

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)
Факультет транспорту та механічної інженерії

(повне найменування факультету)
Кафедра прикладної механіки та мехатроніки

(повна найменування кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»

Проектування та розрахунок засобів автоматизації процесу
виготовлення деталі вал-шестерня

спеціальність 131 Прикладна механіка
(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Прикладна механіка»
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ІМм-21
Биць Роман Дмитрович

(підпис)

Керівник:
к.т.н., доцент
Самчук Людмила Михайлівна

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 20__ р.

к.т.н., доцент

Гарант освітньої програми:
Четвержук Тарас Іванович

(підпис)

Луцьк – 2025 року

Луцький національний технічний університет
Факультет Транспорту та механічної інженерії
Кафедра Прикладної механіки та мехатроніки
Другий (Магістерський) рівень вищої освіти
Спеціальність 131 Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Завідувач кафедри

_____ Редько Р.Г.

“ _____ ” _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Биць Роману Дмитровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Проектування та розрахунок засобів автоматизації процесу виготовлення деталі вал-шестерня, керівник роботи Самчук Людмила Михайлівна, к.т.н., доцент, затверджені наказом вищого навчального закладу від «14» червня 2025 р. № 391/01-07
2. Строк подання студентом роботи 1.12.2025 року.
3. Вихідні дані до роботи: креслення деталі вал-шестерня, річна програма випуску 3500 шт/рік, нормативно-технічна документація, довідникові дані
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ. Розділ 1. Технологічна частина. Розділ 2. Побудова кінетичної та структурної схеми пристрою автоматизації. Розділ 3. Проектний розрахунок параметрів пристрою. Розділ 4. Проектування роботизованого комплексу. Висновки. Перелік посилань.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Креслення деталі – 1 лист (ф. А1), Кінематична схема роботизованого комплексу для виготовлення деталі – 1 лист (ф.А1), Структурна схема роботизованого комплексу для виготовлення деталі – 1 лист (ф.А1), Складальне креслення затискного пристрою – 1 лист (ф.А1), Схеми управління роботизованим комплексом та алгоритм його роботи – 1 лист (ф.А1).

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 04.03.2025р.

Керівник

(підпис)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи магістра	Примітка
1.	Технологічна підготовка виробництва	14.04.2025р.	
2.	Параметрична оптимізація переходів та визначення точності обробки	18.05.2025р.	
3.	Побудова кінетичної схеми РТК	18.07.2025р.	
4.	Побудова структурної схеми РТК	12.09.2025р.	
5.	Проектний розрахунок параметрів пристрою	17.10. 2025р.	
6.	Проектний розрахунок гвинтової пари	10.11.2025р.	
7.	Проектування роботизованого комплексу	20.11.2025 р.	
8.	Розрахунок зусилля для утримання заготовки	27.11.2025р.	
9.	Електронний варіант роботи	01.12.2025р.	

Студент

(підпис)

(Биць Р.Д.)

Керівник роботи

(підпис)

(Самчук Л.М.)

АНОТАЦІЯ

Биць Р.Д. Проектування та розрахунок засобів автоматизації процесу виготовлення деталі вал-шестерня. – Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра на здобуття кваліфікації другого (магістерського) рівня вищої освіти із спеціальності 131 Прикладна механіка – Луцький національний технічний університет. – Луцьк, 2025.

В роботі розглянуто процес та методи автоматизації виробництва в умовах серійного виробництва. У роботі проведено детальний аналіз існуючого технологічного процесу виготовлення вал-шестерні, виявлено його недоліки та "вузькі місця" з точки зору автоматизації. На основі аналізу розроблено модернізований технологічний маршрут із застосуванням сучасного обладнання з числовим програмним керуванням (ЧПК). Проведено кінематичний та силовий розрахунок приводів основного обладнання та спроектованих засобів автоматизації. Виконано розрахунок економічної ефективності від впровадження запропонованих рішень, що підтверджує доцільність модернізації.

Наукова новизна полягає в комплексному підході до автоматизації виробництва типової деталі машинобудування, що враховує інтеграцію сучасних систем керування, маніпулювання та контролю в єдиний технологічний ланцюг.

Практичне значення роботи полягає в розробці готового проектного рішення, яке може бути імплементоване на машинобудівних підприємствах для модернізації існуючих виробничих ліній, що дозволить суттєво підвищити їхню конкурентоспроможність.

Використання автоматизованих виробничих ліній дозволяє підвищити ефективність виготовлення, вбудувати контроль якості на кожному з етапів виготовлення та зменшити собівартість виробів.

Ключові слова: вал-шестерня, автоматизація, технологічний процес, верстат з ЧПК, промисловий робот, програмований логічний контролер, автоматизований контроль, проектування, розрахунок.

ANNOTATION

Byts R.D. Design and calculation of automation tools for the manufacturing process of shaft-gear parts. – Manuscript.

Master's qualification work for obtaining the qualification of the second (master's) level of higher education in specialty 131 Applied Mechanics - Lutsk National Technical University. - Lutsk, 2025.

The work considers the process and methods of production automation in serial production. The work provides a detailed analysis of the existing technological process for manufacturing a shaft-gear, identifying its shortcomings and "bottlenecks" from the point of view of automation. Based on the analysis, a modernized technological route has been developed using modern equipment with numerical program control (CNC). Kinematic and power calculations of the drives of the main equipment and the designed automation means have been carried out. The calculation of the economic efficiency of the implementation of the proposed solutions has been performed, which confirms the feasibility of modernization.

The work considers the process and methods of production automation in serial production. The work provides a detailed analysis of the existing technological process for manufacturing a shaft-gear, identifying its shortcomings and "bottlenecks" from the point of view of automation. Based on the analysis, a modernized technological route has been developed using modern equipment with numerical program control (NCC). Kinematic and power calculations of the drives of the main equipment and the designed automation means have been carried out. The calculation of the economic efficiency of the implementation of the proposed solutions has been performed, which confirms the feasibility of modernization.

Keywords: shaft-gear, automation, technological process, CNC machine tool, industrial robot, programmable logic controller, automated control, design, calculation.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	12
1.1. Визначення типу виробництва.....	12
1.2. Розробка технологічного процесу виготовлення деталі з врахуванням автоматизації транспортних операцій.....	12
1.3. Розрахунок точності виконання операцій.....	19
1.4. Параметрична оптимізація переходів чистового точіння деталі на верстаті моделі 16К20Ф3.....	21
1.5. Уточнення типу виробництва.....	26
РОЗДІЛ 2 ПОБУДОВА КІНЕТИЧНОЇ ТА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ПРИСТРОЮ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	30
2.1. Аналіз вихідних даних.....	30
2.2. Побудова структурної схеми, структурний аналіз та визначення ступеня рухливості механізму робота (маніпулятора).....	31
2.3. Побудова системи рівнянь руху центральної точки утримання щодо базової системи у декартових координатах.....	34
РОЗДІЛ 3 ПРОЕКТНИЙ РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЮ.....	38
3.1. Розробка кінематичної схеми пристрою.....	38
3.2. Синтез зубчастого механізму.....	41
3.3. Проектний розрахунок гвинтової пари.....	41
3.4. Перевірочний розрахунок гвинта.....	43
3.5. Перевірочний розрахунок гайки.....	45
РОЗДІЛ 4 ПРОЕКТУВАННЯ РОБОТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ.....	48
4.1. Проектування затискного пристрою.....	48
4.2. Розрахунок потрібного зусилля для утримання заготовки та приводного пневмоциліндра.....	51
4.3. Визначення зусиль в елементах затискного механізму та його конструктивних параметрів.....	52

4.4. Конструкція та розрахунок затискних губок.....	53
ВИСНОВКИ.....	55
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	57

ВСТУП

Відмінною особливістю сучасного етапу розвитку машинобудування є підвищення продуктивності праці, покращення якості продукції, усунення людини від безпосередньої участі у виробничому процесі та насамперед від важких робіт та робіт в умовах небезпечних для здоров'я. Це завдання можна вирішити використанням для підприємства комплексної автоматизації, що включає і застосування передових засобів автоматизації.

При проектуванні технологічних процесів механічної обробки деталей і складання з них механізмів та машин в даний час серйозна увага приділяється питанням, пов'язаним з випуском якісних виробів при високому темпі їх виробництва та оптимальної собівартості. Зазначені параметри виробів в умовах крупносерійного і масового виробництва досягаються за рахунок механізації та автоматизації технологічних процесів з використанням для механічної обробки револьверних і багатопозиційних верстатів, автоматів та автоматичних ліній, а для складання - механізованих та автоматизованих комплексів або ліній.

Роботизований технологічний комплекс (РТК) — це інтегрована, автоматизована виробнича система, що функціонує як єдина комірka і призначена для виконання завершеного циклу технологічних операцій з мінімальним втручанням або без втручання оператора.

Структурно РТК є сукупністю функціонально пов'язаних модулів:

- Основне технологічне обладнання:
- Промисловий робот-маніпулятор:
- Периферійні та допоміжні системи:
- Система керування та інтеграція

Керування РТК є ієрархічним. Верхній рівень керування, зазвичай реалізований на базі програмного логічного контролера (ПЛК), координує роботу всіх компонентів системи. Він надсилає команди контролерам окремих одиниць обладнання (контролеру робота, системі ЧПК верстата) та отримує від них сигнали про статус виконання операцій.

Інтеграція РТК у виробниче середовище відбувається на двох рівнях:

- Фізичний: Зв'язок із вхідними та вихідними матеріальними потоками через конвеєри, автоматично керовані візки (AGV) або інші транспортні засоби.
- Інформаційний: Підключення до систем вищого рівня, таких як MES (Manufacturing Execution System) для передачі даних про виробництво, або SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) для моніторингу та диспетчеризації.

Актуальність теми. Ефективним напрямом скорочення допоміжного часу для практично усіх типів виробництва є механізація та автоматизація виробничих процесів. Але використання автоматів, напіваавтоматів та автоматичних ліній неприйнятне через високу вартість самого обладнання, технологічного оснащення до нього, а також через тривалість і велику трудомісткість переналадок при переході від випуску одного виду продукції до іншого. Зрештою, всі ці витрати переносяться на собівартість виробів, яка за малої серійності стає непомірно великою.

Вагомим кроком в автоматизації серійного виробництва є створення та ефективне використання роботизованих технологічних комплексів, що складаються зі верстатів з ЧПУ, промислових роботів та засобів оснащення. Найбільш високим рівнем РТК є гнучкий виробничий модуль (ГВМ), що складається з одиниці технологічного обладнання, оснащеної автоматизованим пристроєм програмного управління та засобами автоматизації технологічного процесу, що автономно функціонують і мають можливість вбудовуватися в систему ще вищого рівня. У ГВМ можуть бути включені пристрої завантаження та вивантаження, заміни технологічного оснащення, видалення відходів, автоматизованого контролю, перекладки, а також супутники, накопичувачі тощо. Неодмінною умовою роботи ГВМ вважається можливість переходу на обробку різних за формою та розмірами деталей у межах технологічних можливостей обладнання. Декілька ГВМ, об'єднаних загальною автоматизованою системою і транспортно-складським господарством, являє собою гнучкий виробничий комплекс (ГВК).

Таким чином, створення сучасних машин, що відрізняються високою точністю, надійністю і довговічністю, ґрунтується на новітніх досягненнях науки

та техніки. У процесах конструювання та виготовлення такої техніки повинні брати участь висококваліфіковані інженерно-технічні працівники, які мають глибокі теоретичні знання та новітні прийоми вирішення практичних завдань.

Метою роботи є створення сучасного роботизованого технологічного комплексу, який вирішує ключові завдання модернізації виробництва. Головне завдання — кардинально підвищити ефективність виробничого процесу. РТК повинен швидко адаптуватися до виробництва різноманітної продукції або виконання різних технологічних операцій з мінімальними змінами в апаратній частині, оперативно змінювати конфігурацію та програми комплексу для переходу на випуск нового продукту для скорочує час простою обладнання.

Об'єкт дослідження — технологічний процес виготовлення деталі вал-шестерня.

Предмет дослідження — процеси виготовлення деталі вал-шестерня.

Методи дослідження. Основні технологічні розрахунки проводили за допомогою відомих залежностей. Тип виробництва визначали за масою деталі та річним обсягом випуску. Після аналізу базового технологічного процесу виготовлення деталі було внесено деякі зміни. Повністю розглянуто обробку чорнової та чистової токарної операцій. З метою скорочення витрат було впроваджено промисловий робот на токарні операції. Це дозволило підвищити автоматизацію виробництва деталі. Фрезерний верстат замінений на фрезерний з ЧПУ, що також дозволяє підвищити рівень автоматизації. При перевірці точності обробки використовували емпіричні залежності сумарної похибки обробки в загальному вигляді. Розрахунок необхідної кількості устаткування визначали в залежності від типу виробництва та з врахуванням його раціонального використання на ділянці. Побудову кінематичної моделі пристрою виконували з рівняння перетворення локальної системи координат в базову систему координат, пов'язану зі стійкою виконавчого пристрою робота. Для обчислення загальної матриці у вигляді використовувалася програма MathCAD – система комп'ютерної алгебри. Шляхом підстановки значень переміщень або кутів повороту для кожної ланки в загальну матрицю перетворення координат робили висновки про вплив переміщення кожної ланки на переміщення центральної точки захоплення проектного робота.

Для розрахунку кінематичної схеми використовували дані: довжини кожної з ланок; вага заготовки (деталі), що переміщується; тип використовуваного приводного пристрою для переміщення цих ланок; вид механічної передачі, що використовується для передачі обертання від приводного пристрою безпосередньо до ланки. Передатне відношення планетарної передачі визначали за найбільш навантаженою ланкою. Чисельне значення передаточного моменту рівне відношенню значенню крутного моменту до прийнятого значення моменту сервоприводу. При проектуванні затискного пристрою враховували надійність затиску, точність базування, можливість автоматичної або швидкої заміни захватного пристрою, компактність та простоту конструкції. При конструюванні затискних губок враховували, що на губки діють значні зусилля і сили інерції, які зрушують губки зі свого місця.

Новизна одержаних результатів. Розроблений технологічний процес є оригінальним, забезпечує якісне виготовлення деталі згідно технічного завдання. За рахунок використання РТК та комбінованого інструменту для виготовлення деталі можна залучати працівників нижчої кваліфікації в порівнянні з існуючим технологічним процесом. Розроблені затискні пристрої забезпечують гнучкість механообробного обладнання та скорочують час на виготовлення деталі.

Практичне значення одержаних результатів. Продуктивність спроектованого РТК яка з врахуванням внутрішньо циклових втрат, зумовлених наявністю неповних циклів на початку і наприкінці обробки, становить 0,13 хв. на одну деталь. Середній коефіцієнт завантаження обладнання РТК становить 0,51%. Проведено розрахунок затискного пристрою та його приводу, зусилля приводу має бути не менше 150,6 Н, щоб забезпечувати надійне утримання заготовки під час переміщення.

Апробація результатів роботи. Р. Биць Побудова структурної схеми, структурний аналіз та визначення ступеня рухливості механізму робота - маніпулятора / Р. Биць, Л. Самчук /Тези V студентської науково-технічної конференції факультету транспорту та механічної інженерії “ Інноваційні технології в транспорті та механічній інженерії ”. Луцьк: ЛНТУ – 2025р.– с.157-158.

Особистий внесок магістранта. При виконання кваліфікаційної роботи магістра магістрантом проведено конструкторсько-технологічну підготовку виробництва, а саме визначено тип виробництва, Розроблено технологічний процес виготовлення деталі з врахуванням автоматизації транспортних операції та використання систем автоматизованого переміщення заготовок. Проведено розрахунок точності виконання операцій в результаті чого підтверджено досягнення точності на кожній технологічній операції. Здійснено розрахунок необхідної кількості устаткування в залежності від типу виробництва. Здійснено побудову кінетичної та структурної схеми пристрою автоматизації, здійснено структурний аналіз та визначення ступеня рухливості механізму робота. Описано систему рівнянь руху центральної точки утримання щодо базової системи у декартових координатах. Виконано проектний розрахунок параметрів пристрою з врахуванням довжини кожної з ланок; вага заготовки (деталі), що переміщується; тип використовуваного приводного пристрою для переміщення цих ланок; вид механічної передачі, що використовується для передачі обертання від приводного пристрою безпосередньо до ланки. Здійснено проектний розрахунок гвинтової пари гвинт-гайка. Визначено, що основною причиною виходу з ладу є зношування різьби. Методом математичного моделювання встановлено, що обрана система витримує задане навантаження. При проектуванні роботизованого комплексу розроблено затискний пристрій, проведено розрахунок губок затискного механізму та визначено зусилля необхідне для затиску та утримання заготовки.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

1.1. Визначення типу виробництва

Тип виробництва визначаємо попередньо за масою деталі та річним обсягом випуску.

Маса деталі – 11,65 кг;

Річний обсяг випуску деталей - 3500 штук;

Для серійного виробництва розраховується величина партії деталей [1]:

$$n = \frac{N \times a}{m}, \quad (1.1)$$

де N – кількість однакових деталей, шт.;

a – періодичність запуску, днів;

m – кількість робочих днів у році.

$$n = \frac{3500 \times 10}{254} = 137,8 \text{ шт.}$$

Заготовку отримуємо методом гарячого штампування на ГKM. Це дозволяє скоротити час на обробку виробу, збільшити продуктивність, так як заготівля за формою та розмірами наближена до деталі, а також помітно зменшуються припуски на обробку, зменшується енергоспоживання, зменшуються витрати на інструмент.

1.2. Розробка технологічного процесу виготовлення деталі з врахуванням автоматизації транспортних операцій

Після аналізу базового технологічного процесу виготовлення деталі було внесено деякі зміни. Повністю розглянуто обробку чорнової та чистової токарної операцій. З метою скорочення витрат було впроваджено промисловий робот на токарні операції. Це дозволило підвищити автоматизацію виробництва деталі. Фрезерний верстат замінений на фрезерний з ЧПУ, що також дозволяє підвищити рівень автоматизації.

Запропонований варіант технологічного процесу представлений у таблиці

1.1

Таблиця 1.1 – Прийнятий технологічний процес виготовлення деталі

№	Найменування та короткий зміст операції	Модель верстату	Ріжучий інструмент	Технологіч на база
1	2	3	4	5
005	Заготівельна (поковка)	КГШМ		
010	Фрезерно-центрувальна 1. Встановити і закріпити заготовку 2. Фрезерувати 2 торця одночасно (L = 496,5 _{-0,7}) 3. Центрувати 2 отвори одночасно	КЛ-435	Фреза 2214-0278 2214-0277 ISO 866-95 Свердло центрувальне 2317-0019 ISO 2541-92	Зовнішня циліндрич на поверхня, торець
015	Токарна з ЧПУ Установ А 1. Встановити деталь на верстат 2. Обробити деталь за контуром поверхні діаметром Ø57±0,3; Ø61±0,3; Ø74±0,3; Ø97±0,3 3. Перевірити розміри Ø57±0,3; Ø61±0,3; Ø74±0,3; Ø97±0,3 4. Перевірити розміри 18±0,4; 80±0,4; 138±0,4; 272; 145±0,4.	16K20Ф3	Різець MWLNL 2516 K06 ISO 1832-2004 Пластина CNMG 220408-PF ISO 1832-2004 Різець MWLNL 2516 K06 ISO 1832-2004 Пластина CNMG 220408-PF ISO 1832-2004 Kreon AQUILON	Центровоч ні отвори, поверхняØ 33, Ø57

	<p>Установ Б</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Встановити деталь на верстат 2. Обточити по контуру поверхні діаметром $31\pm 0,3$; $\triangleright 1:10$ $46\pm 0,3$; $61\pm 0,3$; $74\pm 0,3$; $61\pm 0,3$; 3. Перевірити розміри $31\pm 0,3$; $\triangleright 1:10$ $46\pm 0,3$; $61\pm 0,3$; $74\pm 0,3$; $61\pm 0,3$; 4. Перевірити лінійні розміри $28\pm 0,4$; $82\pm 0,7$; $136\pm 0,4$; $162\pm 0,4$; $172\pm 0,6$; $227\pm 0,4$ 5. Зняти деталь 6. Вкласти в тару 			
020	<p>Термічна</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Термообробка згідно креслення за технологією ОГМЕТ 			
025	<p>Фрезерна</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Встановити деталь та закріпити 2. Розгорнути два центровочні отвори одночасно, витримавши шорсткість кінцевих поверхонь $Ra_{2,5}$ 3. Зняти деталь 4. Контроль виконавцем 100% 5. Вкласти деталь в тару 	3926	Розвертка 2373-4012 ISO 2541-95	Поверхні $\varnothing 60,2$ и $\varnothing 45,2$

Продовження таблиці 1.1

№	Найменування та короткий зміст операції	Модель верстату	Ріжучий інструмент	Технологіч на база
1	2	3	4	5
030	Контрольна А. Перевірити візуально відсутність вибоїн, гострих кромок та задирок Б. Перевірити шорсткість оброблених поверхонь Ra2,5	Стіл ОТК	Набір для вимірювання шорсткості 8442-4004-26	
035	Токарна з ЧПУ 1. Встановити та закріпити заготовку 2. Обточити по контуру поверхні діаметром 56-0,5, 73-0,5, 60,2-0,05, 60-0,6, фаски, 3. Точити канавки 4. Нарізати різьбу M56x2-8g 5. Перевірити наявність фасок;	16K20Ф3	Різці: 2103-0711 ISO 4027 035-2126-1809 ISO 4066 035-2159-0543 ISO 4055 Kreon AQUILON	Центрові отвори та конічна поверхня
	Перевірити різьбу M56x2-8g; Перевірити розміри $\varnothing 53-0,46$; $\varnothing 73-0,5$; Перевірити розміри $20 \pm 0,4$; $60,2 \pm 0,3$; Перевірити розміри $\varnothing 60$; $\varnothing 59-0,6$			

040	<p>Токарна з ЧПУ</p> <p>1. Встановити деталь на верстат</p> <p>2. Обточити по контуру поверхні діаметром 30-0,5, 45,2-0,05; 73-0,5; 60,2-0,05; 60-0,6; 96,2-0,05; фаски 3. Проточити канавки</p> <p>4. Нарізати різьбу M30x2-8g</p> <p>5. Перевірити наявність фасок;</p> <p>Перевірити різьбу M30x2-8g;</p> <p>Перевірити розмір Ø45,2-0,05;</p> <p>Перевірити розмір Ø96,2-0,05;</p> <p>Перевірити конічну поверхню; перевірити розміри 252,5-0,52; 125±1; Ø60±0,6; 25±0,2; 28±0,5; 28±0,3;</p> <p>Перевірити розміри 5max; 52+1; 8±0,2; 4+1; Ø27-0,52; Ø53-0,46</p> <p>Перевірити розмір Ø58-0,25</p> <p>6. Зняти деталь роботом</p>	16K20Ф3	<p>Різці:</p> <p>2103-0711 ISO 4027</p> <p>035-2126-1809</p> <p>ISO 4066</p> <p>035-2159-0543</p> <p>ISO 4055</p> <p>Kreon AQUILON</p>	<p>Центрові отвори та конічна поверхня</p>
-----	---	---------	--	--

Продовження таблиці 1.1

№	Найменування та короткий зміст операції	Модель верстату	Ріжучий інструмент	Технологіч на база
---	---	-----------------	--------------------	--------------------

1	2	3	4	5
045	<p>Вертикально-фрезерна з ЧПУ</p> <ol style="list-style-type: none"> Встановити та закріпити деталь у пристосуванні Фрезерувати шпонкові пази ($L=52+1$, $b=12^{+0,018}_{-0,061}$) Фрезерувати шпонкові пази ($L=20\pm 0,4$, $b=8^{+0,2}_{-0,2}$) Зняти деталь та вкласти в тару 	6P13Ф3	<p>Фреза 2234 – 0363 ISO 866-95</p> <p>Фреза 2234 – 0015 ISO 866-95</p>	<p>Поверхні</p> <p>$\varnothing 60,2-0,05$</p> <p>$\varnothing 45,2-0,05$</p> <p>$\varnothing 99\pm 0,3$</p>
050	<p>Контрольна</p> <ol style="list-style-type: none"> Перевірити візуально на відсутність вибоїн, гострих кромок та задирок Перевірити візуально наявність фасок Перевірити шорсткість оброблених поверхонь Ra2,5 		<p>Набір зразків для перевірки шорсткості 0,8-12,5-T ISO 866-95</p> <p>Набір зразків для перевірки шорсткості 0,8-12,5-ФТП ISO 866-95</p>	

055	<p>Токарно-гвинторізна</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Встановити та закріпити деталь 2. Нарізати виток $S=13,0-0,15$; $H=8,1$; $0,8-0,1 \times 45_0$ 3. Контроль виконавцем 20% 4. Зняти деталь та вкласти в тару 	1М63	<p>Різцева головка 2557-4012</p> <p>Різець 2552-4123</p> <p>Різець 2552-4124</p> <p>Різець 2552-4125</p> <p>Прибор 8734-4106</p> <p>Еталон 8736-4101</p> <p>Нутромір 0-100,001 ISO 834-95</p>	Встановити деталь у втулці, піджавши центром
060	<p>Слюсарна</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Встановити деталь на верстаті 2. Запиляти верх витка деталі до товщини 1,5 мм 3. Контроль виконавцем 4. Зняти деталь та вкласти в тару 	Стіл контрольний Шліф-машинка ПІ 2002	<p>Круг 1 150X20X32 25А 40П С2 7 К5 35М/С А 1кл ISO 326-95</p>	
065	<p>Контрольна</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Перевірити розмір $S=13,1-0,15$; $H=8,1$ 2. Перевірити розмір $L=17,1+0,4\text{мм}$ 3. Перевірити візуально відсутність гострих кромки, вибоїн та задирок 	Стіл НР	<p>Пристрій 8734-4106</p> <p>Еталон 8736-4101</p> <p>Нутромір ГИ-100 ISO 876-97</p>	

Продовження таблиці 1.1

№	Найменування та короткий зміст операції	Модель верстату	Ріжучий інструмент	Технологіч на база
1	2	3	4	5
070	Різьбошліфувальна 1. Встановити та закріпити деталь 2. Шліфувати виток черв'яка S=12,7-0,05 H=8,1 3. Снять деталь 4. Контроль виконавцем -20%	GSN-320PC	Круг 1 150X20X32 25A 40П C2 7 K5 35M/C A 1кл ISO 866-95 Голка алмазна 3908-0063 ISO 834-95	Центрові отвори та конічна поверхня
075	Контрольна 1. Перевірити розмір S=12,7-0,05	Стіл НР	Пристрій 8734-4106 Еталон 8736-4101	
080	Промивка 1. Промити деталь згідно ТВ			
085	Гальванічна 1. Гальванопокриття згідно креслення з ТВ			
090	Термічна 1. Термообробка згідно креслення за технологією ОГМЕТ			

095	<p>Фрезерна</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Встановити деталь та закріпити 2. Розгорнути два центрові отвори одночасно, витримавши шорсткість конічних поверхонь Ra2,5 3. Зняти деталь 4. Контроль виконавцем -100% 5. Вкласти деталь у тару 	3926	Розвертка 2373-4012 DIN 10210	Поверхні Ø60,2 и Ø45,2, торці
100	<p>Круглошліфувальна Установ А</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Встановити деталь та закріпити 2. Шліфувати поверхні Ø 45-0,1; 3. Шліфувати поверхню Ø60±0,0095; 4. Шліфувати поверхню Ø96±0,017 	3M152	Круг 1 150X20X32 25A 40П С2 7 К5 35М/С А 1кл DIN 6743	Центрові отвори та конічна поверхня
	<p>Установ Б</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Шліфувати поверхні Ø60±0,0095 2. Контроль виконавцем: шорсткості та діаметра шийок 100%, решти параметрів 15% 			

105	<p>Круглошліфувальна</p> <p>А. Встановити деталь та закріпити</p> <p>1. Обробити конічну поверхню деталі</p> <p>Б. Покласти деталь в тару</p> <p>В. Контроль виконавцем: шорсткості та діаметра шийок 100%, решти параметрів 15%</p>	3M152	<p>Круг</p> <p>1 600X63X305</p> <p>14A 40П С2 7 К5</p> <p>50М/С А 1кл</p> <p>DIN 471</p>	<p>Центрові отвори та конічна поверхня</p>
-----	--	-------	--	--

Продовження таблиці 1.1

№	Найменування та короткий зміст операції	Модель верстату	Ріжучий інструмент	Технологіч на база
1	2	3	4	5

110	<p>Контрольна</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Перевірити візуально відсутність гострих кромek, вибоїн та задирок 2. Перевірити шорсткість оброблених поверхонь Ra1,25 3. Перевірити шорсткість оброблених поверхонь Ra2,5 4. Перевірити розмір $\varnothing 96 \pm 0,017$ 5. Перевірити розмір $\varnothing 60 \pm 0,0095$ 6. Перевірити розмір $\varnothing 45 \pm 0,1$ 7. Перевірити кінчну поверхню та розмір $\varnothing 54 \pm 0,8$ 8. Перевірити радіальне та торцеве биття поверхонь 9. Перевірити непостійність $\varnothing 60 \pm 0,0095$ у поздовжньому та поперечному перерізах 	Стіл ОТК	<p>Набір зразків шорсткості 0,2-3,2-ШЦ ГОСТ 9378-93</p> <p>Набір зразків шорсткості 0,2-3,2-ШТ</p> <p>Пристрій 8734-4106</p> <p>Еталон 8736-4112-04</p> <p>Скоба СР 75</p> <p>Скоба СР 50</p> <p>Пристрій 8734-4131</p> <p>Еталон 8736-4087-02</p> <p>Пристрій для контролю биття ПБМ-1400 ТУ 2-034-450-81</p> <p>Індикатор 2 МИГ-1 ISO 3599-96</p> <p>Штатив ШМ-1-8 ISO 3599-96</p>	
-----	--	----------	--	--

115	Токарна 1. Встановити деталь у центрах 2. Полірувати шийку $\varnothing 45 \pm 0,1$ 3. Зняти деталь 4. Контроль виконавцем -100% 5. Покласти деталь в тару	1K62 DYNABR ADE 15331	Стрічка TRIZACT 237 AA A16	Центровочні отвори
120	Різьбошліфувальна 1. Встановити деталь та закріпити 2. Шліфувати фаски 1 та 2 послідовно 3. Контроль виконавцем -20% 4. Зняти деталь 5. Покласти деталь в тару	GSN-320PC	Круг 1 150X20X32 25A 25П CM1 7 K5 35M/C A 1кл DIN 906 Голка алмазна 3908-0063 DIN648 Еталон 8736-4101	Центровочні отвори
125	Контрольна 1. Перевірити фаски $0,8 \times 45^\circ$	Стіл контрольний	Шаблон 8384-4054-01	

Продовження таблиці 1.1

№	Найменування та короткий зміст операції	Модель верстату	Ріжучий інструмент	Технологічна база
1	2	3	4	5

130	<p>Різьбошліфувальна</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Встановити деталь та закріпити 2. Перевірити биття деталі по шийках $\varnothing 60 \pm 0,0095$ 3. Шліфувати виток черв'яка програмою, витримавши розміри $S=12,504^{+0,08}_{-0,11}$; $H=8$ 4. Зняти деталь 5. Контроль виконавцем -100% 6. Поставити клеймо на шийці $\varnothing 60_{-0,6}$ 7. Покласти деталь в тару 	<p>BUDERU C CNC365</p>	<p>Індикатор 1 МГ- 1 ISO 3599-96 Круг 1 500x16x203 25A CM2 ISO 3599-89 Клеймо 7858- 0075 BK8- X1H12 ISO 3599-99 Молоток 7850- 0102 Ц15XP ISO 3849-99</p>	<p>Центровочні отвори</p>
	<p>Контрольна</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Перевірити розмір $s=12,504^{+0,08}_{-0,11}$ 2. Перевірити шорсткість поверхні витка черв'яка $Ra0,63$ 	<p>Стіл НР</p>	<p>Пристрій 8734- 4106 Еталон 8736- 4101 Набір зразків шорсткості 8442-4016</p>	

135	<p>3. Перевірити похибку профілю витка черв'яка – не більше $ff1=0,0056\text{мм}$</p> <p>4. Перевірити похибку гвинтової лінії витка черв'яка на одному обороті – не більше $fk=0,0056\text{мм}$. На довжині нарізаної частини – не більше $fnk=0,011$</p> <p>5. Перевірити похибку кроку витка черв'яка – $frx=0,0036\text{мм}$; накопичена похибка кроків – $frxk=\pm 0,016\text{мм}$</p> <p>6. Перевірити похибку циклічної зубцевої частоти передачі – не більше $fzzh=16''$</p>		<p>Пристрій PSK-500</p> <p>Пристрій PWF-500</p>	
140	<p>Промивка</p> <p>1. Промити деталь згідно ТВ</p>	НС-304		

Аналізуючи базовий технологічний процес, слід зазначити, що фрезерна обробка відбувається універсальному обладнанні. Це збільшує час на обробку та зменшує продуктивність збільшуючи її вартість. Тому доцільно замінити дані операції фрезерною із ЧПУ. Для збільшення продуктивності фрезерної операції обробляються дві деталі за один установ, що дозволяє скоротити допоміжний час.

Токарна операція для чорнової обробки поєднана в одну операцію із двома установами. Токарні чорнова та чистова операції були автоматизовані автоматичним завантаженням деталі на верстат – був розроблений РТК, де промисловий робот обслуговує три токарні верстати, здійснює перевертання деталі у верстаті та подачу деталі на транспортер для подальшої обробки. Це дозволяє

звільнити людину від монотонної праці, підвищити продуктивність, скоротити витрати на обробку.

Також для повної автоматизації токарної операції в верстат 16К20Ф3 було вбудовано прилад активного контролю деталей лазерного сканера нового покоління - Kreon AQUILON. Висока точність ($\pm 0,005\text{мм}$) даного сканера дозволяє використовувати його в завданнях, для яких раніше лазерне сканування було не застосовним через високі вимоги до точності. При виборі чорнових, проміжних та чистових баз дотримується принцип сталості баз.

1.3. Розрахунок точності виконання операцій

Перевіримо забезпечення необхідної точності при чистовому точінні на поверхні $\varnothing 45,2 \pm 0,1$. В результаті проведення розрахунку необхідно підтвердити досягнення точності на даній технологічній операції. Це означає, що величина сумарної похибки обробки не повинна перевищувати величини допуску на розмір деталі T_{det} [1].

У серійному виробництві величина сумарної похибки обробки в загальному вигляді визначається за формулою [2]:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_u + \sqrt{\Delta_{ct}^2 + \Delta_n^2 + \varepsilon_y^2}, \quad (1.2)$$

де Δ_u - похибка, обумовлена зносом ріжучого інструменту, мкм;

Δ_n - похибка налаштування верстата, мкм;

Δ_{ct} - поле розсіювання похибок обробки, обумовлених дією випадкових факторів, мкм;

ε_y - похибка установки заготовки, мкм.

Похибка обробки, обумовлена зносом ріжучого інструменту Δ_u , визначається за формулою [2]:

$$\Delta_u = \frac{2 \times U_0 \times l}{1000}, \quad (1.3)$$

де U_0 - відносний знос інструменту, мкм/км;

l – довжина різання, м.

Довжину різання визначимо за формулою [2]:

$$l = \frac{\pi \times d \times L \times n}{1000 \times S}, \quad (1.4)$$

де d - діаметр оброблюваної поверхні, мм;

L - розрахункова довжина обробки, мм;

n - кількість деталей у настроювальній партії в період між підналагодженнями верстату;

S - поздовжня подача інструменту, мм/об.

Підставивши значення отримаємо:

$$l = \frac{\pi \times 45,2 \times 30 \times 40}{1000 \times 0,3} = 567,7 \text{ м},$$

$$\Delta_u = \frac{2 \times 5 \times 567,7}{1000} = 5,6 \text{ мкм}.$$

Значення миттєвої похибки обробки для розміру $\varnothing 45,2$ мм складає $\Delta_{cl} = 29$ мкм.

Похибка налаштування Δ_n , мкм визначається як [3]:

$$\Delta_n = \sqrt{\Delta_{зм}^2 + \Delta_{рег}^2 + \Delta_{вим}^2}, \quad (1.5)$$

де $\Delta_{зм}$ - зміщення центру групування розмірів пробних деталей щодо середини поля розсіювання розмірів, мкм;

$\Delta_{рег}$ - похибка регулювання положення ріжучого інструменту на верстаті, мкм;

$\Delta_{вим}$ - похибка вимірювання пробних деталей, мкм.

В свою чергу [3]:

$$\Delta_{зм} = \frac{\Delta_{cl}}{\sqrt{m}}, \quad (1.6)$$

де m - кількість пробних деталей;

Δ_{ca} - значення миттєвої похибки обробки, мкм.

Таким чином, маємо [3]:

$$\Delta_{cm} = \frac{29}{\sqrt{4}} = 14,5 \text{ мкм.}$$

Визначивши Δ_{peg} за таблицею [2] та $\Delta_{вим}$ за таблицею [2], підставивши отримані значення матимемо:

$$\Delta_n = \sqrt{14,5^2 + 40^2 + 18^2} = 46 \text{ мкм.}$$

При встановленні заготовки в центрах $\varepsilon_y = 0$, згідно таблиці [2].

Сумарна похибка обробки становитиме:

$$\Delta_{\Sigma} = 5,6 + \sqrt{29^2 + 46^2 + 0^2} = 59,6 \text{ мкм.}$$

Відповідно до прийнятної точності обробки для розміру $\varnothing 45,2 \pm 0,1$, поле допуску для чорнкової токарної операції складає $T_{det} = 100$ мкм, тобто більше сумарної похибки $\Delta_{\Sigma} = 59,6$ мкм.

$$T_{det} > \Delta_{\Sigma}, 100 > 59,6 \text{ мкм.}$$

Отже, необхідна точність операції забезпечується.

1.4. Параметрична оптимізація переходів чистового точіння деталі на верстаті моделі 16К20Ф3

Необхідно провести параметричну оптимізацію процесу чистового поздовжнього точіння поверхонь деталі на верстаті моделі 16К20Ф3. Основною метою автоматизованого вирішення поставленої задачі є визначення оптимальних режимів точіння за заданих умов обробки.

Вхідними параметрами цієї операції є [4]:

- Вид обробки;
- Вид заготовки, діаметр та довжина;
- Характеристика заготовки (матеріал, твердість, межа міцності);
- Необхідна шорсткість поверхні;

- Глибина різання;
- Діаметр та довжина обробки;
- Спосіб закріплення заготовки;
- Технічні дані верстата (потужність приводу, кількість швидкостей);
- Технічні дані інструменту (матеріал, період стійкості, висота державки, геометричні параметри).

У задачах розрахунку режимів різання вхідні параметри поділяються на шукані (керовані) та задані (некеровані). Завдання розрахунку оптимальних режимів полягає у визначенні таких значень, які є найкращими (за деякими показниками) за сукупністю вихідних параметрів при заданих значеннях некерованих параметрів.

В даному нашому випадку постановка задачі оптимізації режимів обробки включає:

- 1) Вибір параметрів;
- 2) Визначення множини їх можливих рішень;
- 3) Вибір набору вихідних параметрів процесу;
- 4) Встановлення функціональних залежностей між шуканими та вихідними параметрами при фіксованих значеннях некерованих параметрів;
- 6) Виділення цільової функції;
- 7) Призначення діапазонів можливих значень вихідних параметрів.

Набір параметрів може бути представлений у вигляді деякої множини [4]:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}. \quad (1.7)$$

Тоді завдання розрахунку оптимальних режимів різання зводиться до наступного завдання математичного програмування [4]:

$$F(x) \rightarrow \min(\max) , \quad (1.8)$$

$$R_i(x) \leq R_i, \quad i=1, 2, \dots, m, \quad (1.9)$$

$$x \in \{X\} , \quad (1.10)$$

де $F(x)$ – залежність для прийнятого критерію оптимальності;

$R_i(x)$ – значення i -ої характеристики процесу різання в залежності від значень пошукових параметрів з деякої заданої множини X ;

R_i – задане граничне значення i -ої характеристики процесу різання.

Складемо математичну модель оптимізації процесу чорнового поздовжнього точіння поверхонь деталі на верстаті моделі 16К20Ф3. У цьому випадку математична модель одноінструментальної обробки на верстатах з рядом безступінчастих частот обертання шпинделя і подач описується наступною системою співвідношень [4]:

$$t_0 = \frac{L + L_p}{n_i \times S_j} \rightarrow \min, \quad (1.11)$$

$$T \geq T_E, \quad (1.12)$$

$$Ra \leq Ra_{don}, \quad (1.13)$$

$$N \leq N_{don}, \quad (1.14)$$

$$S \leq S_{max}, \quad (1.15)$$

$$S \geq S_{min}, \quad (1.16)$$

$$n_i \leq n_{max}, \quad (1.17)$$

$$n_i \geq n_{min}, \quad (1.18)$$

де t_0 – основний час обробки на токарному верстаті;

n_i – поточна частота обертання шпинделя верстату;

S – поточна подача інструменту;

T – період стійкості інструменту, що відповідає поточній комбінації n_i та S_j ;

T_E – економічно раціональний період стійкості інструменту;

Ra – шорсткість обробленої поверхні;

Ra_{don} – шорсткість поверхні, задана кресленням;

N – ефективна потужність різання;

N_{don} – допустима потужність приводу головного руху верстата;

S_{min} , S_{max} – відповідно мінімальне та максимальне значення подачі, що

обмежують область пошуку рішення;

n_{\min} , n_{\max} – відповідно мінімальна та максимальна частоти обертання шпинделя, що обмежують область пошуку рішення.

Для визначення чисельних значень змінних та вихідних параметрів моделі процесу поздовжнього точіння можна скористатися рівняннями та даними, наведеними у довіднику.

Тоді математична модель процесу поздовжнього точіння зовнішньої циліндричної поверхні твердосплавним різцем матиме вигляд [4]:

$$t_0 = \frac{L + L_p}{n_i \times S_j}, \quad (1.19)$$

$$T = \frac{C_v \times K_v}{V \times 60 \times t^{x_v} \times S_j^{y_v}} \geq T_9, \quad (1.20)$$

$$Ra = k_0 \times \frac{S_j^{k_1} \times (90 - \gamma)^{k_4}}{\rho^{k_2} \times V^{k_3}} \leq Ra_{\text{дон}}, \quad (1.21)$$

$$N = \frac{10 \times C_p \times t^{x_p} \times S_j^{y_p} \times V^{n_p} \times K^p \times V}{1020} \leq N_{\text{дон}}, \quad (1.22)$$

$$S_j \leq S_{\max} = S_{\text{дон}}, \quad (1.23)$$

$$S_j \geq S_{\min} = S_{c \min}, \quad (1.24)$$

$$n_i \leq \frac{1000 \times 60 \times V_{\text{кдон}}}{\pi \times D}, \quad (1.25)$$

$$n_i \leq \frac{1000 \times 60 \times V_{c \max}}{\pi \times D}, \quad (1.26)$$

$$n_i \geq \frac{1000 \times 60 \times V_{c \min}}{\pi \times D}, \quad (1.27)$$

$$n_i \geq \frac{1000 \times 60 \times V_{n \min}}{\pi \times D}, \quad (1.28)$$

де $C_v, C_p, K_v, k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, x_v, y_v, m, x_p, y_p, n_p$ – коефіцієнти та показники ступенів у формулах для обчислень швидкості різання, сили різання та шорсткості обробленої поверхні;

γ – головний передній кут різця;

ρ – радіус заокруглення при вершині різця;

$S_{дон}$ – подача, допустима міцністю ріжучої пластини;

$S_{c\min}$ – мінімальна подача супорта верстату;

$V_{кдон}$ – швидкість різання, допустима термостійкістю ріжучої пластини;

$V_{c\min}$ – швидкість різання, допустима нижньою межею частоти обертання шпинделя;

$V_{n\min}$ – швидкість різання, допустима рівнем швидкості різання, за якої починається наростання на різці.

Верстат, що використовується - токарний верстат з ЧПУ 16К20Ф3.

Інструмент – різець прохідний, оснащений пластинами із твердого сплаву T15K6 ISO 683/97.

Матеріал, що обробляється – Сталь 40X ISO 683/97, $\sigma_b = 750$ МПа.

Таблиця 1.2 – Параметри оптимізації точіння для операції 015

Оптимізація режимів поздовжнього точіння на верстаті моделі 16К20Ф3												
Регулювання частоти обертання шпинделя, безступінчасте												
Регулювання подачі супорта, безступінчасте												
Вихідні дані												
Номер операції		015 Токарна з ЧПУ										
Характер обробки		Чорнова										
Оброблюваний матеріал		Сталь 40X										
Вид заготовки		Поковка										
Кількість переходів		10										
Номер переходу		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	

Діаметр поверхні, мм		56	60	73	60	96	60	73	60	45	30
Довжина поверхні, мм		18	62	9	30	125	30	11	30	48	28
Глибина різання, мм		4	2	2	8	2	2	2	2	2	2
Врізання, мм.		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Шорсткість, Ra		3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
Оптимальні режими різання											
Швидкість різання, м/хв.		139,4	153, 5	153, 6	126, 8	153, 4	153,5	153,6	153,5	141,3	94,2
Частота обертання, об/хв.		793	815	670	673	509	815	670	815	1000	1000
Подача, мм/об		0,24	0,25	0,25	0,23	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,21
Подача, мм/хв.		190,3	203, 8	167, 5	154, 8	127, 3	203,8	167,5	203,8	250	210
Період стійкості, хв.		60,34	60,1 8	60,1 2	60,2 3	60,4	60,18	60,12	60,18	91,18	824
Шорсткість, Ra		3,092	3,09 3	3,09 2	3,08 6	3,09 3	3,093	3,092	3,093	3,186	3,18
Потужність, кВт.		4,47	2,50 1	2,50 2	7,98 7	2,5	2,501	2,502	2,501	2,331	1,44 9
Сила різання, Pz н.		1936	984	984	3805	984, 1	984	984	984	996,3	929
Основний час, хв.		0,105	0,31 4	0,06 6	0,20 7	0,99 8	0,157	0,078	0,157	0,2	0,14 3

Нормативні режими різання												
Швидкість різання, м/хв.	157,5	157, 5	104, 4	89,4 9	74,8 9	89,49	104,4	89,49	125,6	100		
Частота обертання, об/хв.	278,7	278, 7	475	475	265	475	475	475	800	800		
Подача, мм/об	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	
Подача, мм/хв.	111,5	111, 5	237, 5	237, 5	132, 5	237,5	237,5	237,5	400	111		
Період стійкості, хв.	100	100	104, 1	266	426	266	104,1	266	50,61	125		
Шорсткість, Ra	3,2	3,2	6,40 5	6,77	7,21 8	6,77	5,405	6,77	5,992	11,7		
Потужність, кВт.	2,32	2,14	7,57 7	5,31 7	7,99 7	5,317	7,577	5,317	5,319	4,93		
Сила різання, Pz н.	765	765	4384	3589	6451	3589	4384	3589	1000	2966		
Основний час, хв.	0,35	0,5	0,62	0,21	1	0,31	0,65	0,2	0,26	0,15		
Скорочення основного часу переходів у %												
	69,98	37,1 8	89,4 1	1,55 6	0,19 6	49,34	88,06	21,47	23,08	4,76		
Скорочення основного часу операції в %						38,5						

1.5. Уточнення типу виробництва

Розрахунок необхідної кількості устаткування залежить від типу виробництва. Правильний вибір обладнання та його кількості визначає його раціональне використання у часі.

На дільниці серійного та масового виробництва розрахункова кількість обладнання визначається за такою формулою [5]:

$$C_p = \frac{T_r}{\Phi_{д.о} \times K_B \times \eta_{зн}}, \quad (1.29)$$

де C_p – розрахункова кількість верстатів, штук;

T_r – трудомісткість річного випуску деталі на операцію, год;

$\Phi_{д.о}$ – дійсний річний фонд часу роботи одиниці обладнання,;

$\eta_{зн}$ - нормативний коефіцієнт завантаження обладнання ($\eta_{зн} = 0,8$ для умов середньосерійного виробництва);

K_B - Коефіцієнт, що враховує виконання норм ($K_B = 1,1-1,15$).

Для визначення трудомісткості річної програми випуску необхідно використовувати норми часу за операціями на одну деталь і виробничу програму в цілому.

Трудомісткість річного випуску деталей за операціями визначаємо за формулою [5]:

$$T_r = \frac{t_{ум} \times A}{60}, \quad (1.30)$$

де $t_{ум}$ – штучний час на операцію, хв;

A – виробнича програма, штук.

Трудоємність річного випуску для 010 операції:

$$T_r = \frac{1,4 \times 3500}{60} = 81,67 \text{ год.}$$

Розрахункова кількість обладнання для 010 операції:

$$C_{p11} = \frac{81,67}{3803,24 \times 1,1 \times 0,8} = 0,025 \text{ верстатів.}$$

Розрахункова кількість верстатів може вийти не цілим числом, у цьому випадку його округляють до цілого числа, яке називають прийнятним числом

верстатів C_n . При встановленні прийнятої кількості верстатів допускається перевантаження в невеликих межах до 5–6% за умови не більше 50% від загальної кількості обладнання.

Коефіцієнт завантаження цієї операції при обробці конкретної деталі K_3 визначаємо за формулою [5]:

$$K_3 = \frac{C_p}{C_n}. \quad (1.31)$$

Коефіцієнт завантаження для 010 операції буде вірний

$$K_3 = \frac{0,025}{1} = 0,025.$$

Коефіцієнт завантаження для 010 операції [5]:

$$K_3 = \frac{\sum_{i=1}^m C_p}{\sum_{i=1}^m C_n}, \quad (1.32)$$

де m – число операцій.

Кількість операцій O , що виконуються на робочому місці визначається за формулою [5]:

$$O = \frac{\eta_{з.н.}}{\eta_{з.ф.}}, \quad (1.33)$$

де $\eta_{з.н.}$ - нормативний коефіцієнт завантаження;

$\eta_{з.ф.}$ - фактичного коефіцієнта завантаження.

Кількість операцій, що виконуються на робочому місці 010-ї операції:

$$O = \frac{0,8}{0,02} = 22,06 \text{ шт.}$$

Дані розрахунку потреби у обладнанні зведено до таблиці 1.3

Таблиця 1.3 – Розрахунок потреби в устаткуванні та його завантаження

№ операції	Найменування операції	Річна трудоемність T_T , год	Дійсний річний фонд $\Phi_{Д.О.}$, год	Коефіцієнт виконання норм, K_B	Кількість верстатів, шт.		завантаження об'єкта K	Число закріплених операцій O , шт
					розрахункова, C_p	прийнята, C_n		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
010	Фрезерно-центрувальна	81,67	3803,24	1,1	0,024	1	0,024	32,785
015	Токарна з ЧПУ	278,25			0,083	1	0,083	9,623
030	Фрезерна	134,17			0,04	1	0,04	19,956
035	Токарна з ЧПУ	70,58			0,021	1	0,021	37,934
040	Токарна з ЧПУ	161,00			0,048	1	0,048	16,630
045	Вертикальна-фрезерна з ЧПУ	276,50			0,083	1	0,083	9,683
055	Токарно-гвинторізна	1577,9	3803,24	1,1	0,471	1	0,471	1,697
070	Різьбошліфувальна	336,58			0,101	1	0,101	7,955
095	Фрезерна	95,67			0,029	1	0,029	27,988
100	Круглошліфувальна	229,25			0,068	1	0,068	11,679

105	Кругло-шліфувальна	70,00			0,021	1	0,021	38,250
115	Токарна	142,33			0,043	1	0,043	18,811
120	Різьбошліфувальна	139,42			0,042	1	0,042	19,205
130	Різьбошліфувальна	198,92			0,059	1	0,059	13,460
Сума						14		265,7

Висновки. В розділі проведено технологічну підготовку до виготовлення деталі. Визначено тип виробництва, обрано метод отримання заготовки. В наявний технологічний процес виготовлення було внесено деякі зміни. Повністю розглянуто обробку чорнової та чистої токарної операцій. З метою скорочення витрат було впроваджено промисловий робот на токарні операції. Це дозволило підвищити автоматизацію виробництва деталі. Фрезерний верстат замінений на фрезерний з ЧПУ, що також дозволяє підвищити рівень автоматизації. Фрезерна обробка відбувається на універсальному обладнанні. Для збільшення продуктивності фрезерної операції обробляються дві деталі за один установ, що дозволяє скоротити допоміжний час. Токарна операція для чорнової обробки поєднана в одну операцію із двома установами. Токарні чорнова та чистова операції були автоматизовані автоматичним завантаженням деталі на верстат – був розроблений РТК, де промисловий робот обслуговує три токарні верстати, здійснює переверт деталі у верстаті та подачу деталі на транспортер для подальшої обробки.

Також для повної автоматизації токарної операції в верстат 16K20Ф3 було вбудовано прилад активного контролю деталей лазерного сканера нового покоління - Kreon AQUILON. Висока точність ($\pm 0,005$ мм) даного сканера

дозволяє використовувати його в завданнях, для яких раніше лазерне сканування було не застосовним через високі вимоги до точності.

Математичним моделюванням визначено оптимальні режими точіння за заданих умов обробки. Таким чином було досягнуто скорочення основного часу переходів та Скорочення основного часу операції на 38% для 010-ї операції.

РОЗДІЛ 2

ПОБУДОВА КІНЕТИЧНОЇ ТА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ПРИСТРОЮ АВТОМАТИЗАЦІЇ

2.1. Аналіз вихідних даних

Деталь "вал-шестерня" призначений для роботи у складі мотора-редуктора лебідки пасажирського ліфта. Лебідка встановлена в машинному приміщенні ліфта і призначена для руху кабіни і противаги. Редуктор складається з корпусу, в якому встановлені вал-шестерня і вихідний вал та призначений для зменшення частоти обертання вихідного валу електродвигуна з метою забезпечення необхідної швидкості руху кабіни. Крутний момент від електродвигуна через напівмуфту передається на вхідний вал. Деталь знаходиться у зчепленні з черв'ячним колесом, закріпленим на вихідному валу. На вихідному валу закріплений шків для канатів, призначений для перетворення обертального руху електродвигуна через черв'ячну пару в поступальний рух кабіни та противаги ліфта.

Поверхні $\varnothing 50_{+0,002}^{+0,018}$, $\varnothing 30_{+0,002}^{+0,015}$ призначені для монтажу підшипників. Точність розмірів поверхонь забезпечується за 6-ма квалітетами точності. Для того щоб уникнути перекосу підшипників при запресовуванні та підвищеного шуму та вібрації при роботі, дані шийки та прилеглі буртики повинні мати биття не більше 0,02 мм для $\varnothing 35 \pm 0,008$ і не більше 0,03 мм для $\varnothing 50_{+0,002}^{+0,018}$ та $\varnothing 30_{+0,002}^{+0,015}$.

Різьба M45×1,5-8g служить для закріплення шківа який монтується на кінець вал. Матеріал, з якого виготовлена деталь легована сталь 40X ISO 4543-91.

Хімічний склад сталі 40X наведемо у таблиці 2.1 [6]

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сталі 40X ISO 683/99

Вуглець, С	Кремній, Si	Марганець, Mn	Хром, Cr	Нікель, Ni
0,37– 0,45	0,17 – 0,37	0,5 – 0,8	0,8 – 1,1	≤0,25

Дана сталь має високу міцність, підвищену в'язкість і добре піддається термічній обробці. Межі температур термічної обробки від 850 до 550 °С. Оброблюваність різальним інструментом задовільна. Зварюваність погана, схильна до відпускнуї крихкості. Застосовується для виготовлення відповідальних деталей, що працюють при середніх тисках та великих швидкостях, деталей, що працюють на зношування при середніх обертальних швидкостях та невисоких ударних навантаженнях: шестірні, шпинделі вали. Механічні властивості сталі зведемо до таблиці 2.2 [7].

Таблиця 2.2 – Механічні властивості сталі 40X ISO 683/99

Термообробка	Твердість	Межа міцності σ_B , МПа	Межа текучості σ_T , МПа
Відпал	180...220 НВ	–	–
Зміцнення: гартування (850 в оливi) відпуск (550 в водi)	260...280 НВ	950	700
Гартування ТВЧ: гартування (870 в водi) відпуск (280 в водi)	48...52 HRC	–	–

Проаналізувавши робоче креслення деталі, бачимо, що всі необхідні параметри присутні: необхідні допуски, розрізи та перерізи дають повне уявлення про деталь. Креслення містить необхідні відомості про матеріал і масу деталі, термічну обробку.

2.2. Побудова структурної схеми, структурний аналіз та визначення ступеня рухливості механізму робота (маніпулятора)

Структурна схема виконавчого механізму – схема, що вказує основу (стійку), рухливі ланки, види кінематичних пар та їх взаємне розташування.

Залежно від типу кінематичної схеми виконавчого механізму робота рух робочого органу здійснюється у різних системах координат: прямокутної (декартової), полярної та ангулярної (кутовий). Система координатних переміщень визначає кінематику транспортуючих рухів виконавчого пристрою робота та форму його робочої зони [8].

Для виконання завдання вибираємо ангулярну (кутову) систему координат, причому ангулярну сферичну. Ангулярна сферична система координат – характеризується радіус-вектором r , що змінюється залежно від відносних кутових переміщень ланок маніпулятора у двох взаємно перпендикулярних площинах. На рисунку 2.1 наведено структурну схему маніпулятора промислових роботів та їх робоча зона.

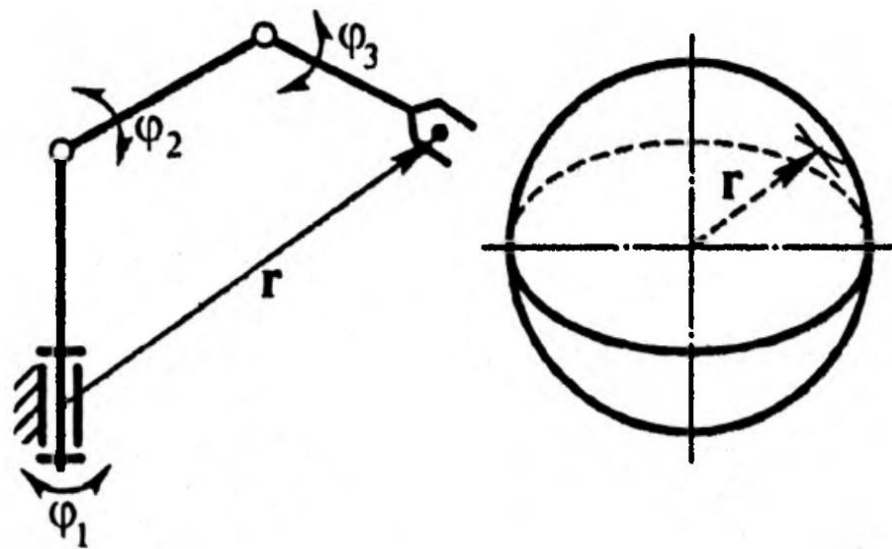


Рисунок 2.1 Структурна схема виконавчих пристроїв промислових роботів та їхня робоча зона

Описані вище промислові роботи будуть прототипами. Для виконання поставленого завдання представлену схему на рисунку 2.1 удосконалимо. Отримана схема представлена рисунку 2.2.

Ця схема визначає синтезованого робота на площині. На рисунку 2.3 представлена структурна схема того ж робота у просторі з базовою та локальними системами координат.

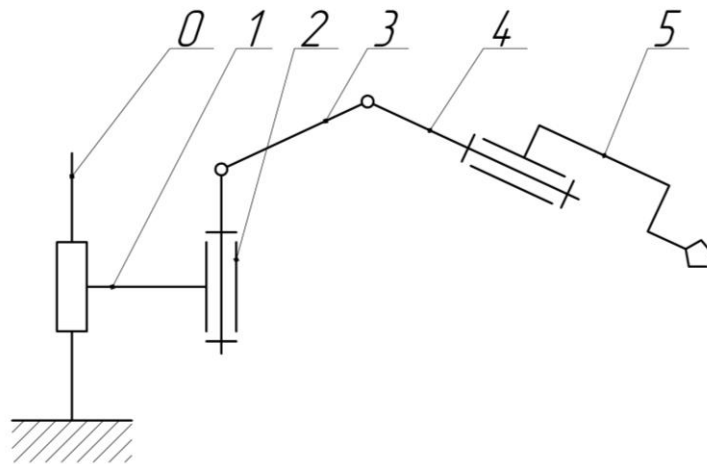


Рисунок 2.2 Структурна схема виконавчих пристроїв промислового робота

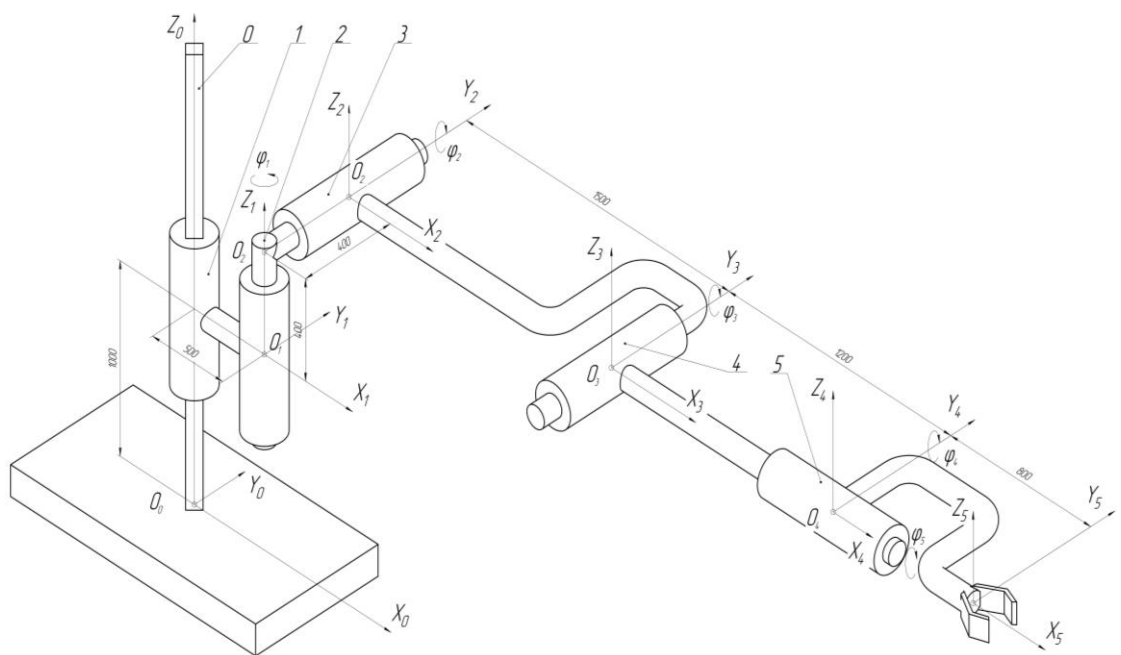


Рисунок 2.3 Загальний вид промислового робота

З структурної схеми, зображеної рисунку 2.2, складемо таблицю 2.3 типів кінематичних пар і значень параметрів робота (маніпулятора).

Визначимо ступінь рухливості механізму робота. Для цього скористаємося формулою Сомова-Малишева [9]:

$$W = 6 \cdot n - p_1 - 2 \cdot p_2 - 3 \cdot p_3 - 4 \cdot p_4 - 5 \cdot p_5, \quad (2.1)$$

де n – число рухомих ланок: $n = 5$;

p_1 – число кінематичних пар 1-го класу: $p_1 = 0$.

Таблиця 2.3 – Типи кінематичних пар та значень параметрів робота (маніпулятора)

Кінематична пара	Тип пар	Номер ланки	Параметри			
			φ	α	s	a
0,1	Поступальна	1	0	0	1000	0
1,2	Обертальна	2	φ_2	$\pi/2$	0	500
2,3	Обертальна	3	φ_3	$\pi/2$	0	400
3,4	Обертальна	4	φ_4	$\pi/2$	0	1500
4,5	Обертальна	5	φ_5	$\pi/2$	0	1200

p_2 – число кінематичних пар 2-го класу: $p_2 = 0$;

p_3 – число кінематичних пар 3-го класу: $p_3 = 0$;

p_4 – число кінематичних пар 4-го класу: $p_4 = 0$;

p_5 – число кінематичних пар 1-го класу: $p_5 = 5$.

Ступінь рухливості механізму робота становитиме:

$$W = 6 \cdot 5 - 0 - 2 \cdot 0 - 3 \cdot 0 - 4 \cdot 0 - 5 \cdot 5 = 5$$

2.3. Побудова системи рівнянь руху центральної точки утримання щодо базової системи у декартових координатах

Положення центральної точки утримання, назвемо її O_5 , в тривимірному просторі можна описати чотирма числами x_1, x_2, x_3, x_4 які всі рівні нулю і пов'язані з декартовими координатами x, y, z та є рівними [10]:

$$x = \frac{x_1}{x_4}; y = \frac{x_2}{x_4}; z = \frac{x_3}{x_4}. \quad (2.2)$$

Ці числа називають однорідними координатами проектного простору [10]. Без обмеження спільності завжди можна прийняти. Тоді будь-який вектор тривимірного простору можна записати у вигляді [10]:

$$r = [x \ y \ z \ 1]^T \quad (2.3)$$

Якщо ж $x_4 = 0$, то не можна вказати точку в тривимірному просторі, для якої числа $x_1, x_2, x_3, 0$ були б її однорідними координатами. У цьому випадку говорять про нескінченно віддалену точку простору в напрямку вектора $[\beta x_1 \beta x_2 \beta x_3]^T$ [10].

Отже точки з координатами $[1 \ 0 \ 0 \ 0]^T, [0 \ 1 \ 0 \ 0]^T, [0 \ 0 \ 1 \ 0]^T$ являють собою віддалені точки у напрямку осей x, y, z відповідно. Точка $[0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$ буде початком системи координат.

Перехід із однієї декартової системи координат до іншої описують системою рівнянь [10]:

$$\begin{cases} x_i = a_{11} \cdot x_{i-1} + a_{12} \cdot y_{i-1} + a_{13} \cdot z_{i-1} + b_1; \\ y_i = a_{21} \cdot x_{i-1} + a_{22} \cdot y_{i-1} + a_{23} \cdot z_{i-1} + b_2; \\ z_i = a_{31} \cdot x_{i-1} + a_{32} \cdot y_{i-1} + a_{33} \cdot z_{i-1} + b_3. \end{cases} \quad (2.4)$$

Замінюючи декартові координати $(i-1)$ -й та i -й систем координат однорідними координатами [10]:

$$x_i = \frac{x_{i,1}}{x_{i,4}}; \ y_i = \frac{x_{i,2}}{x_{i,4}}; \ z_i = \frac{x_{i,3}}{x_{i,4}}; \ x_{i-1} = \frac{x_{i-1,1}}{x_{i-1,4}}; \ y_{i-1} = \frac{x_{i-1,2}}{x_{i-1,4}}; \ z_{i-1} = \frac{x_{i-1,3}}{x_{i-1,4}}, \quad (2.5)$$

систему рівнянь (2.4) можна записати у вигляді [10]:

$$\begin{cases} \frac{x_{i,1}}{x_{i,4}} = a_{11} \cdot \frac{x_{i-1,1}}{x_{i-1,4}} + a_{12} \cdot \frac{x_{i-1,2}}{x_{i-1,4}} + a_{13} \cdot \frac{x_{i-1,3}}{x_{i-1,4}} + b_1; \\ \frac{x_{i,2}}{x_{i,4}} = a_{21} \cdot \frac{x_{i-1,1}}{x_{i-1,4}} + a_{22} \cdot \frac{x_{i-1,2}}{x_{i-1,4}} + a_{23} \cdot \frac{x_{i-1,3}}{x_{i-1,4}} + b_2; \\ \frac{x_{i,3}}{x_{i,4}} = a_{31} \cdot \frac{x_{i-1,1}}{x_{i-1,4}} + a_{32} \cdot \frac{x_{i-1,2}}{x_{i-1,4}} + a_{33} \cdot \frac{x_{i-1,3}}{x_{i-1,4}} + b_3. \end{cases} \quad (2.6)$$

Оскільки $x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}$ завжди можна помножити на одне і теж число, то, підставивши $x_{i,4} = x_{i-1,4}$, отримаємо [10]:

$$\begin{cases} x_{i,1} = a_{11} \cdot x_{i-1,1} + a_{12} \cdot x_{i-1,2} + a_{13} \cdot x_{i-1,3} + b_1 \cdot x_{i,4}; \\ x_{i,2} = a_{21} \cdot x_{i-1,1} + a_{22} \cdot x_{i-1,2} + a_{23} \cdot x_{i-1,3} + b_2 \cdot x_{i,4}; \\ x_{i,3} = a_{31} \cdot x_{i-1,1} + a_{32} \cdot x_{i-1,2} + a_{33} \cdot x_{i-1,3} + b_3 \cdot x_{i,4}; \\ x_{i,4} = x_{i-1,4}. \end{cases} \quad (2.7)$$

В матричному вигляді [11]:

$$r_i = A_{i,i-1} \cdot r_{i-1}, \quad (2.8)$$

де

$$r_i = [x_{i,1} \ x_{i,2} \ x_{i,3} \ 1]^T; \quad (2.9)$$

$$r_{i-1} = [x_{i-1,1} \ x_{i-1,2} \ x_{i-1,3} \ 1]^T; \quad (2.10)$$

$$A_{i,i-1} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & b_1 \\ a_{21} & a_{21} & a_{21} & \dots & b_2 \\ a_{31} & a_{31} & a_{31} & \dots & b_3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{i,i-1} & \dots & b_{i,j-1} \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

являє собою звичайну матрицю 4×4 , що складається з чотирьох матриць: матриці $L_{i,i-1}$ розміру 3×3 (матриці напрямних косинусів), елементи a_{ij} який являє собою напрямні косинуси кутів між осями i -й та $(i-1)$ -й локальними системами координат, матриці $b_{i,i-1}$ розмірності 3×1 , одиничної матриці розміром 1×1 і нульової матриці розміром 1×3 . Таким чином, перетворення однорідних координат визначається однією матрицею $A_{i,i-1}$, яка може бути представлена у вигляді добутку чотирьох матриць [11]:

$$A_{i,i-1} = A_{i,i-1}^{\alpha'} \cdot A_{i,i-1}^{\alpha'} \cdot A_{i,i-1}^{\alpha'} \cdot A_{i,i-1}^{\alpha'} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_i & \sin \varphi_i & 0 & -a_i \\ -\sin \varphi_i \cdot \cos \alpha_i & \cos \varphi_i \cdot \cos \alpha_i & \sin \alpha_i & -S_i \cdot \sin \alpha_i \\ \sin \varphi_i \cdot \sin \alpha_i & -\cos \varphi_i \cdot \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & -S_i \cdot \cos \alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.12)$$

де

$$A_{i,i-1}^{\alpha'} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_i & \sin \varphi_i & 0 & 0 \\ -\sin \varphi_i & \cos \varphi_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

– матриця повороту $(i-1)$ -ї локальної системи координат навколо осі z_{i-1} на кут φ_i ;

$$A_{i,i-1}^{s'} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -S_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

– матриця переносу $(i-1)$ -ї локальної системи координат вздовж осі z_{i-1} на S_i ;

$$A_{i,i-1}^{a'} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

– матриця переносу $(i-1)$ -ї локальної системи координат вздовж осі x_i на a_i ;

$$A_{i,i-1}^{a'} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_i & \sin \varphi_i & 0 \\ 0 & -\sin \varphi_i & \cos \varphi_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

– матриця повороту $(i-1)$ -ї локальної системи координат навколо осі x_{i-1} на кут α_i .

Виконуючи аналогічні дії, можна отримати рівняння перетворення локальної системи координат в базову систему координат, пов'язану зі стійкою виконавчого пристрою робота [11]:

$$r_0 = B_{0,i} \cdot r_i, \quad (2.17)$$

де

$$B_{0,i} = A_{0,1} \cdot A_{1,2} \cdot A_{2,3} \cdot \dots \cdot A_{i-1,i} = \prod_{j=1}^i A_{j-1,j} \quad (2.18)$$

- матриця переходу з i -ї локальної системи координат в базову систему координат.

Використовуючи матриці (2.13) – (2.16) для кожної з ланок проектованого робота та обчислюючи за формулою (2.18) добуток матриць отримуємо загальну матрицю перетворення координат. Для обчислення загальної матриці у вигляді використовувалася програма MathCAD – система комп'ютерної алгебри [12]. Результат обчислення представлений рисунку 2.4

$$\begin{aligned}
 A1 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & S1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & A2 &= \begin{pmatrix} \cos(\alpha 2) & -\sin(\alpha 2) & 0 & 0 \\ \sin(\alpha 2) & \cos(\alpha 2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & A3 &= \begin{pmatrix} \cos(\alpha 3) & 0 & -\sin(\alpha 3) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\alpha 3) & 0 & \cos(\alpha 3) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & A4 &= \begin{pmatrix} \cos(\alpha 4) & 0 & -\sin(\alpha 4) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\alpha 4) & 0 & \cos(\alpha 4) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & A5 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha 5) & -\sin(\alpha 5) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha 5) & \cos(\alpha 5) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 A1 \cdot A2 \cdot A3 \cdot A4 \cdot A5 &\rightarrow \begin{pmatrix} \cos(\alpha 2) \cdot \cos(\alpha 3) \cdot \cos(\alpha 4) - \cos(\alpha 2) \cdot \sin(\alpha 3) \cdot \sin(\alpha 4) & -\sin(\alpha 5) \cdot (\cos(\alpha 2) \cdot \cos(\alpha 3) \cdot \sin(\alpha 4) + \cos(\alpha 2) \cdot \cos(\alpha 4) \cdot \sin(\alpha 3)) - \cos(\alpha 5) \cdot \sin(\alpha 2) & \sin(\alpha 2) \cdot \sin(\alpha 5) - \cos(\alpha 5) \cdot (\cos(\alpha 2) \cdot \cos(\alpha 3) \cdot \sin(\alpha 4) + \cos(\alpha 2) \cdot \cos(\alpha 4) \cdot \sin(\alpha 3)) & 0 \\ \cos(\alpha 3) \cdot \cos(\alpha 4) \cdot \sin(\alpha 2) - \sin(\alpha 2) \cdot \sin(\alpha 3) \cdot \sin(\alpha 4) & \cos(\alpha 2) \cdot \cos(\alpha 5) - \sin(\alpha 5) \cdot (\cos(\alpha 3) \cdot \sin(\alpha 2) \cdot \sin(\alpha 4) + \cos(\alpha 4) \cdot \sin(\alpha 2) \cdot \sin(\alpha 3)) & -\cos(\alpha 5) \cdot (\cos(\alpha 3) \cdot \sin(\alpha 2) \cdot \sin(\alpha 4) + \cos(\alpha 4) \cdot \sin(\alpha 2) \cdot \sin(\alpha 3)) - \cos(\alpha 2) \cdot \sin(\alpha 5) & 1 \\ \cos(\alpha 3) \cdot \sin(\alpha 4) + \cos(\alpha 4) \cdot \sin(\alpha 3) & \sin(\alpha 5) \cdot (\cos(\alpha 3) \cdot \cos(\alpha 4) - \sin(\alpha 3) \cdot \sin(\alpha 4)) & \cos(\alpha 5) \cdot (\cos(\alpha 3) \cdot \cos(\alpha 4) - \sin(\alpha 3) \cdot \sin(\alpha 4)) & S1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Рисунок 2.4 Результат обчислення загальної матриці перетворення координат за допомогою MathCAD

Висновки. В даному розділі проведено розширений аналіз технологічного та конструктивного призначення деталі. Визначено найбільш навантажені поверхні та поверхні які мають мати високу точність обробки. Побудовано структурну схему виконавчого механізму робота-маніпулятора. Обрано ангулярну сферичну систему координат. Користуючись формулою Сомова-Малишева визначено ступінь рухливості механізму робота. Отримане рівняння перетворення локальної системи координат в базову систему координат дозволило визначити кінцеві точки при яких механізм робота втрачатиме точність рухів.

РОЗДІЛ 3

ПРОЕКТНИЙ РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЮ

3.1. Розробка кінематичної схеми пристрою

Для розрахунку кінематичної схеми необхідні такі дані: довжини кожної з ланок; вага заготовки (деталі), що переміщується; тип використовуваного приводного пристрою для переміщення цих ланок; вид механічної передачі, що використовується для передачі обертання від приводного пристрою безпосередньо до ланки [13].

Як видно з таблиці 2.1, всі ланки здійснюють обертальний рух один щодо одного (виняток становить кінематична пара 0,1, розрахунок якої буде здійснено окремо). Також необхідно точно контролювати кут повороту валу приводного пристрою та самої ланки. У зв'язку з цим як приводний пристрій можна вибрати сервопривід, перевагами якого є [13]:

- Велика потужність, а, отже, можливість розвивати високу швидкість та достатні зусилля;
- Швидкість серводвигуна обмежена знизу нулем, тоді як кроковий двигун має мінімальну швидкість не рівну нулю;
- Високі продуктивність та якість роботи, крім того, зменшений знос комплектуючих;
- Можливість контролювати реальну траєкторію завдяки використанню прецизійних датчиків зворотного зв'язку кутового або лінійного переміщення;
- Ефект самогальмування.

Для поставленого завдання оберемо сервопривід DNBB13-0003DB1AMS з такими характеристиками:

- крутний момент: 9,55 Нм;
- максимальний крутний момент: 28,7 Нм. Для розрахунку приймаємо значення крутного моменту, рівним 25 Нм;
- номінальна потужність: 3000 Вт;
- номінальний струм: 6,8 А;
- швидкість обертання: 3000 об/хв.

Для початку визначимо номінальну вантажопідйомність m_H . Номінальна вантажопідйомність – найбільше значення маси m об'єкта разом із масою затискного пристрою (ЗП) m_3 , при якій гарантується його захоплення, утримання та забезпечення встановлених значень експлуатаційних характеристик робота, кг [14]:

$$m_H = m + m_3, \quad (3.1)$$

У проектних розрахунках, коли маса ЗП невідома, номінальну вантажопідйомність можна визначити за такою формулою [14]:

$$m_H = K_C \cdot K_{II} \cdot m, \quad (3.2)$$

де K_C – коефіцієнт враховуючий масу ЗП: $K_C = 1,3$;

K_{II} – коефіцієнт, що враховує тип приводу: для пневмоприводу $K_{II} = 1,3$.

$$m_H = 1,3 \cdot 1,3 \cdot 14,7 = 24,843 \text{ кг}. \quad (3.3)$$

Знаючи номінальну вантажопідйомність та довжини ланок, можемо визначити крутні моменти в центральних точках ланок (тобто O_1, O_2, O_3, O_4) [14].

$$M_{кр} = m_H \cdot g \cdot l, \quad (3.4)$$

де g – прискорення вільного падіння: $g = 9,8 \frac{M}{c^2}$;

l – плече (довжина відповідної ланки).

Для точки O_3 :

$$M_{кр3} = 24,843 \cdot 9,8 \cdot (0,2 + 0,6) = 194,77 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Для точки O_2 :

$$M_{кр2} = 24,843 \cdot 9,8 \cdot (0,2 + 0,6 + 0,9) = 413,88 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Для точки O_1 :

$$M_{кр1} = 24,843 \cdot 9,8 \cdot (0,2 + 0,6 + 0,9 + 0,4) = 511,27 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Потім визначимо передаточне число механічної передачі, яка встановлюється після двигуна. Як передачу будемо використовувати планетарну передачу. Вибір обумовлений низкою цінних переваг [14]:

- Широкі кінематичні можливості;
- Компактність та мала маса;
- Передана потужність розподіляється на кілька потоків, число яких дорівнює кількості сателітів.

Передатне відношення планетарної передачі шукатимемо за найбільш навантаженою ланкою. Такою є перша ланка з точкою O_1 . Чисельне значення

передаточного моменту дорівнюватиме відношенню значення крутного моменту до прийнятого значення моменту [14]:

$$i_{ha}^b = \frac{M_{xp1}}{M_{oe}} = \frac{511,27}{25} = 20,45 \quad (3.5)$$

Також отримуємо [14]:

$$i_{ah}^b = \frac{n_a}{n_h} = \frac{z_b}{z_b + z_a} = 20,45 \quad (3.6)$$

Використовуючи співвідношення 3.5 можна підібрати кількість зубів для передачі, а також застосувавши умову симетричного розміщення сателітів та умову співвісності отримаємо, $z_b = 351$, $z_a = 18$, $z_g = 333$.

Визначимо діаметри шківів. При модулі коліс рівному $m = 1\text{мм}$, матимемо [14]:

$$d = m \cdot z, \quad (3.7)$$

$$d_b = 1 \cdot 351 = 351\text{мм},$$

$$d_a = 1 \cdot 18 = 18\text{мм},$$

$$d_g = 1 \cdot 333 = 333\text{мм},$$

Крім того, при проектуванні кінематичної схеми були використані пневмоциліндри. Зокрема, для реалізації обертання маніпулятора (точки O_4) і механізму затиску. У загальному випадку пневмопривід є сукупністю пристроїв, призначених для приведення в рух частин машин і механізмів за допомогою енергії стисненого повітря. Залежно від характеру руху вихідної ланки пневмопривід і, відповідно, характеру руху робочого органу може бути обертальним чи поступальним. Передача енергії в пневмоциліндрі відбувається наступним чином: приводний двигун передає крутний момент на вал компресора, який за допомогою енергії робочого газу, робочий газ після спеціальної підготовки по пневмолінії через регулюючу апаратуру надходить у пневмодвигун, де пневматична енергія перетворюється на механічну. Після цього робочий газ викидається в навколишнє середовище, на відміну від гідроприводу, в якому робоча рідина по гідролінії повертається або в гідробак або безпосередньо до

насоса. Крім того, багато пневматичних машин мають свою конструктивні аналоги серед об'ємних гідравлічних машин [14].

3.2. Синтез зубчастого механізму

Як зубчастий механізм, для розгляду в даному розділі, була обрана передача гвинт-гайка кочення, спроектована в кінематичній схемі промислового робота.

У цьому випадку гвинтова передача – це механічна передача, що перетворює обертальний рух у поступальний, чи навпаки. Даний пристрій знайшов широке застосування в приводах виконавчих органів, регулювальних гвинтах і болтах в машинах і механізмах, а також інструментах. Цим, крім іншого, визначається актуальність подальшого розрахунку для використовуваної передачі [15].

Для проведення наступних розрахунків були прийняті характеристики такі матеріали: гвинт - загартована Сталь 45, гайка - безолов'яна бронза БрА9ЖЗЛ. Матеріали підібрані так, щоб передача гвинт-гайка складала міцну антифрикційну передачу.

3.3. Проектний розрахунок гвинтової пари

Досвід експлуатації передач гвинт-гайка показує, що основною причиною виходу з ладу є зношування різьби, отже критерієм розрахунків проектування є зносостійкість. Умова працездатності за критерієм зносостійкості може бути записана у вигляді [15]:

$$p \leq [p] \quad (3.8)$$

де p – середній тиск на поверхні різьби;

$[p]$ – допустимий тиск для даного поєднання пар тертя.

Згідно з технічним завданням, гвинт виготовлений з покращеної Сталь 45, а гайка з безолов'яної бронзи БрА9ЖЗЛ, тому $[p] = 7H / \text{мм}^2$.

Відомо, що середній тиск на поверхнях, що контактують, може бути визначено за формулою [15]:

$$p = \frac{F_n}{A_n}, \quad (3.9)$$

де F_n – нормальна сила, Н;

A_n – площа контакту поверхонь тертя, мм².

Якщо знехтувати кутом підйому різьби і умовно прийняти, що навантаження рівномірно розподіляється по витках, можна вважати, що [15]:

$$\frac{F_n}{A_n} = \frac{F}{zA}, \quad (3.10)$$

де A – площа проекції робочої поверхні одного витка на площину.

При такій умові умова зносостійкості різьби [15]:

$$p = \frac{F_n}{z\pi d_2 H_1} \leq [p], \quad (3.11)$$

де d_2 – середній діаметр різьби.

$$H_1 = \gamma_1 \cdot P, \quad (3.12)$$

$$H_\Gamma = \gamma_2 \cdot d_2, \quad (3.13)$$

де γ_1 – відношення робочої висоти профілю до кроку різьби: для опорної $\gamma_1 = 0,75$;

γ_2 – коефіцієнт висти гайки: $\gamma_2 = 2$;

P – крок різьби;

H_Γ – висота гайки.

Враховуючи, що [15]:

$$z = \frac{H_\Gamma}{P} = \frac{\gamma_2 d_2}{P}, \quad (3.14)$$

з умови (3.9) знайдемо:

$$d_2 = \sqrt{\frac{F}{\pi \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot [p]}}, \quad (3.15)$$

Підставляючи чисельні значення у вираз (3.8) отримаємо величину середнього діаметру різьби гвинта. Величина $F_n = 30кН$ наведена в технічному завданні.

$$d_2 = \sqrt{\frac{30000}{\pi \cdot 0,75 \cdot 2 \cdot 7}} = 30,1\text{мм}.$$

Обрана різьба S 36x6 ГОСТ 10177-92 в якій такі параметри: $d = 36\text{мм}$; $d_2 = 31,5\text{мм}$; $d_3 = 25,5\text{мм}$; $P = 6$.

Висота гайки:

$$H_r = 2 \cdot 31,5 = 63\text{мм},$$

$$z = \frac{63}{6} = 10,5$$

Отримані значення задовольняють умови $z \leq [z]$ щодо допустимого навантаження на витки різьби.

3.4. Перевірочний розрахунок гвинта

Завданням даного пункту є перевірка забезпечення міцності та стійкості гвинта прийнятими розмірами. При ручному приводі, коли кількість циклів змін напруг за весь термін служби невелика і явище втоми навряд чи виявиться, можна обмежитися розрахунком гвинта на статичну міцність. Стрижень гвинта навантажений осьовою силою і крутним моментом.

Умова міцності має вигляд [16]:

$$s = \frac{\sigma_T}{\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}} \geq [s] \quad (3.16)$$

де s – запас міцності;

$[s]$ – мінімально допустимий запас міцності;

σ_T – межа текучості;

σ – нормальне напруження;

τ – поверхневе напруження.

$$S_n = \frac{F_{кр}}{F} \geq [S_n] \approx 3 \quad (3.17)$$

$$F_{кр} = \lambda = \frac{\mu \cdot l_p}{\rho_u}, \quad (3.18)$$

де $\mu = 0,6$ – похибка оснастки.

$$l_p = L + 0,5H_T + 2d_2, \quad (3.19)$$

$$l_p = 300 + 0,5 \cdot 63 + 2 \cdot 31,5 = 394 \text{ мм.}$$

$$\rho_u = \sqrt{\frac{I}{A_B}}, \quad (3.20)$$

$$I = \frac{\pi d_3^4}{64} \left(0,4 + 0,6 \frac{d}{d_3} \right) = 26177,6 \text{ мм}^4,$$

$$A_B = \frac{\pi d_3^4}{4} = 514 \text{ мм}^4,$$

Таким чином

$$\rho_u = \sqrt{\frac{26177,6}{514}} = 7,1 \text{ мм,}$$

$$\lambda = \frac{0,6 \cdot 394}{7,1} = 33.$$

Отримуємо наступну залежність критичних коефіцієнтів гнучкості $\lambda \leq \lambda_2$, при цьому розрахунок на стійкість не проводиться, оскільки $\sigma_{кр} = \sigma_T$

$$\sigma_{сжс} = \frac{30000}{397} = 75,5 \frac{H}{\text{мм}^2}, \quad (3.21)$$

$$\tau = \frac{T_P}{W_P} = \frac{71411,3}{3289,1} = 21,7 \frac{H}{\text{мм}^2}. \quad (3.22)$$

де T – момент тертя в різьбі;

W_P – момент спротиву різьби.

$$T_{II} = \frac{Ffd_3}{3} = \frac{30000 \cdot 0,2 \cdot 25,5}{3} = 51000 H \cdot \text{мм} \quad (3.23)$$

$$W_P = \frac{\pi d_3^3}{16} = \frac{\pi \cdot 25,5^3}{16} = 3290 \text{ мм}^3,$$

$$T_p = 0,5F \cdot d_2 \operatorname{tg}(\psi + \rho') \quad (3.24)$$

$$\psi = \operatorname{arctg}\left(\frac{P}{\pi d_2}\right) = \operatorname{arctg}\left(\frac{6}{\pi \cdot 31,5}\right) = 0,06$$

$$\rho' = \operatorname{arctg}\left(\frac{f}{\cos \alpha_1}\right) = \operatorname{arctg}\left(\frac{0,1}{\cos 3^\circ}\right) = 0,09$$

$$T_p = 0,5 \cdot 30000 \cdot 31,5 \cdot \operatorname{tg}(0,06 + 0,09) = 71411 \text{ МПа}$$

$$s = \frac{360}{\sqrt{75,5^2 + 3 \cdot 21,7^2}} = 4,26 \geq [s] = 3.$$

Розрахунок показує, що виріб задовольняє умові стійкості гвинта.

3.5. Перевірочний розрахунок гайки

Перевірочний розрахунок гайки на розтягування. Діаметр гайки D_r визначається з умови міцності на розтягування [16]:

$$\sigma_p = \frac{F}{A_r} \leq [\sigma_p] \quad (3.25)$$

Враховуючи, що A_r – площа перерізу гайки, що має форму кільця із зовнішнім діаметром D_r і внутрішнім діаметром – d : $A_r = \frac{\pi \cdot D_r^2}{4} - \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ і що допустиме напруження для бронзової гайки визначається за умовною межею плинності при нормативному коефіцієнті запасу міцності $[s] = 2..3$ ($[\sigma_T] = 200 \text{ МПа}$).

Знаходимо діаметр гайки [16]:

$$D_r \geq \sqrt{\frac{4F}{\pi[\sigma]} + d^2}, \quad (3.26)$$

$$D_r \geq 36,5 \text{ мм.}$$

Перевіримо D_r за формулою та заокруглимо до більшого

$$D_r = d + 2P = 36 + 2 \cdot 6 = 48 \text{ мм.}$$

Перевірочний розрахунок діаметра бурта на зминання.

Діаметр бурта гайки визначається з умови міцності на зминання опорної кільцевої поверхні [16]:

$$\sigma_{cm} = \frac{F}{A_{cm}} \leq [\sigma_{cm}], \quad (3.27)$$

де A_{cm} – площа поверхні зминання з урахуванням фаски $c = 2\text{мм}$.

$$A_{cm} = \pi \cdot D_o^2 - \frac{\pi \cdot (D_r + 2c)^2}{4}, \quad (3.28)$$

Допустимі напруження зминання для бронзи приймемо рівними $[\sigma_{cm}] \approx 65H \cdot \text{мм}$.

$$D_o \geq \sqrt{\frac{4F}{\pi[\sigma_{cm}]}} + (D_r + c) = \sqrt{\frac{4 \cdot 30000}{\pi \cdot 65}} + (48 + 4) = 57,3\text{мм}$$

Приймаємо $D_o = 58\text{мм}$.

Перевірочний розрахунок висоти бурта гайки на зріз.

Висота бурта гайки приймається конструктивно [16]:

$$H_B = (0,25 \dots 0,35)H_r = 0,25 \cdot 63 = 16\text{мм},$$

$$\tau = \frac{F}{A_{cp}} \leq [\tau], \quad (3.29)$$

$$A_{cp} = \pi \cdot D_r \cdot H_B = \pi \cdot 48 \cdot 16 = 2412,7\text{мм}^2,$$

$$\tau = \frac{30000}{150} = 200\text{МПа}.$$

Допустиме напруження для бронзи [16]:

$$[\tau] = \frac{\tau_T}{[s]}, \quad (3.30)$$

де $[s] = 2$ – коефіцієнт запасу міцності.

Межа плинності на зріз для бронзи:

$$\tau_T = (0,6 \dots 0,7) \cdot \sigma_T = 325\text{МПа},$$

де $\sigma_T = 500H \cdot \text{мм}$ – межа текучості.

$$[\tau] = \frac{325}{2} = 162,5\text{МПа},$$

$$\tau = \frac{30000}{2412,7} = 12,43 \text{ МПа} \leq [\tau]$$

Умови міцності гайки на зріз виконують.

Перевірочний розрахунок різьби на зріз.

З урахуванням виробітку різьби приймають розподіл навантаження між витками – рівномірно.

$$\tau = \frac{F}{\pi \cdot d \cdot z \cdot b} \leq [\tau] \quad (3.31)$$

де $z = 10,5$ – кількість витків гайки;

$b = 0,75$ – товщина витка опорної різьби біля основи.

$$\tau = \frac{30000}{\pi \cdot 36 \cdot 10,5 \cdot 0,75} = 33,6 < [\tau]$$

Розрахунки на зріз витка задовольняють умову міцності.

Висновки. Розроблено кінематичну схему пристрою з врахуванням довжини кожної з ланок, ваги заготовок, типу використаного приводного пристрою, виду механічної передачі. Теоретично визначено номінальну вантажопідйомність при якій пристрій зберігає стійкість та точність рухів. Проведено проектний розрахунок гвинтової пари приводного механізму роботи. У нашому випадку гвинтова передача – це механічна передача, що перетворює обертальний рух у поступальний, чи навпаки. Перевірочні розрахунки гвинта та показали, що обраний варіант має достатню міцність та зносостійкість. Згідно розрахунків гвинт виготовляємо з покращеної Сталі 45, а гайку з безолов'яної бронзи БрА9ЖЗЛ.

РОЗДІЛ 4

ПРОЕКТУВАННЯ РОБОТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ

4.1. Проектування затискного пристрою

Здебільшого до затискних пристроїв висувають такі вимоги [17]:

- Надійність затиску та утримання об'єкта під час розгону та гальмування рухомих елементів ПР;

- Точність базування заготовки в губках захвату;
- Неприпустимість пошкодження або руйнування заготовки, що транспортується. При цьому особлива увага має бути звернена на перевірку допустимих для даного захватного пристрою контактних та згинальних напруг та моментів в місцях кріплення;
- Великий діапазон розмірів заготовок які можна використати без переналадки;
- Можливість автоматичної або швидкої заміни захватного пристрою;
- Компактність та простота конструкції.

У великому різноманітті відомих конструкцій затискних пристроїв їх можна класифікувати за такими основними ознаками [17]:

За типом деталей, що закріплюються:

- Для деталей типу валів;
- Для деталей типу фланців, дисків, шківів, зубчастих коліс тощо;
- Для деталей плоскої та прямокутної форми.

При виборі кінематичної схеми та конструкції затискного механізму необхідно обов'язково враховувати характер руху губок механізму. Для закріплення та надійного утримання та базування деталей круглої форми (вали, шків, диски та ін.) губки механізму можуть переміщатися як по радіусу, так і в плоско-паралельному напрямку, оскільки ці два переміщення практично не впливають на надійність закріплення та точність базування. У той же час при захопленні заготовок плоскої та прямокутної форми губки захоплення повинні переміщатися лише у плоско-паралельному напрямку. В іншому випадку не буде забезпечений правильний контакт губок механізму з поверхнями, що закріплюються.

За характером базування заготовок затискні механізми розрізняють [17]:

- Самоцентруючі механізми, що забезпечують точне положення осі або площини симетрії об'єкта, що захоплюється. У таких механізмах повинно забезпечуватися одночасне переміщення всіх губок у напрямку центру чи площині симетрії заготовки;

– Самобазуючі механізми, що визначають точне положення базової поверхні заготовки, що закріплюється. У цьому випадку одна з губок (базова) залишається нерухомою, а друга переміщається в напрямку до поверхні, що закріплюється;

– Самофіксуючі механізми, в яких зберігається точне положення об'єкта в момент його захоплення.

За кількістю робочих позицій затискні механізми можна поділити на:

– Багатопозиційні.

За характером роботи багатопозиційні затискні механізми можна поділити на три групи [17]:

- Послідовної дії;
- Паралельної дії;
- Комбінованої дії.

До затискних механізмів послідовної дії відносять двопозиційні пристрої, що мають завантажувальну та розвантажувальну позиції. Багатопозиційні затискні механізми паралельної дії мають декілька позицій для одночасного захоплення чи вивільнення групи деталей. Механізми комбінованої дії оснащені групами паралельно працюючих позицій, причому ці групи приводяться в дію незалежно одна від одної.

По робочому діапазону розмірів деталей що закріплюються, розрізняють такі затискні механізми [17]:

– Широкодіапазонні, що здатні до центрування та утримання заготовок деталей та об'єктів у широкому діапазоні розмірів поверхонь без переналагодження або підстроювання;

– Вузькодіапазонні, здатні до утримання об'єктів в обмеженому діапазоні розмірів поверхонь. При використанні вузькодіапазонних механізмів для скорочення часу переналагодження для переходу на інший вид деталей застосовують конструкції швидкозмінних або автоматично замінних затискних пристроїв.

За типом приводу розрізняють такі механізми [17]:

– З пневмоприводом, що використовує мережеве стиснене повітря з тиском 0,4 МПа. Такий тип приводу застосовують для закріплення об'єктів масою до 10 кг;

– З гідроприводом, який використовує спеціальну гідростанцію з робочим тиском олії від 3 до 12,5 МПа. Такий тип приводу доцільно застосовувати для захоплення великогабаритних важких об'єктів масою понад 20 кг;

– З електроприводом, який використовує малогабаритні електродвигуни постійного струму. Таким приводом оснащують захватні пристрої для деталей масою від 5 до 20 кг;

– Непривідні механізми, в яких деталі утримуються внаслідок ефекту самозатягування або замикаючої дії губок. Як правило, робота такого типу механізмів можлива при їх вертикальному положенні, при якому замикаюча дія забезпечується вагою об'єкта, що захоплюється.

Для цієї деталі має бути спроектований затискний механізм для деталей типу «вал». Схоплення має забезпечувати точне положення осі симетрії деталі. У таких механізмах має забезпечуватися одночасне переміщення всіх губок у напрямку площини симетрії, тому вибираємо центруючий схват.

Маса готової деталі становить 11,8 кг, тому привід використовуємо пневматичний, який використовує цеховий мережевий стиснене повітря тиском 0,4 МПа. Вбираємо схоплення з наступною схемою важільного механізму, наведеною на малюнку 4.1.

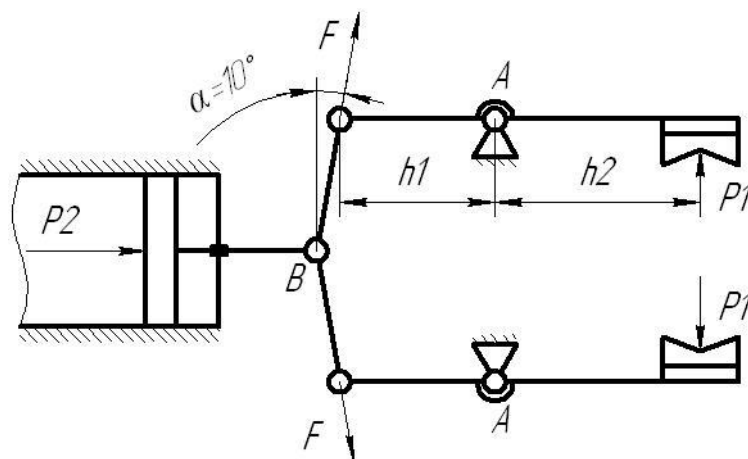


Рисунок 4.1 Розрахункова схема важільного механізму затискного пристрою

4.2. Розрахунок потрібного зусилля для утримання заготовки та приводного пневмоциліндра

Визначимо потрібне зусилля для утримання деталі, що транспортується, вважаючи, що утримання відбувається за рахунок сил тертя [18]:

$$P_1 = m \cdot (g + a) \cdot K_1 \cdot K_2, \quad (4.1)$$

де m – маса утримуваної заготовки: $m = 14,7 \text{ кг}$;

g – прискорення вільного падіння: $g = 9,8 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$;

a – прискорення центру мас під час транспортування: $a = 5 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$;

K_1 – коефіцієнт, що залежить від форми губок механізму, положення деталі по відношенню до губок механізму та напрямки дії сили тяжіння: $K_1 = 0,5$;

K_2 – коефіцієнт запасу міцності: $K_2 = 1,5 \dots 2$.

$$P_1 = 14,7 \cdot (9,8 + 5) \cdot 0,5 \cdot 2 = 217,56 \text{ Н}$$

Співвідношення між силами P_1, P_2 та F на губках захватного пристрою визначають із умови статичної рівноваги системи.

З умов $\sum F = 0$ в точці В матимемо [18]:

$$2F \cdot \sin \alpha - P_2 = 0, \quad (4.2)$$

$$F = \frac{P_2}{2 \sin \alpha}, \quad (4.3)$$

З умов $\sum M = 0$ відносно А матимемо [18]:

$$P_1 \cdot h_2 - F \cdot \cos \alpha \cdot h_1 = 0, \quad (4.4)$$

$$F = \frac{P_1 \cdot h_2}{h_1 \cdot \cos \alpha}. \quad (4.5)$$

З конструктивних міркувань приймаємо $h_1 = 100 \text{ мм}$, $h_2 = 120 \text{ мм}$. тоді

$$F = \frac{217,56 \cdot 120}{100 \cdot \cos 10^\circ} = 265,1 \text{ Н},$$

$$P_2 = 2F \sin \alpha = 2 \cdot 265,1 \cdot \sin 10^\circ = 92,07H.$$

Розрахуємо необхідний діаметр циліндра за формулою [18]:

$$D_{ц} = \sqrt{\frac{4P_2}{0,75 \cdot \pi \cdot p \cdot \eta}}, \quad (4.6)$$

де p – тиск повітря в системі: $p = 0,4МПа$;

η – коефіцієнт корисної дії: $\eta = 0,85$.

Тоді:

$$D_{ц} = \sqrt{\frac{4 \cdot 92,07}{0,75 \cdot \pi \cdot 0,4 \cdot 0,85}} = 21,44мм.$$

Для пневмоциліндра приймаємо із стандартного ряду: $D_{ц} = 25мм$.

Сила на штоку при подачі повітря в безштокову порожнину (робочий хід):

$$Q_{шш} = 0,785 \cdot D_{ц}^2 \cdot p \cdot \eta; \quad (4.7)$$

$$Q_{шш} = 0,785 \cdot 25^2 \cdot 0,4 \cdot 0,85 = 166,81H.$$

4.3. Визначення зусиль в елементах затискного механізму та його конструктивних параметрів

Зусилля, що діє на шарнір А знаходимо із суми проекцій сил на осі X та Y [19]:

$$\Sigma F_x = F \cdot \sin \alpha - F_{Ax} = 0, \quad (4.8)$$

$$F_{Ax} = F \cdot \sin \alpha, \quad (4.9)$$

$$F_{Ax} = 265,1 \cdot \sin 10^\circ = 46H. \quad (4.10)$$

$$\Sigma F_y = F \cdot \cos \alpha + P1 - F_{Ay} = 0, \quad (4.11)$$

$$F_{Ay} = F \cdot \cos \alpha + P1 = P1 \left(1 + \frac{h2}{h1} \right), \quad (4.12)$$

$$F_{Ay} = 217,56 \left(1 + \frac{120}{100} \right) = 478,632H, \quad (4.13)$$

Сумарне навантаження в шарнірі А [19]:

$$F_A = \sqrt{F_{Ax}^2 + F_{Ay}^2}; \quad (4.14)$$

$$F_A = \sqrt{46^2 + 478,632^2} = 480,84H. \quad (4.15)$$

Діаметр шарнірів вибираємо з розрахунку на зріз [19]:

$$d_{ш} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_A}{\pi \cdot [\tau_{cp}]}}; \quad (4.16)$$

де $[\tau_{cp}]$ - допустиме напруження зрізу для сталі 45 $[\tau_{cp}] = 120 \text{ МПа}$.

$$d_{ш} = \sqrt{\frac{4 \cdot 480,84}{\pi \cdot 120}} = 2,56 \text{ мм}.$$

Такий розмір шарнірів дуже малий. Конструктивно приймаємо $d_{ш} = 12 \text{ мм}$ і $d_{ш} = 16 \text{ мм}$

Перевіряємо шарніри на зминання, приймаючи допустиму напругу на зминання для сталі 45 $[\sigma_{см}] = 80 \text{ МПа}$ [19]:

$$\sigma_{см} = \frac{2 \cdot F_A}{\pi \cdot d_{ш} \cdot b}; \quad (4.17)$$

де $b = 36 \text{ мм}$ – принята ширина шарніра.

$$\sigma_{см} = \frac{2 \cdot 480,84}{\pi \cdot 12 \cdot 36} = 0,71 \text{ МПа} \ll 80 \text{ МПа},$$

4.4. Конструкція та розрахунок затискних губок

Затискні губки контактують з деталлю і від їхньої конструкції багато в чому залежить точність і надійність роботи затискного механізму. При конструюванні слід враховувати, що на губки діють значні зусилля і сили інерції, які зрушують губки зі свого місця. З іншого боку, губки мають забезпечити найбільшу силу тертя. Це дозволить зменшити розміри елементів затиску. Тому в конструкції кріплення губок необхідно передбачити їх жорстку фіксацію, виконання робочої поверхні губок з високою твердістю та можливістю їх швидкої та легкої заміни.

Розміри губок визначають, виходячи з розрахунку на контактну міцність [20]:

$$\sigma = 0,418 \sqrt{\frac{2 \cdot P_1 \cdot E_{np}}{l \cdot d}}, \quad (4.18)$$

де $E_{np} = \frac{2 \cdot E_r \cdot E_d}{E_r + E_d}$ - наведений модуль пружності матеріалу губок пристрою та матеріалу деталі; $E_r = 2,15 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ (сталь 40Х), $E_d = 2,12 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ (сталь 35Л);

d – діаметр деталі;

l – ширина губок механізму;

$\sigma = 650 \text{ МПа}$ (сталь 40Х).

$$E_{np} = \frac{2 \cdot 2,15 \cdot 10^5}{2,15 \cdot 10^5 + 2,12 \cdot 10^5} = 2,13 \cdot 10^5 \text{ МПа};$$

Ширина затискних губок [20]:

$$l = \frac{2 \cdot 0,418^2 \cdot P_1 \cdot E_{np}}{d + \sigma^2}; \quad (4.19)$$

$$l = \frac{2 \cdot 0,418^2 \cdot 217,56 \cdot 2,13 \cdot 10^5}{50 \cdot 650^2} = 0,76 \text{ мм}.$$

Такий розмір губок конструктивно дуже малий. Приймаємо $l = 55 \text{ мм}$.

Висновки. Обрано кінематичну схему конструкції затискного механізму роботизованого комплексу. При цьому було враховано характер руху затискних губок механізму та їх матеріал. Базування деталі в пристрої забезпечує її точне позиціонування. Як привідний механізм застосовано пневмопривід. Визначено потрібне зусилля для утримання заготовки. Спроектовано спеціальні затискні губки механізму для уникнення пошкоджень деталей та одночасно забезпечення жорсткої фіксації її.

ВИСНОВКИ

Під час виконання кваліфікаційної роботи магістра було вирішено важливе технічне завдання – зменшено час виготовлення деталі вал-шестерня за рахунок оптимізації технологічного процесу виготовлення з використанням роботизованого комплексу та верстатів з ЧПУ.

Після аналізу базового технологічного процесу виготовлення деталі було внесено деякі зміни. Повністю розглянуто обробку чорнової та чистової токарної операцій. З метою скорочення витрат було впроваджено промисловий робот на токарні операції. Це дозволило підвищити автоматизацію виробництва деталі. Фрезерний верстат замінений на фрезерний з ЧПУ, що також дозволяє підвищити рівень автоматизації.

Токарна операція для чорнової обробки об'єднана в одну операцію із двома установками. Математичним моделюванням визначено оптимальні режими точіння за заданих умов обробки. Таким чином було досягнуто скорочення основного часу переходів та скорочення основного часу операції на 38% для 010-ї операції.

Розроблено кінематичну схему пристрою з врахуванням довжини кожної з ланок, ваги заготовок, типу використаного приводного пристрою, виду механічної передачі. Теоретично визначено номінальну вантажопідйомність при якій пристрій зберігає стійкість та точність рухів. Проведено проектний розрахунок гвинтової пари приводного механізму робота. У нашому випадку гвинтова передача – це механічна передача, що перетворює обертальний рух у поступальний, чи навпаки. Перевірочні розрахунки гвинта показали, що обраний варіант має достатню міцність та зносостійкість. Згідно розрахунків гвинт виготовляємо з покращеної Сталі 45, а гайку з бронзи БрА9ЖЗЛ.

Обрано кінематичну схему конструкції затискного механізму роботизованого комплексу. При цьому було враховано характер руху затискних губок механізму та їх матеріал. Базування деталі в пристрої забезпечує її точне позиціонування. Як привідний механізм застосовано пневмопривід. Визначено потрібне зусилля для утримання заготовки. Спроектовано спеціальні затискні губки механізму для уникнення пошкоджень деталей та одночасно забезпечення жорсткої фіксації її.

Токарні чорнова та чистова операції були автоматизовані автоматичним завантаженням деталі на верстат – був розроблений РТК, де промисловий робот обслуговує три токарні верстати, здійснює переверот деталі у верстаті та подачу деталі на транспортер для подальшої обробки. Це дозволяє звільнити людину від монотонної праці, підвищити продуктивність, скоротити витрати на обробку.

Також для повної автоматизації токарної операції в верстат 16К20Ф3 було вбудовано прилад активного контролю деталей лазерного сканера нового покоління - Kreon AQUILON. Висока точність ($\pm 0,005\text{мм}$) даного сканера дозволяє використовувати його в завданнях, для яких раніше лазерне сканування було не застосовним через високі вимоги до точності.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Технологічні основи машинобудування. [Електронний ресурс]: підручник для студ. спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування» / С.С. Добрянський, Ю.М. Малафєєв; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 13,4 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 379 с.

2. Основи технології виробництва машин : навчальний посібник / Г. П. Кремнев, В. М. Колеснік, Ф. В. Новіков, В. О. Жовтобрюх. Дніпро : ЛІРА, 2022. 136 с.

3. Цвіркун Л.О., Омельченко О.В. Взаємозамінність, стандартизація і технічні вимірювання: навч. посіб. Кривий Ріг: ДонНУЕТ, 2022. 117 с.

4. Технологія оптичного приладобудування. Конспект лекцій [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад. Г. С. Тимчик. – Електронні текстові дані (1 файл 4,06 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 185 с

5. Яковенко І. Е., Пермяков О. А., Фесенко А. В. Технологічні основи машинобудування: навчальний посібник для студентів спеціальностей 131 – Прикладна механіка, 133 – Галузеве машинобудування / І. Е. Яковенко, О. А. Пермяков, А.В. Фесенко – Харків: НТУ «ХПІ», 2022. – 421с

6. Сапон С.П. Основи технології машинобудування. [Методичні рекомендації до виконання курсового проєкту для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 131 Прикладна механіка за освітньо-професійною програмою «Технології машинобудування» всіх форм навчання.] / С.П. Сапон. – 2-ге вид., перероб. і доповн. – Чернігів: НУЧП, 2022. – 62 с.

7. Технологія машинобудування. Методичні рекомендації до виконання курсового проєкту для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності 131 – Прикладна механіка за освітньо-професійною програмою

«Технології машинобудування» всіх форм навчання. – 2-ге вид., перероб. і доповн. – Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2022. – 97 с.

8. М. В. Філіппова, Д. М. Проскуренко, О. В. Третяк, М. О. Демченко, “Автоматизоване планування послідовності складання”, Енергетика і автоматика, № 5, 2021. 28-44 с.

9. Погребняк Р. Структура механізмів : навч. посібник / Р. Погребняк – Дніпро: «Журфонд», 2024. – 156 с

10. Погребняк Р. П. Раціональний кінематичний синтез і структурний аналіз центрального прямолінійно-напрямного кривошипно-повзункового механізму захоплювального пристрою. Підйомно-транспортна техніка. - 2023. - № 1(68). - С. 56–70.

11. Калязін Ю. В. Технічна механіка: Навчально-методичний посібник до самостійної роботи / Калязін Ю. В., – Полтава: ПП «Астроя», 2021. – 204 с.

12. Системи автоматизованого проєктування. Конспект лекцій [Електронний ресурс]: навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп’ютерно-інтегровані технології виробництва приладів» спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад. К. С. Барандич, О. О. Подолян, М. М. Гладський. – Електронні текстові дані (1 файл 3,13 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 97 с. – Назва з екрана. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45614>

13. MAthematical methods and models of technical and economic systems international scientific-technical conference dedicated to the memory of Prof. Shabljiy Oleh Mykolayovych and the 60th anniversary of the Theoretical Mechanics Department, (Ternopil, 22–23 november 2022.) / Ministry of Science and Education of Ukraine, Ternopil I. Puluji National Technical University [and others]. – Ternopil: PE Palianytsia V. A., 2022. – 166 p.

14. В.Г. Житарюк, А.В. Мотрич. Механізми: аналіз та дослідження Навчальний посібник до лабораторного практикуму. – Чернівці: Рута, 2021. 94 с

15. Теорія механізмів і машин. Синтез і аналіз механізму приводу. Навчальний посібник з кредитного модуля/ Укладач Кірієнко О.А. – К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2022. –88с.

16. Невдаха Ю. А., Пирогов В. В. Методичні вказівки по деталях машин з лабораторної роботи № 8. Дослідження втрат в різьбовому з'єднанні [електронний ресурс]. – Кропивницький: ЦНТУ, 2022. – 20 с.

17. Яковенко І. Е., Пермяков О. А. Технологічна оснастка. Розрахунки. Проектування: навчальний посібник для студентів спеціальностей 131 – Прикладна механіка, 133 – Галузеві машинобудування /І. Е. Яковенко, О. А. Пермяков – Харків : НТУ «ХП», 2024. – 233с.

18. Кушніров П. В. Технологічна оснастка: навчальний посібник / П. В. Кушніров, А. В. Євтухов, І. М. Дегтярьов. – Суми : Сумський державний університет, 2020. – 140 с.

19. Технологічні основи машинобудування. [Електронний ресурс]: підручник для студ. спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування» / С.С. Добрянський, Ю.М. Малафєєв; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 13,4 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 379 с.

20. Strutinskyi S. Investigation of the accuracy of the manipulator of the robotic complex constructed on the basis of cycloidal transmission /S. Strutinskyi, R. Semenchuk/ Technology audit and production reserves /Vol. 4 No. 1(60) (2021): Industrial and technology systems.