

Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра «Машинобудування, мехатроніки і робототехніки»

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти
на тему:
**«Розробка кінематичної ланки змінної
довжини верстата-гексапода»**

КРБ.ПМ.24.85.000.00.00.00 КР

Виконав здобувач вищої освіти 3ск
курсу групи ПМ(ТМ)-21-3СК
ОПП «Комп'ютерний інжиніринг
технологій, робототехніка і 3D-друк»
спеціальності 131 «Прикладна механіка»
_____ Анатолій ПОЛЬОВИЙ

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

Рецензент:

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
РОЗДІЛ 1	Іван ВАЛЯВСЬКИЙ		
РОЗДІЛ 2	Іван ВАЛЯВСЬКИЙ		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	ВСТУП	Квітень 2024	вик.
2	РОЗДІЛ 1	Квітень 2024	вик.
3	РОЗДІЛ 2	Квітень-травень 2024	вик.
4	Висновки	Травень 2024	вик.
5	Графічна частина та оформлення	Червень 2024	вик.

Дата видачі завдання « ____ » _____ 2024 р.

Керівник роботи _____ Іван ВАЛЯВСЬКИЙ
(підпис)

Завдання прийнято до виконання « ____ » _____ 2024 р.

Здобувач вищої освіти _____ Анатолій ПОЛЬОВИЙ
(підпис)

Анотація

Анатолій ПОЛЬОВИЙ. Розробка кінематичної ланки змінної довжини верстата-гексапода. Кваліфікаційна робота для освітнього ступеня «бакалавр», прикладна механіка: ЦНТУ, м. Кропивницький, 2024. - 37 с. Матеріали презентації - 3 слайдів.

Метою роботи є розробка кінематичної ланки змінної довжини верстата-гексапода.

В роботі виконано аналіз компоновки верстатів з паралельною кінематикою типу гексапод. Розроблено конструкцію кінематичної ланки змінної довжини. Розраховано режими різання свердлильної операції - типової операції, що виконується на верстаті-гексаподі. Виконано розрахунок кульково-гвинтової передачі, яка є основним механізмом кінематичної ланки змінної довжини.

Актуальність: розроблено конструкцію кінематичної ланки змінної довжини верстата-гексапода.

Практичне значення: виконано розрахунок кульково-гвинтової передачі, яка є основою кінематичної ланки змінної довжини.

Ключові слова: паралельна кінематика, верстат-гексапод, кінематична ланка, кульково-гвинтова передача

Annotation

Anatolii POLOVYI. Development of a variable-length kinematic link of a hexapod machine. Bachelor's thesis: CNTU, 2024 - 37 p. Presentation materials 3 il.

The purpose of this work is to develop a variable-length kinematic link for a hexapod machine.

The work includes an analysis of the layout of hexapod-type parallel kinematic machines. The design of a variable-length kinematic link is developed. Cutting modes for a drilling operation — a typical operation performed on a hexapod machine — are calculated. The calculation of the ball screw drive, which is the main mechanism of the variable-length kinematic link, is carried out.

Relevance: the design of a variable-length kinematic link for a hexapod machine is developed.

Practical value: the calculation of the ball screw drive, which is the basis of the variable-length kinematic link, is performed.

Keywords: parallel kinematics, hexapod machine, kinematic link, ball screw drive.

Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра «Машинобудування, мехатроніки і робототехніки»

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до кваліфікаційної роботи на тему:**

**«Розробка кінематичної ланки змінної довжини
верстата-гексапода»**

КРБ.ПМ.24.85.000.00.00.00 ПЗ

Виконав здобувач вищої освіти 3ск
курсу групи ПМ(ТМ)-21-3СК
ОПП «Комп'ютерний інжиніринг
технологій, робототехніка і 3D-друк»
спеціальності 131 «Прикладна механіка»

_____ Анатолій ПОЛЬОВИЙ

Керівник роботи к.т.н., доцент

_____ Іван ВАЛЯВСЬКИЙ

Зміст

ВСТУП	9
1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА	11
1.1 Тенденції розвитку сучасного верстатобудування	11
1.2 Опис конструкції верстата-гексапода	16
2 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	19
2.1 Розробка конструкції кінематичної ланки змінної довжини	19
2.2 Розрахунок режимів різання для свердління.....	20
2.3 Розрахунок кульково-гвинтової передачі.....	25
ВИСНОВКИ	34
Література	35

					КРБ.ПМ.24.85.000.00.00.00 ПЗ		
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
Розроб.		Польовий А.О.			<i>Літера</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушіє</i>
Перевірів		Валявський І.А.			8	37	
Реценз.					Пояснювальна записка ЦНТУ гр. ПМ(ТМ)-21-ЗСК		
Н. контр.							
Затв.		Гречка А.І.					

ВСТУП

Гостра конкурентна боротьба за ринки збуту продукції вимагає розробки новітніх комплексних підходів до вирішення техніко-економічних та організаційних завдань управління виробничими потужностями.

Конкурентоспроможність товарів на внутрішньому та зовнішньому ринках, а також ефективність діяльності підприємств у всіх галузях промисловості визначається рівнем використання високих технологій у виробничих процесах.

Одним з першочергових завдань підвищення ефективності виробництва є розвиток науково-технічного прогресу шляхом раціонального використання прогресивних ідей, винаходів, концепцій та результатів наукових досліджень. Перед сучасним машинобудуванням постають дві актуальні проблеми: автоматизація виробництва, включно зі створенням гнучких виробничих систем; підвищення точності, продуктивності, надійності та довговічності технологічного обладнання при розширенні його функціональних можливостей.

Основним результатом розв'язання цих проблем є впровадження надшвидкісної обробки деталей за одну операцію на високоефективному технологічному обладнанні. Зважаючи на те, що технічні стандарти у верстатобудуванні вже досить високі, постає питання: де знайти невикористаний потенціал для подальшого вдосконалення технологічного обладнання?

Розвиток верстатобудування свідчить, що час від часу з'являлися нові окремі рішення щодо приводів, перетворюючих механізмів, виконавчих органів, вимірювальних систем та систем керування, на основі яких формувалася вся технологічна система. Якщо один з компонентів системи ставав більш досконалим, то необхідно було оперативно вдосконалювати інші компоненти для відповідності поставленим завданням.

					<i>КРБ.ПМ.24.85.000.00.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						9
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Виділяють такі концепції побудови нового покоління технологічного обладнання:

– Багатофункціональність – використання механізмів, які можуть виконувати транспортні (переміщення, переорієнтація та встановлення заготовок), допоміжні (фіксація/розфіксація, затиск/розтиск, позиціонування при поступальних і обертових рухах) і технологічні (обробка, складання, випробування та вимірювання) операції одним виконавчим органом.

– Багатопотоковість – використання механізмів, які дозволяють раціонально перерозподіляти навантаження між кількома механізмами та їх елементами паралельними шляхами, забезпечуючи мінімізацію маси рухомих елементів та зменшення енергоспоживання на їх переміщення.

Цим критеріям повністю відповідають механізми паралельної структури, основні властивості яких:

– Раціоналізація перерозподілу рухів та енергопотоків завдяки їх передачі паралельними шляхами.

– Використання кінематичних ланок у вигляді стрижневої просторової ферми, елементи якої працюють лише на розтягування/стиснення без згинних напружень, що підвищує жорсткість системи.

– Мінімізація мас рухомих елементів, кількості з'єднань компонентів та їхніх ланок забезпечує підвищення точності позиціонування виконавчих органів та поліпшення динамічних характеристик.

– Геометрична симетрія компонування, модульна побудова та розміщення приводів на нерухомій несучій системі зменшують витрати на виробництво та впровадження нового обладнання.

					<i>КРБ.ПМ.24.85.000.00.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						10
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

1.1. Тенденції розвитку сучасного верстатобудування

Стрімкий розвиток суспільства спонукає до постійного вдосконалення, зокрема шляхом інтеграції новітніх технологій, що забезпечує гідну конкурентоспроможність та якість. Це особливо важливо в технічно-інженерній сфері. Справжня революція відбулася з появою спочатку простих механізмів, потім машин, а тепер і складних роботизованих систем. Все це робиться для зменшення, а в деяких випадках і повного уникнення важкої фізичної праці та шкідливих чинників, які негативно впливають на людину.

Одним з таких нововведень стала автоматизація виробництва, що відкриває нові шляхи для модернізації та створення машинобудівної техніки, а також зменшення присутності та впливу людини на виробництві, особливо в тих видах діяльності, де робота неможлива через специфічні умови.

Однак, необхідно враховувати всі ризики, які можуть виникнути при автоматизації виробництва, наприклад, соціально-економічний ефект, що включає наявність іншої роботи для людей та гідну оплату праці в умовах такої модернізації.

Розробка «розумних» машин і виробничих систем дозволяє адаптуватися до відповідних викликів та обирати оптимальні умови діяльності. Таким чином, з прискоренням розвитку в сучасних умовах та підвищенням конкурентоспроможності, виробники стикаються з дедалі складнішими завданнями, проте вони можуть бути вирішені за допомогою максимально гнучких, програмно-керованих систем.

Основні напрямки вдосконалення технологічного обладнання спрямовані на:

– підвищення функціональних та технологічних можливостей обладнання, спрощення програмування обробки за рахунок автоматизації,

					<i>КРБ.ПМ.24.85.000.00.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поступове зниження витрат енергії та матеріалів, а також покращення та розширення сервісного обслуговування;

- збільшення тривалості експлуатації та підвищення надійності технологічного обладнання;
- впровадження інтелектуальних систем у виробничі процеси;
- підвищення продуктивності обробки (збільшення обсягів виробленої продукції за одиницю часу);
- покращення якості продукції (поліпшення характеристик, підвищення точності тощо);
- забезпечення безпеки й комфортності праці операторів, спрощення та покращення зручності обслуговування технологічного устаткування, врахування ергономічних вимог та зменшення шкідливого впливу на навколишнє середовище.

Враховуючи дослідження, основною темою якого є проблеми вдосконалення та створення технологічного обладнання, а також проведений аналіз, можна зробити такі висновки:

- підвищення функціональних можливостей може бути досягнуто шляхом покращення таких аспектів:
 - технологічна та експлуатаційна надійність, безвідмовність виконання заданого циклу та робота під навантаженням;
 - зносостійкість та збереження працездатності деталей, вузлів та всієї машини протягом технологічного ресурсу;
 - скорочення часу на виявлення та усунення поломок, збільшення періодів між ремонтами.
- Збільшення продуктивності обробки можна досягти шляхом: концентрації та інтеграції операцій, розширення діапазонів регулювання швидкостей головного руху та подачі, стабілізації подачі та точності автоматичного циклу, підвищення геометричної та кінематичної точності силових вузлів на холостому ході, підвищення надійності позиціонування, збільшення жорсткості виконавчих органів.

					КРБ.ПМ.24.85.000.00.00.00 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– використання агрегатно-модульного принципу побудови, що забезпечує високий рівень надійності функціонування та якості виготовлення, застосування САПР, широкий вибір деталей та вузлів. Такий підхід проектування зменшує витрати на матеріали, час розробки, виробництво, експлуатацію та обслуговування;

– поєднання в одному технологічному обладнанні різноманітних методів обробки, таких як зварювання, складання, лезова, абразивна, оптична обробка, випробування та контроль, електрофізикохімічна обробка, обробка за нанотехнологіями, лазерна та інші методи, потребує спеціалізованої структури обладнання. Якщо деталь або інструмент матимуть відповідні ступені свободи, то можна реалізувати різні схеми обробки. Таке поєднання дозволить зменшити кількість робітників, необхідного обладнання та виробничої площі;

– застосування принципів інтеграції та концентрації обробки. Інтеграція забезпечує меншу продуктивність, але вищу гнучкість обладнання. Концентрація обробки покращує продуктивність виготовлення одиниці продукції. Чим більше технологічних переходів виконується за одну установку деталі, тим вищий рівень гнучкості технологічного обладнання;

– підвищення точності обробки досягається за рахунок підвищення точності виготовлення елементів обладнання, налаштування інструментів, зменшення похибки позиціонування виконавчих органів та комплексної обробки за одну установку. На менш точному обладнанні точність забезпечується використанням адаптивних систем ЧПК. Необхідно знижувати тепловиділення, компенсувати теплові похибки за допомогою систем та датчиків у критичних зонах, враховувати вплив підвищених температур на геометричну точність. Точність та швидкість вимірювання деталей можна поліпшити безконтактними лазерними системами відкритої архітектури, які дозволяють контролювати розміри, компенсувати знос інструменту, зберігати програми управління;

– підвищення продуктивності обробки досягається скороченням часу шляхом збільшення швидкості різання до 10 000 м/хв, робочих подач до 30 м/хв

					КРБ.ПМ.24.85.000.00.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

та прискорень виконавчих органів до (3÷5)g. Сучасне обладнання досягає: при торцевому фрезеруванні - понад 400 м/хв, свердлінні - 1500 м/хв, нарізанні різьб - 300 м/хв, шліфуванні - 250 м/с;

– високі динамічні характеристики обладнання необхідні для зменшення вібрацій, що виникають у вузлах через високі швидкості робочих рухів та прискорення виконавчих органів. Динамічний розрахунок тримальних компонентів, таких як портали, стійки тощо, дозволяє на стадії проектування обрати раціональну конструкцію. Заміна литих чавунних деталей на зварні сталеві більш доцільна для підвищення жорсткості.

У світі активно ведуться пошуки неметалічного конструкційного матеріалу, який зміг би задовольнити всі вимоги для виготовлення несучих деталей технологічного обладнання. Наприклад, досвід швейцарської компанії «Георг Фішер» показує, що використання станини з попередньо напруженого залізобетону на токарному обладнанні NDM-16 дозволило значно знизити термічні деформації та вібрації.

Зовнішнім проявом коливальних процесів в обладнанні є інтенсивний шум, спричинений вібрацією стінок несучих деталей. Для зменшення цього впливу на внутрішні поверхні корпусних деталей рекомендується наносити шар полімерних матеріалів з високими дисипативними властивостями. Також ведуться роботи зі створення засобів віброгасіння з використанням мікроелектроніки:

– створення та впровадження діагностичних систем у пристрої ЧПК, здатних не лише сигналізувати про відмови, але й керувати процесами у вузлах та механізмах для усунення відмов. Це може дозволити прибрати більшість додаткових пристроїв та досягти високої ефективності високошвидкісної обробки;

– одним з основних способів зниження теплових деформацій є заміна термосиметричної конструкції на стрижневі ферми замість консольних шпindelьних стійок. У приводах від двигунів постійного струму зниження температури відбувається за рахунок переходу на безколекторні двигуни

					<i>КРБ.ПМ.24.85.000.00.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

змінного струму. Також розробляються системи компенсації теплових деформацій через зміну теплових потоків та введення корекцій у програмі;

– контроль якості з перериванням обробки може займати більше часу, ніж сама обробка, і враховує лише результат, виключаючи активний вплив вимірювань на технологічний процес. Тому високошвидкісна обробка потребує ефективнішого безперервного контролю якості, наприклад, із застосуванням лазерної техніки;

– для забезпечення безпеки при значному виході стружки компанія «Форест-Ліне» запропонувала компоновання обладнання з вертикальним розташуванням робочого столу, що забезпечує надійне відведення стружки. Зона різання надійно закрита непробивною камерою, а контроль здійснюється дистанційно через спеціальну систему.

Варто зазначити, що зміни відбуваються не лише в удосконаленні конструкції та характеристик технологічного обладнання. Першочергово забезпечується клієнтоорієнтованість, тобто впровадження індивідуальних вимог клієнтів залежно від їхнього фінансового стану. Удосконалення конструкцій, наближення характеристик до найвищого рівня, зменшення вартості, термінів проектування, забезпечення індивідуальних вимог клієнта тощо значною мірою підвищує конкурентоспроможність, на що впливає саме впровадження концепції агрегатно-модульного проектування, використання обчислювальної техніки, автоматизованого проектування та створення нестандартного комплектування технологічного обладнання.

Основним напрямком автоматизації багатомоделіного серійного виробництва є розробка програмно-керованого швидкопереналагоджуваного технологічного обладнання на основі паралельної структури. Це не просто вдосконалення існуючого обладнання, а створення зовсім нового типу, призначеного для виконання практично всіх технологічних операцій (обробки, випробувань, складання та вимірювання деталей).

					<i>КРБ.ПМ.24.85.000.00.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Технологічне обладнання з паралельною кінематикою завдяки своїм унікальним властивостям здатне вирішувати значну частину завдань сучасного багатоміноменклатурного серійного виробництва:

- блокова конструкція обладнання;
- геометрична однорідність конструкції;
- висока адаптивність виробництва та швидкість переналагодження при зміні номенклатури виробів;
- досягнення надвисоких швидкостей переміщень рухомих виконавчих органів;
- інтегровані жорсткі кінематичні ланцюги;
- висока точність позиціонування і динамічна стабільність.

1.2 Опис конструкції верстата-гексапода

В основі побудови верстатів-гексаподів механізм поступального переміщення, який складається з прецизійної кульково-гвинтової передачі, електродвигуна, вбудованих датчиків швидкості та положення, а також електромагнітних пристроїв для гальмування.

Розглянемо структуру гексапода, що містить чотири основні підсистеми [1]:

1. Платформа або корпусна конструкція з інтегрованим робочим столом для встановлення заготовок.

2. Шість регульованих штанг з індивідуальними приводами, які можуть рухатися в осьовому напрямку. Один кінець штанги з'єднаний з нижньою платформою, а інший – з рухомою інструментальною головкою або інструментальним блоком.

3. Шпиндельний блок або інструментальна головка з окремим двигуном для головного руху.

					КРБ.ПМ.24.85.000.00.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

4. Комп'ютерна техніка для одночасного керування всіма координатами. Додатково необхідні системи керування частотою обертання шпинделя, подачею змащувально-охолоджувальної рідини та допоміжними функціями.

Верстат-гексапод (рисунок 1.1) зазвичай складається з рухомого виконавчого органу ABC та нерухомої несучої системи KNM, які з'єднані шістьма кінематичними ланцюгами, кожен з яких має власний привід. Це дозволяє виконавчому органу здійснювати шість координатних переміщень.

Привід лінійних переміщень потрібен для зміни відстані між опорними шарнірами. Кінематична ланка одним кінцем кріпиться до виконавчого органу, а другим – до несучої системи. Схожа система має у складі два елементи (рухомий та нерухомий), які з'єднані між собою кінематичними ланками змінної довжини.

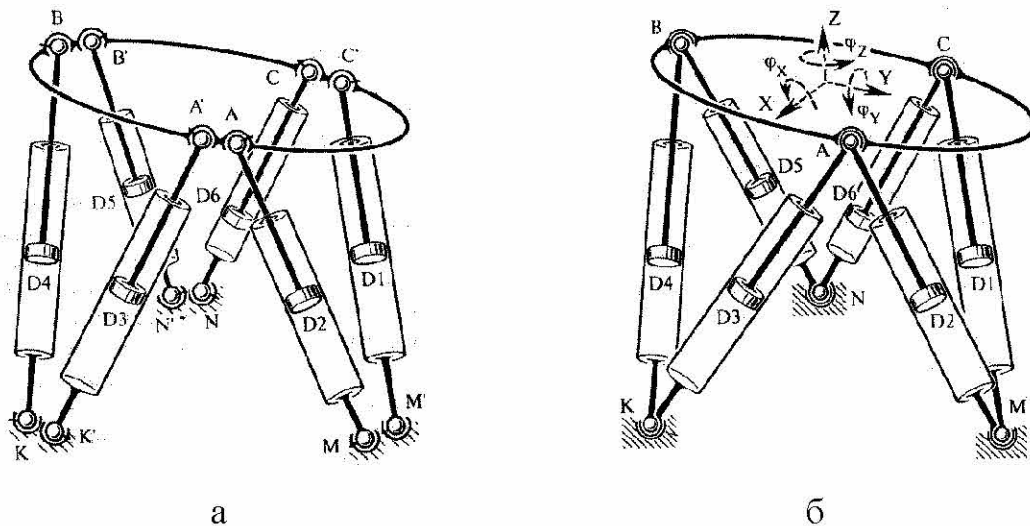


Рисунок 1.1 – Схема верстата-гексапода

Дані кінематичні схеми верстатів-гексаподів, зображені на рисунку 1.1, мають відмінності у конструктивному виконанні та розташуванні опорних шарнірів. Положення виконавчого органу визначається саме трьома точками (A, B, C), адже це пояснює зручність з'єднання кінематичних ланцюгів, а також простоту самої схеми управління.

Варто зазначити, що шестикоординатний механізм паралельної структури, такий як гексапод, повинен мати мінімум три з'єднання на

рухомому та нерухомому елементах. Однак, якщо значно збільшити кількість з'єднань кінематичних ланцюгів з визначеними елементами механізму, це збільшить жорсткість відповідного механізму, що у свою чергу ускладнить управління самою системою, особливо її динамічними процесами.

Положення однієї точки з'єднання визначається трьома приводами, положення другої точки – двома приводами, тож, положення третьої точки – одним приводом, це наптовхує нас на здійснення обчислень які будуть найзручнішими саме за таким кінематичним з'єднанням ланцюгів з нерухомими та рухомими елементами системи. Хоча простота обчислення наразі втрачає своє значення внаслідок використання можливостей комп'ютера, але у майбутньому цей критерій не має бути вирішальним при виборі та побудові схем механізмів паралельної структури.

Проаналізувавши наведені схеми можна прийти до висновку, що при рівних маніпуляційних можливостях, механізм (рисунок 1.1, б) конструктивно складніший, ніж механізм (рисунок 1.1, а) внаслідок використання подвійного сферичного шарніру. У механізмі (рисунок 1.1, а) опорні шарніри знаходяться на певній відстані один від одного, тому кожен з них може бути використаний у вигляді сферичного або універсального шарнірів.

					<i>КРБ.ПМ.24.85.000.00.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						18
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

2 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

2.1 Розробка конструкції кінематичної ланки змінної довжини

Механізм лінійних переміщень є головним механізмом верстата-гексапода, завдяки якому відбувається зміна положення виконавчого органу (інструменту). Верстат-гексапод містить шість механізмів лінійного переміщення, які шарнірно з'єднані одним кінцем з нерухомою станиною, іншим – з виконавчим органом. Переміщення виконавчого органу відбувається при одночасній узгодженій зміні довжин механізмів лінійних переміщень.

Конструкція кінематичної ланки змінної довжини показана на рисунку 2.1.

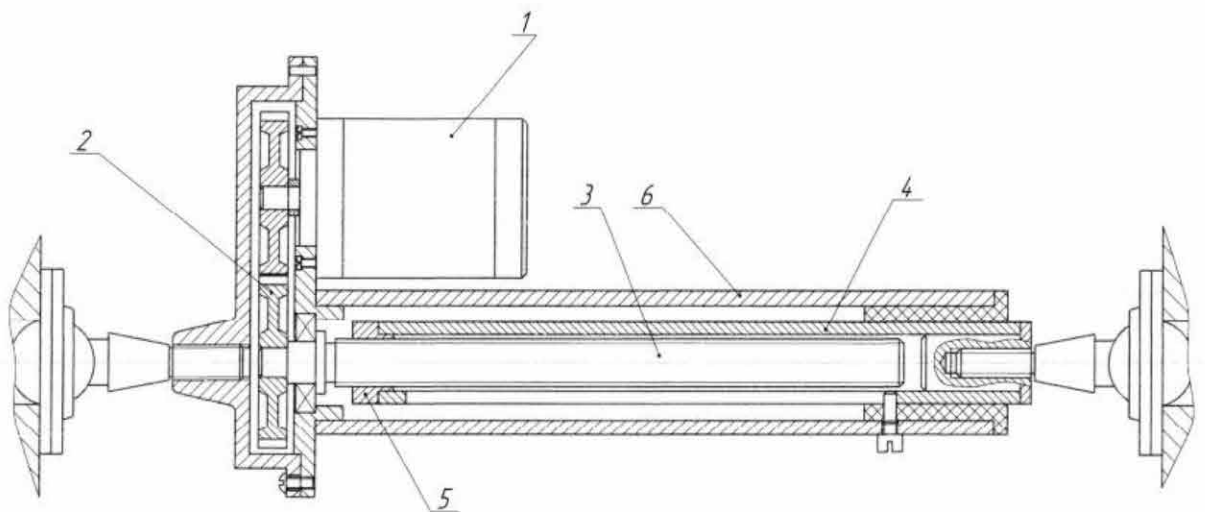


Рисунок 2.1 – Кінематична ланка змінної довжини

Механізм лінійних переміщень складається з двигуна 1, зубчастої 2 та гвинтової 3 передач, порожнистої штанги 4 з гайкою 5 і трубчастого корпусу 6.

Принцип дії механізму лінійних переміщень наступний.

Обертальний рух від двигуна 1, через зубчасту передачу 2 передається на гвинт 3, що розташований всередині довгої порожнистої штанги 4 з гайкою 5.

					КРБ.ПМ.24.85.000.00.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Під час функціонування механізму довга порожниста штанга 4 має можливість лінійного переміщення відносно нерухомого трубчастого корпусу 6.

Для визначення параметрів кульково-гвинтової передачі (як основного елемента механізму лінійного переміщення) необхідно визначити сили, які виникають в процесі роботи верстата. Визначимо режими різання для типової операції – свердильної.

2.2 Розрахунок режимів різання для свердління

Обираємо свердло та встановлюємо значення його геометричних параметрів. Свердло діаметром $D = 20$ мм з ріжучою частиною зі швидкорізальної сталі P18. Можливо застосовувати також марку P6M5.

Геометричні параметри: форма заточки – подвійна з підточкою поперечної кромки та стрічки ДПЛ:

$$2\varphi = 118^\circ;$$

$$2\varphi_0 = 70^\circ;$$

$$\psi = 40\dots60^\circ;$$

При стандартній заточці:

$$\psi = 55^\circ;$$

$$\alpha = 11^\circ;$$

За довідником приймаємо: $\omega = 24\dots32^\circ$; у стандартних свердл $D > 10$ мм для обробки конструкторської сталі: $\omega = 30^\circ$.

Приймаємо режими різання.

Подача для свердління сталі $G_B \leq 80$ мм та діаметра свердла 15-20 мм:

$$S = 0,34\dots0,43 \text{ мм/об}$$

					КРБ.ПМ.24.85.000.00.00.00 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, подача має значення:

$$S = 0,4 \text{ мм/об}$$

Потрібно перевірити прийнятну подачу по осьовій силі та допустимій міцності механізму подачі верстата. Тому визначаємо осьову силу:

$$P_0 = C_p \cdot D^g \cdot p \cdot S^y \cdot k_p$$

Приймаємо:

$G_B = 75$ кгс/мм² (свердління здійснюється інструментом зі швидкорізальної сталі)

$$C_p = 68; \quad g_p = 1; \quad y_p = 0,7.$$

Дані наведені для свердління з підточеною перемичкою.

Потрібно врахувати поправочні коефіцієнти на силу різання $k_p = k_{np}$

$$k_{np} = \left(\frac{G_B}{75} \right)^{np}; \quad n_p = 0,75;$$

$$k_{np} = \left(\frac{67}{75} \right)^{0,75} = 0,893^{0,75} = 0,91;$$

Таким чином:

$$P_0 = 9,81 \cdot 68 \cdot 20 \cdot 0,4^{0,7} \cdot 0,91 = 6392H \approx 640 \text{ кгс/мм}^2$$

					КРБ.ПМ.24.85.000.00.00.00 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При механізмі подачі даного верстата дозволена осьова сила $P_{\max} = 900$

кгс

$$P_0 < P_{\max} \quad (640 < 900)$$

Тому прийнята подача $S = 0,4$ мм/об допустима.

Призначаємо період стійкості свердла. Для свердла діаметром $D = 20$ мм при обробці конструкційної сталі свердлом зі швидкорізальної сталі рекомендований період стійкості $T = 45$ хв.

Допустимий знос свердла: $h_s = 0,4 \dots 0,8$ мм (для обробки сталі свердлами зі швидкорізальної сталі $D > 20$ мм).

Швидкість різання, допустима ріжучими властивостями свердла:

$$V_H = \frac{C_v \cdot D^{g_v}}{T \cdot m \cdot t^x \cdot V \cdot S^y \cdot v} \cdot kv$$

Приймаємо:

$G_B = 75$ кгс/мм², свердлом зі сталі P18 якщо $S > 0,2$ мм/об;

$$C_v = 9,8; \quad g_v = 0,4; \quad x_v = 0; \quad y_v = 0,5; \quad m = 0,2.$$

Ці данні приведені для свердел з подвійною заточкою та підточкою перемички.

Потрібно врахувати поправочні коефіцієнти на швидкість різання:

$$k_{Mv} = C_M \left(\frac{75}{G_B} \right)^{nv}; \quad C_M = 1; \quad nv = 0,9;$$

					КРБ.ПМ.24.85.000.00.00.00 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$k_{Mv} = 1 \cdot \left(\frac{75}{67}\right)^{0,9} = 1,10; \quad k_{Mv} = 1.$$

Відповідні значення коефіцієнта та показників формули обрані для свердла зі швидкорізальної сталі P18, тому отримуємо:

$$k_{lv} = 0,85, \text{ так як } \frac{l}{D} = \frac{80}{20} = 4;$$

$$V_N = \frac{9,8 \cdot 20^{0,4}}{45^{0,2} \cdot 0,4^{0,5}} \cdot 1,1 \cdot 1 \cdot 0,85 = 22,4 \text{ м/хв.}$$

Частота обертів шпинделя, відповідно до знайденої швидкості різання:

$$n = \frac{1000 \cdot V_N}{\pi \cdot D};$$

$$n = \frac{1000 \cdot 22,4}{3,14 \cdot 20} = 356 \text{ об/хв.}$$

Корегуємо частоту обертів шпинделя за верстатом:

$$n_D = 355 \text{ об/хв.}$$

Маємо дійсну швидкість різання:

$$V_D = \frac{\pi \cdot D \cdot n_D}{1000};$$

					КРБ.ПМ.24.85.000.00.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

$$V_{\text{д}} = \frac{3,14 \cdot 20 \cdot 355}{1000} = 22,3 \text{ м/хв } (\approx 0,37 \text{ м/с}).$$

Розраховуємо крутний момент до сил опору різання при свердлінні:

$$M = C_M \cdot D^g \cdot m \cdot S \cdot y_M \cdot k_p;$$

Приймаємо:

$$G_B = 75 \text{ кгс/мм}^2;$$

$$C_M = 0,0345;$$

$$g_M = 2;$$

$$y_M = 0,8;$$

$$k_p = k_{mp} = 0,91;$$

$$M = 9,81 \cdot 0,0345 \cdot 20^2 \cdot 0,4^{0,8} \cdot 0,91 = 59 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Визначаємо потужність, що потрібна при різанні:

$$N_{\text{різ}} = \frac{M_n}{975};$$

$$N_{\text{різ}} = \frac{5,7 \cdot 355}{975} = 2,07 \text{ кВт}.$$

					КРБ.ПМ.24.85.000.00.00.00 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3 Розрахунок кульково-гвинтової передачі

Передача гвинт-гайка кочення призначена для перетворення обертального руху в поздовжній. У порівнянні з передачею гвинт-гайка ковзання вона характеризується значно більшим ккд, меншим зносом, більшою точністю ходу [4, 5].

У гвинтових кулькових парах між робочими гвинтовими поверхнями гайки 1 і гвинта 4 розміщені сталеві кульки 3 (рисунок 2.2). Швидкість переміщення кульок відрізняється від швидкості ведучої та веденої ланок. Тому для забезпечення безперервної циркуляції кульок кінці робочої частини різьби з'єднані зворотним каналом 2.

Замкнений ланцюг кульок умовно ділять на активну частину (робочу частину нарізки) та пасивну (зворотний канал).

Активна частина кулькової гвинтової пари складає $z = 1 \dots 2.5$ витка. При більшій кількості робочих витків ккд кулькової пари знижується внаслідок збільшення тертя кульок.

При обертанні гвинта кульки, затиснуті між гвинтовими поверхнями гвинта і гайки, завдяки тертю перекочуються по них і передають рух від гвинта до гайки, що рухається поступально. Від провертання відносно своєї осі гайка утримується напрямними чи шпонкою, зафіксованою у корпусі.

Розраховуємо переміщення гайки:

$$S = \frac{\varphi \cdot p \cdot k}{2 \cdot \pi},$$

де

$p = 4$ – крок різьби;

$\varphi = 30^\circ$ – кут повороту гвинта;

$k = 1$ – число заходів різьби;

					КРБ.ПМ.24.85.000.00.00.00 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$S = \frac{30 \cdot 4 \cdot 1}{3,14 \cdot 2} = 19 \text{ мм.}$$

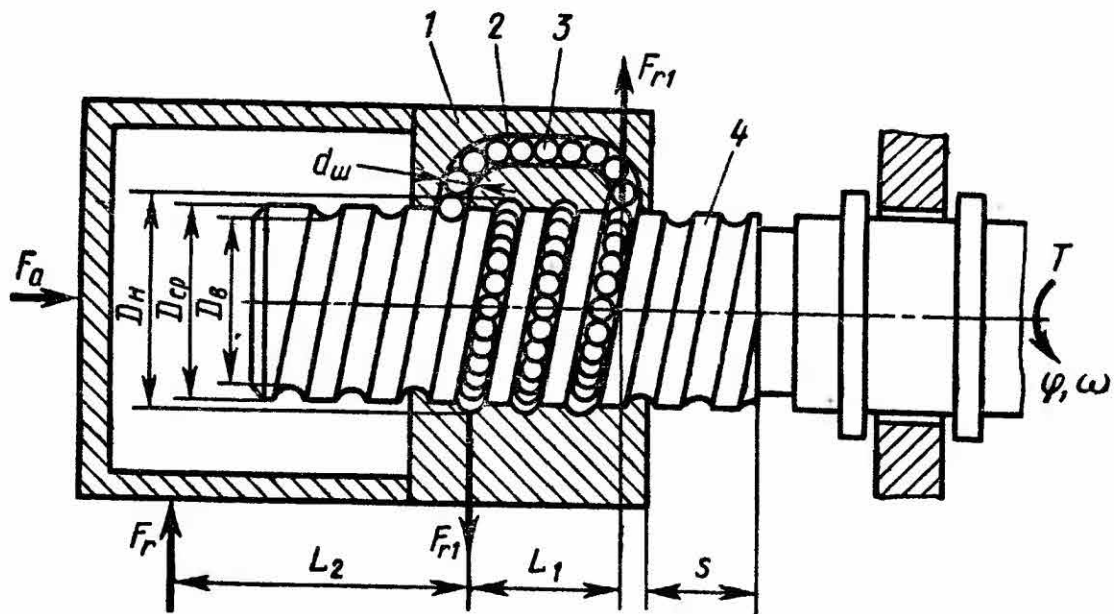


Рисунок 2.2 – Кульково-гвинтова передача

Визначаємо швидкість гайки:

$$V = \frac{\omega \cdot p \cdot k}{2 \cdot \pi}$$

$$V = \frac{30 \cdot 4 \cdot 1}{3,14 \cdot 2} = 19 \text{ м/с.}$$

Звідси маємо ККД гвинтової пари

$$\eta_{звн.} = \frac{(0,90 \dots 0,95) \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg}(\psi + p_k)},$$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

КРБ.ПМ.24.85.000.00.00.00 ПЗ

Арк.

26

де

$\psi = 1^\circ$ – кут підйому гвинтової лінії по циліндру діаметром D_{cp} ;

$p_k = \arctg \left[\frac{f_k}{(0,5 \cdot d_w)} \right]$ – приведений кут тертя;

$d_w = 2$ мм – діаметр кульки;

$f_k = 0,004 \dots 0,005$ – приведений коефіцієнт тертя, приймаємо $f_k = 0,004$;

$$p_k = \arctg \left[\frac{0,004}{(0,5 \cdot 2)} \right] = 0,22 ;$$

$$\eta_{г.в.} = \frac{0,90 \cdot \operatorname{tg} 1^\circ}{\operatorname{tg}(1 + 0,22)} = 0,73 = 73 \%$$

Кут повороту гвинта:

$$\varphi = \frac{2 \cdot \pi \cdot S}{(p \cdot k)} ;$$

$$\varphi = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 19}{(5 \cdot 1)} = 24^\circ$$

Розраховуємо кутову швидкість гвинта:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot V}{p \cdot k} ;$$

$$\omega = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 19}{(1 \cdot 5)} = 24.$$

Перераховуємо ККД гвинтової пари:

					КРБ.ПМ.24.85.000.00.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

$$\eta_{\text{зв.п.}} = \frac{(0,90 \dots 0,95) \cdot \operatorname{tg}(\psi - p_k)}{\operatorname{tg}\psi};$$

$$\eta_{\text{зв.п.}} = \frac{0,90 \cdot \operatorname{tg}(1 - 0,22)}{\operatorname{tg}1} = 70\%.$$

Далі необхідно визначити обертальний момент на ведучій ланці:

$$T = F_a \cdot \left(\frac{D_{cp}}{2} \right) \cdot \operatorname{tg}(\psi + p_k);$$

$F_a = 5000$ Н - осьова сила;

$D_{cp} = 4$ мм - діаметр окружності, на якій знаходяться центри кульок;

$$T = 5000 \cdot \left(\frac{4}{2} \right) \cdot \operatorname{tg}(1 + 0,22) = 212 \text{ Н} \cdot \text{мм};$$

Визначаємо внутрішній діаметр гвинта з умови міцності гвинта при розтягуванні (стисканні):

$$D_B \geq \sqrt{\frac{4 \cdot F_a}{\pi \cdot [\sigma]}};$$

$[\sigma] = 2,7$ МПа – допустиме навантаження при розтягуванні гвинта;

$$D_B = \sqrt{\frac{4 \cdot 5000}{3,14 \cdot 2,7}} = 15 \text{ мм}$$

					КРБ.ПМ.24.85.000.00.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Визначаємо діаметр кульок:

$$d_{III} = (0,08...0,15) \cdot D_B;$$

$$d_{III} = (0,14) \cdot 15 = 2,1 \approx 2 \text{ мм.}$$

Розраховуємо крок різьби:

$$p = \frac{d_{III}}{0,5...0,6};$$

$$p = \frac{2}{0,5} = 4 \text{ мм.}$$

Знаходимо діаметри окружності на якій знаходяться центри кульок:

$$D_{CP} = D_B + d_{III};$$

$$D_{CP} = 15 + 2 = 17 \text{ мм.}$$

Визначаємо зовнішній діаметр гвинта (рисунок 2.3):

$$D_3 = D_B + 2 \cdot d_{III} + \Delta;$$

$\Delta = 0,03...0,12$ мм – радіальний зазор, приймаємо $\Delta = 0,05$;

$$D_3 = 15 + 2 \cdot 2 + 0,05 = 19,05 \text{ мм.}$$

					КРБ.ПМ.24.85.000.00.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

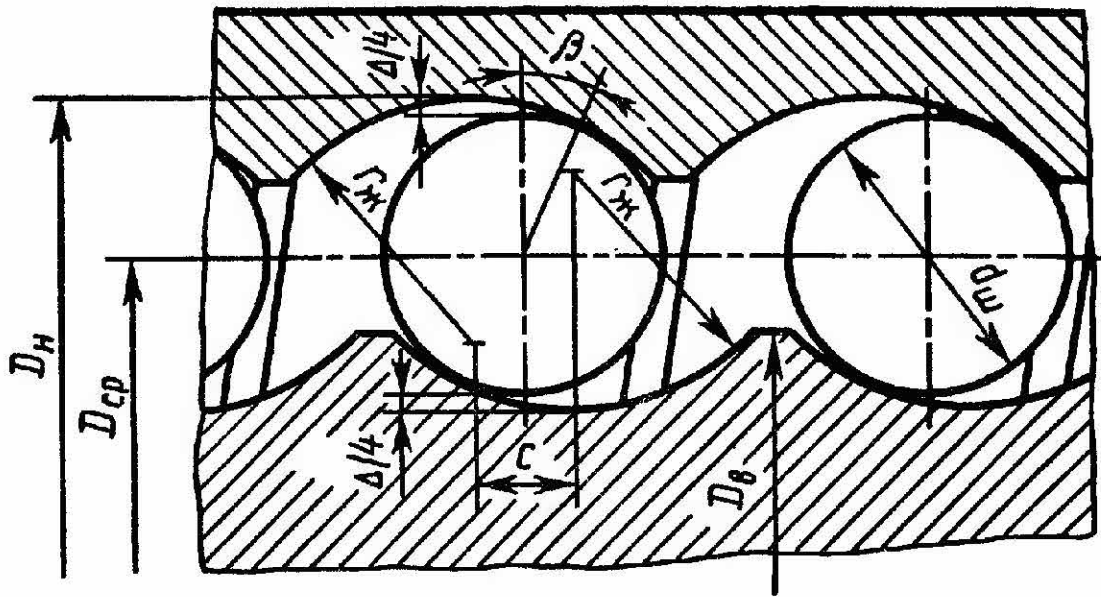


Рисунок 2.3 – Передача гвинт-гайка

Якщо кут підйому гвинтової лінії:

$$\psi = \arctg \left[\frac{p}{(\pi \cdot D_{CP})} \right];$$

$$\psi = \arctg \left[\frac{5}{(3,14 \cdot 17)} \right] = 5,3^\circ.$$

То кількість кульок в робочій зоні різьби буде:

$$z_{ш} = \frac{\pi \cdot D_{CP} \cdot z}{d_{ш}} - 1;$$

$z = 1...2,5$ - число витків в одному замкненому робочому ланцюзі.

Приймаємо $z = 1,5$;

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ.ПМ.24.85.000.00.00.00 ПЗ

Арк.

30

$$z_{III} = \frac{3,14 \cdot 17 \cdot 1,5}{2} - 1 = 40,03 \approx 40.$$

Прораховуємо радіус жолоба гвинта:

$$r_{ж} = 0,51 \cdot d_{III} - \text{для } d_{III} \leq 0,8 \text{ мм};$$

$$r_{ж} = 0,51 \cdot 2 = 1,02 \text{ мм}.$$

Визначаємо кількість замкнених робочих ланцюгів в гайці визначимо з умови:

$$P = \frac{F_a}{z_{III} \cdot d_{III}^2 \cdot \gamma \cdot u \cdot \cos \psi} \approx \frac{F_a}{z_{III} \cdot d_{III}^2 \cdot u \cdot \gamma} \leq [P]_{ст};$$

де:

P – питоме осьове навантаження, МПа;

$\gamma = 0,8$ - коефіцієнт нерівномірності розподілу навантаження між кульками;

u – кількість замкнених ланцюгів;

$[P]_{ст}$ – допустиме осьове статичне навантаження.

З довідника отримуємо $[P]_{ст} = 27$ МПа; $[\sigma]_{ст} = 7$ МПа;

$$u = \left(\frac{F_a}{z_{III} \cdot d_{III}^2 \cdot \gamma \cdot [P]_{ст}} \right);$$

$$u = \frac{5000}{40 \cdot 2^2 \cdot 0,8 \cdot 27} = 1,446 \approx 1,4;$$

Тоді,

$$P = \frac{5000}{40 \cdot 2^2 \cdot 0,8 \cdot 1,4} \approx 27 \text{ МПа};$$

					КРБ.ПМ.24.85.000.00.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

$$[P]_{CT} \geq P;$$

$$27 = 27 .$$

Обчислюємо робочу базу гайки:

$$L_1 = p \cdot z ,$$

де p – крок різьби, мм;

$$L_1 = 5 \cdot 1,5 = 7,5 \text{ мм.}$$

Визначаємо висоту гайки:

$$H = p \cdot z + (1 \dots 2) \cdot p ;$$

$$H = 5 \cdot 1,5 + 1 \cdot 5 = 12,5 \text{ мм.}$$

Потрібно обчислити зовнішній діаметр гайки при розміщенні зворотного каналу в гайці:

$$D = 1,3 \cdot D_B + 2 \cdot d_{ш} + 10 ;$$

$$D = 1,3 \cdot 15 + 2 \cdot 2 + 10 = 33,5 \text{ мм (для бронзи).}$$

Визначаємо осьовий зазор:

$$c = \sqrt{(2 \cdot r_{ж} - d_{ш}) \cdot \Delta} ;$$

					КРБ.ПМ.24.85.000.00.00.00 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де:

Δ – радіальний зазор, мм ($\Delta=0.03 \dots 0,12$). Приймаємо $\Delta=0.05$.

$$c = \sqrt{(2 \cdot 1,02 - 2) \cdot 0,05} = 0,002 \text{ мм.}$$

Тож, при дії осьової сили F_a допустиме осьове навантаження складатиме:

$$[F_a]_{CT} = [P]_{CT} \cdot z_{ш} \cdot d_{ш}^2 \cdot \gamma \cdot u;$$

$$u = 1,4;$$

$$\gamma = 0,8;$$

$$[F_a]_{CT} = 27 \cdot 40 \cdot 2^2 \cdot 0,8 \cdot 1,4 = 4838 \approx 5000 \text{ Н} \cdot \text{мм};$$

$$[F_a]_{CT} \geq F_a;$$

$$5000 = 5000 .$$

					КРБ.ПМ.24.85.000.00.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розроблено конструкцію кінематичної ланки змінної довжини верстата-гексапода. Основним механізмом кінематичної ланки змінної довжини є кульково-гвинтова передача. Для визначення параметрів цієї передачі були розраховані режими різання і визначено сили різання для свердлильної операції – типової операції, що може виконуватись на верстаті-гексаподі.

Розраховані параметри кульково-гвинтової передачі: зовнішній діаметр гвинта 19.05 мм; внутрішній діаметр різьби гвинта 15 мм; діаметр окружності, на якій знаходяться центри кульок 17 мм; діаметр кульок 2 мм. Загальний ккд розрахованої передачі 0.7.

					КРБ.ПМ.24.85.000.00.00.00 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Література

1. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою : навчальний посібник для ВНЗ. / Валявський І.А, Крижанівський В.А., Кузнецов Ю.М., Скляр Р.А.; під ред. Ю. М. Кузнецова. Кіровоград, 2004. 449 с.
2. Буц Б.Д., Приходько В.Є., Ткачов Ю.В. Розрахунок режимів різання металів: навч. посіб. Д.: РВВ ДНУ, 2005. 76 с. URL: <https://files.fti.dp.ua/wp-content/uploads/tainacan-items/1746/3894/2005-calculation-of-metal-cutting-modes-2022-edition.pdf>
3. Боженко Л.І. Технологія машинобудування. Проектування технологічного спорядження. Львів: Світ, 2001. 296 с.
4. Мархель І.І. Деталі машин: навчальний посібник. - К.: Алерта, 2005. 368с. URL: [http://vpus.kl.com.ua/wp-content/uploads/2020/03/Деталі-машин-by-I.I.-Мархель-z-lib.org .pdf](http://vpus.kl.com.ua/wp-content/uploads/2020/03/Деталі-машин-by-I.I.-Мархель-z-lib.org.pdf)
5. Гайдамака А.В. Деталі машин. Основи теорії та розрахунків : навчальний посібник для студентів машинобудівних спеціальностей усіх форм навчання. Харків: НТУ «ХП», 2020. 275 с. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/fc3fab8f-ed29-45e7-9d84-52d75700d4f6/content>

					КРБ.ПМ.24.85.000.00.00.00 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

