливість (динамічні кути).** Найбільші зміни кутів демонструють штанги φ_3 та φ_4 , оскільки їхні шарніри A_i розташовані ближче до позитивної осі Y у власній системі платформи. При зміщенні платформи по Y ($Y \rightarrow 0.5$ м) їхні кути φ_i змінюються найбільш динамічно.

- **Найменша чутливість.** Штанги φ_1 та φ_2 (розташовані близько до осі X) демонструють меншу зміну кутів, оскільки зміщення Y менше впливає на їхнє положення відносно центра основи.

- **Кожен кут унікальний.** Оскільки зміщення відбувається лише по одній осі Y і платформа не має абсолютно симетричного розташування шарнірів (тобто $X_{bi} \neq Y_{bi}$), кожен кут φ_i має унікальну траєкторію.

Графік підтверджує, що для підтримки лінійної траєкторії вздовж осі Y необхідна складна координована зміна кутів усіх шести приводів φ_i .

Для побудови графіка (рис. 3.5), що ілюструє зміну кутів φ_i повзунів при переміщенні рухомої платформи вздовж осі X здійснювався рух по осі X в діапазоні $[-0.5, 0.5]$ м.

Аналіз графіка:

- **Симетрія.** Штанги φ_1 і φ_2 (розташовані близько до осі X у позитивному напрямку) демонструють найбільші зміни та найбільшу чутливість до зміщення по X . Штанги φ_4 і φ_5 (розташовані з негативним X_{bi}) також показують значні, але інші зміни. Поведінка кривих φ_1 і φ_2 є приблизно дзеркальною, так само як φ_3 і φ_6 , та φ_4 і φ_5 . Це відображає симетричне розташування шарнірів платформи відносно осі X .

• **Залежність кутів.** Як і у випадку з рухом по Y , кут φ_i є нелінійною функцією від X , оскільки зміна координати X_{Ai} впливає як на кут φ_{il} (напрямок проекції), так і на відстань l_{i2} (радіус-вектор проекції).

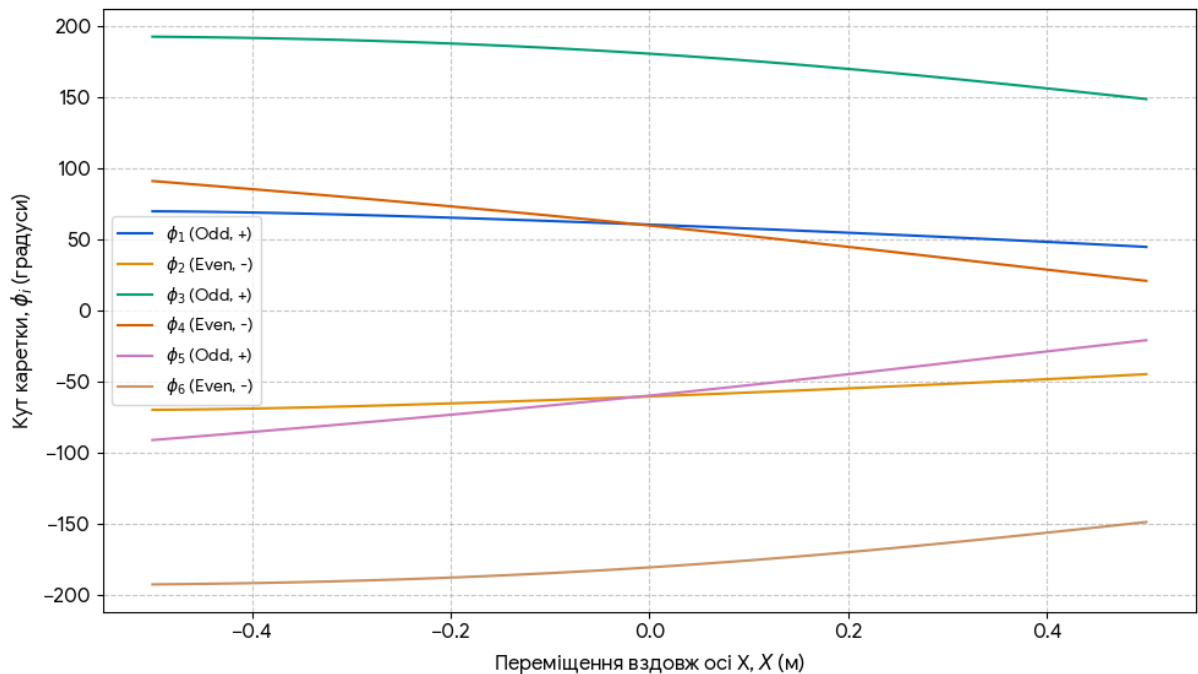


Рис. 3.5. Зміна кутів φ_i повзунів при переміщенні виконавчого органу вздовж осі X

• **Причина зміни кутів.** Для підтримки постійної висоти та орієнтації при зміщенні платформи по горизонталі, повзуни повинні рухатись по круговій напрямній, щоб компенсувати зміну горизонтальної відстані між точками A_i та центром O . Коли платформа зміщується, штанги, що стають більш паралельними до напрямку руху, вимагають більшого переміщення повзунів.

Графік, що ілюструє зміну кутів φ_i повзунів при переміщенні виконавчого органу по круговій траєкторії в горизонтальній площині навколо осі Z (рис. 3.6), отримано при наступних умовах:

- Траєкторія: коло радіусом $r = 0.2$ м.
- Висота: постійна $Z = 0.75$ м.

Аналіз графіка

- **Періодичність.** Всі криві є періодичними з періодом 360° , що відповідає одному повному оберту платформи по круговій траєкторії.

- **Форма хвиль.** Хвилі мають складну нелінійну форму, близьку до синусоїдальної, але зі зміщеннями та різною амплітудою. Це відображає залежність кута φ_i від обох координат X та Y переміщення, а також від початкового (асиметричного) розташування шарнірів b_i .

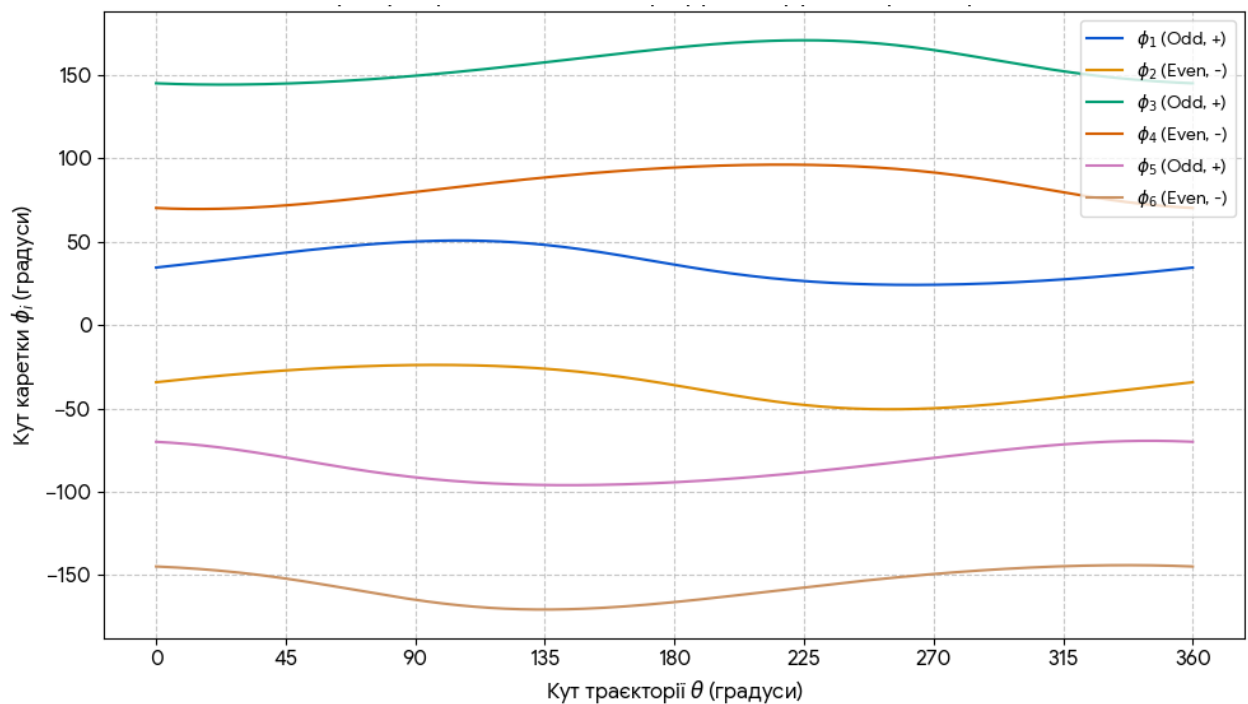


Рис. 3.6. Зміна кутів φ_i повзунів при переміщенні виконавчого органу по круговій траєкторії

- **Симетрія та групування.** Переміщення φ_1 і φ_2 та φ_4 і φ_5 (найбільш віддалені від початкової осі X) мають найбільші амплітуди змін. Це тому, що вони найбільш чутливі до горизонтального переміщення. Графіки показують, що для підтримки кругової траєкторії необхідно, щоб кути φ_i плавно і безперервно змінювалися, що забезпечується конструкцією верстата з круговою напрямною.

- **Амплітуда.** Амплітуда зміни кутів невелика (менше 1°), що вказує на ефективність конструкції: значні переміщення платформи можуть бути

досягнуті за допомогою відносно малих рухів повзунів, особливо якщо платформа знаходиться на середній висоті.

3.3. Визначення конструктивних параметрів верстата з круговою напрямною

Конструктивні параметри верстата вибираються не просто для максимального об'єму робочого простору, а для досягнення необхідних функціональних характеристик (зокрема, повного кругового обертання) при збереженні високої точності та жорсткості.

«Найкращими» конструктивними параметрами будуть ті, які забезпечують найбільшу функціональність та робочу область для заданого завдання (наприклад, симулятора), уникаючи при цьому сингулярностей та порушень конструктивних обмежень.

Виходячи з габаритів конструкції довжина кінематичних ланок (L) має бути максимальною, оскільки L безпосередньо обмежує максимальну висоту робочого простору ($Z_{max} \approx L$). Радіус основи повинен бути оптимізований відносно L для балансу між горизонтальною досяжністю та вертикальною жорсткістю. Радіус рухомої платформи (r) повинен бути мінімально необхідним для розміщення корисного навантаження і шарнірів, оскільки r зменшує горизонтальну досяжність. Для забезпечення повного керування (6-координатного) і кругового обертання необхідні шість кінематичних ланцюгів.

Розмір робочого простору обмежується трьома основними геометричними параметрами: L , R та r .

Збільшення довжини штанг L найбільш прямолінійно збільшує робочий простір, оскільки Z_{max} та загальний об'єм зростають зі збільшенням L .

Максимальна горизонтальна досяжність (R_{max}) відбувається, коли горизонтальна проекція штанги ($l_{i1} = \sqrt{L^2 - Z^2}$) додається до R : $R_{max} \approx R + l_{i1} - r$. Для максимізації R_{max} потрібно, щоб R був великим.

В той же час, чим менше r , тим більшою може бути горизонтальна відстань центру платформи від центру основи при незмінних L та R . Таким чином, r безпосередньо зменшує горизонтальну досяжність (R_{max}).

Отже, для максимального об'єму робочого простору необхідно:

1. Максимізувати L (довжину кінематичних ланок).
2. Максимізувати R (радіус кругової напрямної).
3. Мінімізувати r (радіус рухомої платформи), враховуючи при цьому необхідність розміщення корисного навантаження.

Також при виборі параметрів необхідно уникати особливих положень (сингулярностей), які можуть призвести до втрати керованості. Це вимагає складного кінематичного аналізу для перевірки положень в межах всього робочого простору.

РОЗДІЛ 4

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ОБГРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Загальні вихідні дані

Метою даної випускної кваліфікаційної роботи є дослідження і вдосконалення верстата з паралельною кінематикою для збільшення його функціональних можливостей. Рух виконавчого органу здійснюється за допомогою кругових напрямних, що розширює його можливості та загальну продуктивність. Завдяки круговим напрямним з'являється можливість обробити заготовку з різних боків без необхідності переносити її на інші верстати, що збільшує як продуктивність так і якість обробки. 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.	Програма виробництва деталей	шт./рік	10000	10000
2.	Штучний час обробки деталі	хв.	2,0	1,2
3.	Площа, яку займає верстат	м ²	7,03	5,4
4.	Встановлена потужність електродвигунів верстата	кВт	1,5	1,2
6.	Категорія ремонтної складності: механічної/електричної частин	УРО	13/7	4/12
7.	Розряд роботи: - верстатника - наладчика	розряд	4	4
		розряд	5	6
8.	Оптова ціна верстата, який модернізується	грн.	121500	
9.	Балансова вартість верстата 6Б75ВФ1	грн.	153860	-

4.2 Визначення витрат на підготовку виробництва

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

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

де $H_{ор}$ – кількість найменувань оригінальних деталей, які входять до конструкції модернізованих частин верстата (кільце для кругових напрямних, станина, повзуни), $H_{ор}=5$ шт.;

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

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

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

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

H_{ϵ} – накладні витрати, грн. (визначаються в процентах від основної заробітної плати конструктора).

$$B_{нк} = 5 \cdot 19 \cdot 93,75 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) + 5 \cdot 19 \cdot 93,75 \cdot \frac{45}{100} = 15960,0 \text{ грн.}$$

4.2.2 Витрати на технологічну підготовку виробництва інструменту:

$$B_m = H_{ор} \cdot T_{тех} \cdot Z_{сг}^м \cdot \left(1 + \frac{\kappa_{\partial}}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_c}{100}\right) + H_{\epsilon}, \quad (4.2)$$

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

$Z_{сг}^м$ – середньогодинна заробітна плата технолога, грн./год.

$$B_m = 5 \cdot 21 \cdot 91,875 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) + 5 \cdot 21 \cdot 91,875 \cdot \frac{55}{100} = 18256,0 \text{ грн.}$$

4.3. Визначення витрат на проведення модернізації верстата

Після визначення трудомісткості модернізації розраховуємо:

а) основну заробітну плату виробничих робітників:

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

де n – кількість i -тих видів робіт;

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

Так, основна заробітна плата виробничих робітників на механічних роботах:

$$Z_{op} = 4,6 \cdot 92,015 = 423,27 \text{ грн.}$$

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:

$$B_o = 423,27 \cdot \frac{352}{100} = 1489,91 \text{ грн.}$$

в) цехові витрати:

$$K_{цех} = \sum_{i=1}^n Z_{opi} \cdot \frac{\Pi_{цпи}}{100}, \quad (4.5)$$

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

Для механічних робіт:

$$K_{\text{цех}} = 423,27 \cdot \frac{232}{100} = 981,98 \text{ грн.}$$

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

Таблиця 4.2

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

Види робіт	Трудовісткість робіт н-год	Середній розряд	Середньогодинна тарифна ставка робітників, грн/год	Основна заробітна плата робітників $З_{\text{ор}}$, грн.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання, B_o , грн.		Загальноцехові витрати $K_{\text{цех}}$, грн.	
					%	грн.	%	грн.
Ливарні	5,2	3	102,716	534,12	350	1869,43	242	1292,58
Механічні	4,6	4	92,015	423,27	352	1489,91	232	981,98
Слюсарсько- складальні	2,3	4	92,015	211,63	210	444,43	242	512,16
Всього	12,1	-	-	1169,03	-	3803,77	-	2786,72

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

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

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

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_{zv} – зворотні відходи, які реалізуються (віднімаються), грн.;

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

Z_{dr} – допоміжна заробітна плата виробничих робітників, грн.;

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

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

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

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

Таблиця 4.3

Склад матеріальних витрат на модернізацію верстата

№ п/п	Матеріали, покупні напівфабрикати та комплектуючі вироби	Оди- ниця	Витрати (шт., кг)	Ціна, грн.	Витрати на виріб, грн.
Основні матеріали					
1.	Сталь 45	кг	76,0	37,60	2857,60
	Всього основних матеріалів				2857,60
Покупні комплектуючі вироби					
1.	Повзуни	шт.	6	1500,0	9000,00
2.	Метизи	кг	1,2	154	184,80
3.	Кругові напрямні	шт.	1	7000,0	7000,00
4.	Штанги	шт.	6	2400,0	14400,00
	Всього покупних комплектуючих				30584,80

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	2857,60
2.	Матеріали допоміжні	M_d	4% від M_o	114,30
3.	Покупні напівфабрикати, комплектуючі вироби та послуги підприємств	$П_n$	табл. 4.3	30584,80
4.	Зворотні відходи	$-B_{зв}$	5% від M_o	171,46
5.	Транспортно-заготівельні витрати	T_b	6% від $(M_o + M_d)$	1342,27
6.	Паливо та енергія на технологічні цілі	$П_{тех}, E_{тех}$	78,8% від $З_{ор}$	921,19
7.	Всього матеріальні витрати			35648,71
8.	Основна заробітна плата виробничих робітників	$З_{ор}$	табл. 4.2	1169,03
9.	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	$З_{др}$	10% від $З_{ор}$	116,90
10.	Відрахування на соціальні заходи	$B_{сс}$	22% від $(З_{ор} + З_{др})$	282,90
11.	Відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення	$З_{уп}$	8,5% від $З_{ор}$	99,37
12.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання	B_o	табл. 4.2	3803,77
13.	Цехові витрати	$K_{цех}$	табл. 4.2	2786,72
14.	Загальнозаводські витрати	$K_{зав}$	185% від $З_{ор}$	2162,70
15.	Інші виробничі витрати	$B_{ін}$	3,4% від $З_{ор}$	39,75
16.	Виробнича собівартість	$C_{вир}$	$\Sigma(7 \div 15)$	46110,0

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).

$$\Phi_{\text{бал.б}} = 121500 \cdot (1 + 0,08 + 0,06 + 0,05) = 144585 \text{ грн.}$$

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.

$$\Phi_{\text{бал.пр}} = 144585 - 0 + 46110 = 190695 \text{ грн.}$$

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:

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

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

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

В базовому варіанті:

$$B_{3б} = 92,015 \cdot \frac{2,0}{60} \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) = 4,116 \text{ грн.};$$

В проектному варіанті:

$$B_{3п} = 92,015 \cdot \frac{1,2}{60} \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) = 1,664 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію силову:

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

де N_b – встановлена потужність електродвигунів силового вузла, кВт;

K_o – коефіцієнт одночасної роботи моторів ($K_o=0,65\dots0,8$);

K_N – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за потужністю (для свердлильних верстатів $K_N=0,5\dots0,6$);

K_d – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів верстата за часом ($K_d=0,3\dots0,5$);

η_c – середній коефіцієнт корисної дії електродвигунів ($\eta_c=0,86\dots0,9$);

η_m – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі підприємства ($\eta_m=0,92\dots0,96$);

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

$$B_{\text{ел}}^{\text{баз}} = \frac{1,5 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 0,3}{0,87 \cdot 0,95} \cdot \frac{2,0}{60} \cdot 18,10 = 0,138 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{ел}}^{\text{пр}} = \frac{1,2 \cdot 0,7 \cdot 0,7 \cdot 0,4}{0,87 \cdot 0,95} \cdot \frac{1,2}{60} \cdot 18,10 = 0,105 \text{ грн.}$$

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 $K_{\text{п}} = 1,0$).

$$B_{\text{дм}}^{\text{баз}} = \frac{79,5 \cdot 13,0 \cdot 2,0}{60 \cdot 100} \cdot 1,0 = 0,345 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{дм}}^{\text{пр}} = \frac{79,5 \cdot 3,0 \cdot 1,2}{60 \cdot 100} \cdot 1,0 = 0,047 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт обладнання:

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

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.).

$$B_{\text{р}}^{\text{баз}} = \frac{13 \cdot 980 + 7 \cdot 750}{3950} \cdot \frac{2,0}{60} = 0,152 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{р}}^{\text{пр}} = \frac{3 \cdot 980 + 12 \cdot 750}{3950} \cdot \frac{1,2}{60} = 0,060 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання приміщення:

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

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

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

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

$$B_{\text{уп}}^{\text{баз}} = \frac{7,03 \cdot 2,5 \cdot 2,0}{3950 \cdot 60} \cdot 780 = 0,062 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{уп}}^{\text{пр}} = \frac{5,4 \cdot 3,0 \cdot 1,2}{3950 \cdot 60} \cdot 780 = 0,034 \text{ грн.}$$

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.

$$B_a^{\text{б}} = \frac{153860 \cdot 20 \cdot 2,0}{3950 \cdot 60 \cdot 100} = 0,260 \text{ грн.},$$

$$B_a^{\text{пр}} = \frac{190695 \cdot 20 \cdot 1,2}{3950 \cdot 60 \cdot 100} = 0,193 \text{ грн.}$$

Витрати на налагодження верстата:

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

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

A – кількість налагоджень за рік;

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

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

$$B_n^{\text{баз}} = 104,283 \cdot (1 + 0,10) \cdot (1 + 0,22) \cdot \frac{30 \cdot 12}{60 \cdot 10000} = 0,084 \text{ грн.}$$

$$B_n^{\text{пр}} = 122,688 \cdot (1 + 0,10) \cdot (1 + 0,22) \cdot \frac{35 \cdot 12}{60 \cdot 10000} = 0,116 \text{ грн.}$$

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	4,116	1,664
2.	Силова електроенергія	$B_{\text{ел}}$	0,138	0,105
3.	Допоміжні матеріали	$B_{\text{дм}}$	0,345	0,047
4.	Ремонт обладнання	B_p	0,152	0,060
5.	Утримання приміщення	$B_{\text{уп}}$	0,062	0,034
6.	Амортизація обладнання	B_a	0,260	0,193
7.	Налагодження обладнання	B_n	0,084	0,116
Загальна сума		B_e	5,157	2,219

4.5 Розрахунок показників економічної ефективності

Річний економічний ефект від проведеної модернізації розрахуємо за формулою:

$$E_p = (B_e^{\text{баз}} - B_e^{\text{пр}}) \cdot N_{\partial} - E_n \cdot K_{\partial}, \quad (4.17)$$

де N_{∂} – річна програма випуску деталей на модернізованому верстаті, шт.;

K_{∂} – додаткові капітальні витрати, грн.

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

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

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

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

Потребу в обладнанні визначаємо за формулою:

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

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

Так потреба в проектному варіанті:

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

$$K_{\text{д}} = 15960 + 18256 + 190695 \cdot 1 - 153860 \cdot 1 = 71051 \text{ грн.}$$

$$E_p = (5,157 - 2,219) \cdot 10000 - 0,16 \cdot 71051 = 18000 \text{ грн.}$$

Строк окупності додаткових капітальних вкладень:

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

$$T_{ок} = \frac{71051}{(5,157 - 2,219) \cdot 10000} = 2,4 \text{ роки}$$

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.	2,0	1,2	-40,0
4.	Оптова ціна верстата, який модернізується	грн.	121500	—	—
5.	Виробнича собівартість модернізації	грн.	—	46110	—
7.	Балансова вартість порівнюваних верстатів	грн.	153860	190695	+23,9
8.	Собівартість одиниці обробки	грн.	5,157	2,219	-57,0
9.	Додаткові капітальні витрати	грн.	—	71051	—
	у тому числі на конструкторську та технологічну підготовку виробництва	грн.	—	34216	—
10.	Строк окупності додаткових капітальних витрат	років	—	2,4	—
11.	Річний економічний ефект	грн.	—	18000	—

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі для освітнього ступеня «магістр» вирішено актуальне науково-прикладне завдання щодо дослідження функціональних можливостей багатокоординатного верстата з паралельною кінематикою. На основі проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

- Аналіз сучасного стану технології. Встановлено, що обладнання з паралельною кінематикою (триподи, гексаподи) має суттєві переваги над традиційними схемами послідовної структури, зокрема вищу жорсткість, точність позиціонування та кращі динамічні характеристики завдяки розподілу навантаження та меншій інерційності рухомих частин. Разом з тим, існуючі схеми, такі як класична платформа Стюарта, мають обмеження щодо кутів повороту вихідної ланки, що вимагає вдосконалення кінематичної архітектури.

- Розробка компоновки та кінематичний аналіз. Запропоновано нову компоновку верстата з шістьма ступенями вільності, що складається з нерухомої кругової напрямної, шести повзунів та кінематичних ланок постійної довжини. Вирішено зворотню задачу кінематики для даної структури геометричним методом, що дозволяє однозначно визначати кутові координати повзунів (φ_i) для забезпечення необхідного просторового положення та орієнтації виконавчого органу. Особливістю розробленої схеми є можливість забезпечення повного обертання платформи навколо вертикальної осі.

- Дослідження робочого простору. Визначено, що робочий простір запропонованого верстата має форму тіла обертання навколо осі Z . За допомогою методу сканування побудовано переріз робочої зони. Встановлено, що для максимізації об'єму робочого простору необхідно збільшувати довжину кінематичних ланок (L) та радіус напрямної (R), при цьому мінімізуючи радіус рухомої платформи (r).

- Аналіз рухів виконавчого органу. Побудовано графічні залежності зміни узагальнених координат (кутів повзунів) при переміщенні платформи вздовж осей координат X , Y , Z та по круговій траєкторії. Результати моделювання підтвердили, що для реалізації лінійних переміщень необхідна складна нелінійна та координована зміна положення всіх шести приводів, яка є унікальною для кожної траєкторії. Отримані дані підтверджують працездатність запропонованої математичної моделі керування верстатом.

- В роботі проведено економічне обґрунтування впровадження результатів досліджень при експлуатації гексаподів. Використання верстата запропонованої компоновки дозволить отримати у користувача річний економічний ефект у розмірі 18000 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. 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

5. 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.

6. 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.

7. 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.
8. 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.
9. Валявський, І. А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою : навч. посіб. / І. А. Валявський, О. В. Лисенко, І. А. Лисенко ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 281 с.
10. Костюк В. І. Робототехніка / В. І. Костюк, Г. О. Спину, Л. С. Ямпольський. – К. : Вища школа, 1994. – 446 с.
11. Кириченко А. М. Вибір компоновки багатокоординатного верстата паралельної структури з ланками змінної довжини / А. М. Кириченко, О. В. Шелепко // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2015. – Вип. 28. – С. 3-8
12. Кириченко А. М. Вплив діапазону кутів повороту шарнірних опор на об'єм робочого простору верстата-гексапода / А. М. Кириченко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки». – Чернігів : ЧДТУ, 2011. – № 65. – С. 56-63.
13. Кириченко А. М. Геометрична побудова робочого простору обладнання з механізмами паралельної структури / А. М. Кириченко, В. Б. Струтинський // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград : КНТУ, 2011. – Вип. 24. – С. 216-222

14. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою : навчальний посібник для ВНЗ / [В. А. Крижанівський, Ю. М. Кузнєцов, І. А. Валявський, Р. А. Складаров]; під ред. Ю. М. Кузнєцова. – Кіровоград, 2004. – 449 с.

15. Кропівний О. О., Гречка А. І., Кириченко А. М., Щербина К. К. Кінематичні залежності двокоординатного механізму паралельної структури з поворотним кріпленням шарнірів штанг змінної довжини. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2022. Вип. 5(2). С. 22-30

16. Кузнєцов Ю. М. Сучасний стан, прогнозування і перспективи розвитку верстатів з паралельною кінематикою / Ю. М. Кузнєцов, В. А. Крижанівський, Р. А. Складаров // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : (зб. наукових праць). – ЖДТУ, 2005. – Вип. 1. – С. 320–333.

17. Кузнєцов Ю. М. Візуалізація формоутворюючих рухів механізмами паралельної структури в верстатах нових компоновок / Ю. М. Кузнєцов, Д. О. Дмитрієв // Вісник ТДТУ. – 2008. – № 1.

18. 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. наукових праць НТУ «ХП»). – 2008. – Вип. 1.

19. 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.

20. Павленко І. І. Рухові характеристики верстатів з паралельною кінематикою / І. І. Павленко, І. А. Валявський // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград : КНТУ. – 2008. – Вип. 21. – С. 128–134. – (Збірник наук. праць).

21. Павленко І.І. Дослідження впливу конструктивних параметрів механізму паралельної структури на функціональні можливості верстата з

паралельною кінематикою. / І. І. Павленко, І. А. Валявський // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. – Кіровоград, 2008. – Вип. 38. – С. 284-288.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

31. Rehsteiner F. Putting parallel kinematics machines (PKM) to productive work / Rehsteiner F., Neugebauer R., Spiewak S., Wieland F. // Annals of CIRP, 48/1/1999, p. 345-350.

32. Schoppe E. Tripod Machine SKM 400 Design, Calibration and Practical Application / Schoppe E.; Pönisch A.; Maier V.; Puchtler T.; Ihlenfeldt S. // The 3rd Chemnitz Parallel Kinematics Seminar PKS 2002, Chemnitz, Germany, pp.579-594
33. Stewart, D. A Platform with Six Degrees of Freedom, Proc. Inst. Mech. Eng. London, Vol 180, 1965, pp. 371-386.
34. Tlustý J. Fundamental comparison of the use of serial and parallel kinematics for machine tools / Tlustý J., Ziegert J., Ridgeway S. // Annals of CIRP, 48/1/1999, pp. 351-356
35. Treib T. Parallel Kinematic Machines in Practice, The 3rd Chemnitz Parallel Kinematics Seminar PKS 2002, Chemnitz, Germany, pp.63-66
36. Weck M., Staimer D. Parallel Kinematic Machines Tools - Current State and Future Potentials, Annals of CIRP, 51/2/2002, p.671-683