

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАТРОНИКИ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЇ МЕХАНІКИ ТА МАШИН

Пояснювальна записка
до бакалаврського дипломного проєкту

на тему: РОБОТОТЕХНІЧНИЙ ПРИСТРІЙ
ДЛЯ РОЗВАНТАЖЕННЯ МІЖЦЕХОВОГО
ТРАНСПОРТУ РПРМТ

Виконав: студент 4 курсу,
Групи: БДПМск-19
спеціальність: Прикладна механіка
Апанасенко Я.А.
Керівник: Ковальов Ю.А.
Рецензент: Плешко С.А.

Київ-2021

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
ДИЗАЙНУ

Факультет _____ Мехатроніки та комп'ютерних технологій
Кафедра _____ Прикладної механіки та машин
Спеціальність _____ 131 Прикладна механіка
Освітня програма _____ Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

прикладної механіки та машин

_____ Манойленко Олександр Петрович

« _____ » _____ 2021 року

ЗАВДАННЯ

НА БАКАЛАВРСЬКИЙ ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ СТУДЕНТУ

_____ Апанасенко Ярослав _____

1. Тема дипломного проекту: **Робототехнічний пристрій для розвантаження міжцехового транспорту РПРМТ**

Керівник проекту _____ Ковальов Юрій Адиславович, к.т.н., доцент,

затверджені наказом вищого навчального закладу від “15” 03 2021 р.
№75-уч.

2. Строк подання студентом проекту 12.06.2021 року

3. Вихідні дані до проекту: Проаналізувати конструкції існуючих систем подачі ниток на шкарпеткових автоматах; визначити напрямки їх удосконалення; запропонувати нову конструкцію ниткоподавача з накопичувачем ниток; розрахувати частоту включення ниткоподавача.

4. Зміст дипломної роботи (перелік питань, які потрібно розробити) Розділ 1. Стан питання щодо конструкцій систем подачі ниток на шкарпеткових автоматах. Розділ 2. Структурний та параметричний синтез системи пасивної подачі ниток. Розділ 3. Проєктування подавача ниток з індивідуальним приводом. Мета та завдання, актуальність та новизна роботи. Огляд сучасного стану систем подачі ниток на шкарпеткових автоматах. Запропонувати та розрахувати ниткоподавач з функцією накопичення ниток.

5. Дата видачі завдання 15.03.2021 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Терміни виконання етапів	Примітка про виконання
1	Вступ	05.05.2021 р.	
2	Розділ 1 Промислові роботи	10.05.2021 р.	
3	Розділ 2 Розробка компоновки РТК	17.05.2021 р.	
4	Висновки	24.05.2021 р.	
5	Оформлення дипломної роботи (чистовий варіант)	27.05.2021 р.	
6	Здача дипломної роботи на кафедру для рецензування (за 14 днів до захисту)	31.05.2021 р.	
7	Перевірка дипломної роботи (проекту) на наявність ознак плагіату (за 10 днів до захисту)	05.06.2021 р.	
8	Подання дипломної роботи на затвердження завідувачу кафедри (за 7 днів до захисту)	07.06.2021 р.	

Студент

(підпис)

Я.А. Апанасенко

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник
роботи

(підпис)

Ю.А. Ковальов

(ініціали та прізвище)

Рецензент

(підпис)

С.А. Плешко

(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Апанасенко Я.А Робототехнічний пристрій для розвантаження міжцехового транспорту РПРМТ. – Рукопис.

Дипломна бакалаврська робота за спеціальністю 131. Прикладна механіка. – Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, 2021 рік.

Дипломну бакалаврську роботу присвячено актуальним питанню проектування робототехнічного пристрою для розвантаження міжцехового транспорту РПРМТ.

Метою роботи є систематизація і узагальнення напрямків проектування робототехнічного пристрою для розвантаження міжцехового транспорту РПРМТ, їх удосконалення, ознайомлення з основними положеннями розв'язку задач по забезпеченню розвантаженню. В були розглянуті наступні завдання: структура промислових роботів; системи керування промислових роботів; основні технічні показники промислових роботів; розробка технічних вимог та визначення основних параметрів робота; кінематичне дослідження маніпулятора; визначення похибки позиціонування точки D захвату; динамічний розрахунок виконавчих механізмів маніпуляторів; вибір параметрів приводу висунення штанги руки маніпулятора; розрахунок захвату.

Представлені практичні рекомендації дозволяють обґрунтовано приймати раціональні конструкторські рішення в робототехнічних пристроях для міжцехового транспорту.

Бакалаврська робота об'ємом в 48 сторінок складається з вступу, трьох розділів, висновків та списку використаної літератури. Кількість рисунків в роботі – 9, таблиць – 4, бібліографія – 43 позицій.

Ключові слова: проектування, розрахунки, робототехнічний пристрій, розвантаження.

SUMMARY

Apanasenko JA Robotic device for unloading of inter-shop transport RPRMT. - Manuscript.

Thesis undergraduate specialty 131. Applied Mechanics. - Kyiv National University of Technology and Design, Kyiv, 2021.

Thesis is devoted to the topical issue of designing a robotic device for unloading inter-shop transport RPRMT.

The purpose of the work is to systematize and generalize the directions of design of the robotic device for unloading of inter-shop transport of RPRMT, their improvement, acquaintance with the basic provisions of the decision of problems on maintenance of unloading. The following tasks were considered: the structure of industrial robots; control systems for industrial robots; basic technical indicators of industrial robots; development of technical requirements and definition of the basic parameters of work; kinematic study of the manipulator; determining the positioning error of the capture point D; dynamic calculation of actuators of manipulators; selection of parameters of the drive of extension of a bar of a hand of the manipulator; capture calculation.

The presented practical recommendations allow to make reasonable design decisions in robotic devices for inter-shop transport.

The 48-page undergraduate thesis consists of an introduction, three chapters, conclusions, and a list of references. Number of figures in the work - 9, tables - 4, bibliography - 43 items.

Key words: design, calculations, robotic device, unloading.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ПРОМИСЛОВІ РОБОТИ	5
1.1. Структура промислових робіт	5
1.2. Системи керування промислових робіт	8
1.3 Основні технічні показники промислових робіт	12
Висновки до розділу 1	17
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА КОМПОЗОВКИ РТК	18
2.1. Розробка та проектування РТК	18
2.2. Розробка технічних вимог та визначення основних параметрів роботи	20
2.3 Кінематичне дослідження маніпулятора	22
2.4 Визначення похибки позиціонування точки D захвату	30
2.5 Динамічний розрахунок виконавчих механізмів маніпуляторів	34
2.6 Вибір параметрів приводу висунення штанги руки маніпулятора	39
2.7 Розрахунок захвату	43
Висновки до розділу 2	44
ВИСНОВКИ	45
Література	46
Додатки	50

ВСТУП

Сучасні логістичні системи широко використовують обладнання на основі мехатронних пристроїв, таких як автоматизовані маніпуляційні системи, транспортні роботи, автоматично керовані транспортні засоби, транспортно-розподільне обладнання, засоби ідентифікації та визначення параметрів об'єктів, тощо. Для дослідження мехатронних систем на основі мехатронних пристроїв часто використовуються стенди, що складаються з діючих макетів, і дозволяють створити моделі мехатронних систем з метою проведення навчання та дослідження таких систем [1-5]. Існують різні підходи до створення таких стендів. Так, наприклад, фірма Festo Didactic має стенди, що по своїм характеристикам близькі до промислового обладнання [1]. Фірма fischertechnik має великий набір різних стендів, що створюються з деталей у вигляді конструктора, і можуть об'єднуватись у досить складні виробничі та логістичні системи [3]. Основним недоліком таких систем є досить велика вартість обладнання, тому була поставлена задача провести аналіз існуючих засобів дослідження логістичних систем і в результаті цього аналізу визначити мету та задачі, які вирішують стенди для дослідження мехатронних пристроїв логістичних систем, обрати складові компоненти та елементну базу для створення таких систем.

1. ПРОМИСЛОВІ РОБОТИ

1.1 Структура промислових робіт

Механічна система (маніпулятор) – це механізм, який автоматично відтворює функції руки (ноги) людини при виконанні виробничих операцій шляхом переміщення об'єкта в просторі; Система програмного керування (ЕОМ); Інформаційна система.

По степені досконалості і типам систем керування промислові роботи поділяються на три покоління:

- Перше покоління – програмні роботи (промислові), які працюють за жорсткими програмами. Вони широко застосовуються в машинобудуванні.
- Друге покоління – адаптивні роботи, які працюють за гнучкими програмами і змінюють характер робіт в залежності від зміни параметрів зовнішнього середовища.

Класифікація маніпуляторів

Класифікуються маніпулятори за такими ознаками:

1. За характером виконуючих робіт:
 - універсальні;
 - спеціальні.
2. За способом керування:
 - з ручним управлінням (копіюючі);
 - з автоматичним управлінням (по програмі ЕОМ).

Універсальні маніпулятори застосовуються для виконання підйомно-транспортних робіт в машинобудуванні, а також для механізації операцій по обслуговуванню технологічного обладнання (установки і знімання деталей на металорізальних верстатах, зварочні і свердлильні операції). Спеціальні маніпулятори застосовуються: в ковальсько-пресових цехах; в ливарному виробництві.

Працездатність маніпуляторів характеризується рядом технічних показників: робочий об'єм, маневреність, кут і коефіцієнт сервісу, число ступенів свободи, вантажопідйомність, швидкість руху, енергетичні показники.

Автооператори

Автооператор – це маніпулятор, який застосовується в машинах-автоматах, які працюють по жорсткій програмі і оперують штучними об'єктами по загальному циклу машини. Програмоносіями для автооператорів служать кулачки, перфострічки, магнітні стрічки.

Області застосування автооператорів:

- Автооператор заливщик для машин литва під тиском.
- Автооператор для змазки прес-форм машин литва під тиском.
- Автооператор для обслуговування листоштамповочних пресів.
- Автооператор для установки і знімання деталей при обслуговуванні металорізальних верстатів.

Захватні пристрої маніпуляторів служать для захвату і утримання в певному (конкретному) положенні об'єктів маніпулювання. Ці об'єкти можуть мати різні розміри, форму, масу і характеризуватися різними фізичними властивостями. Прикладами захватних пристроїв є монтажні інструменти (тиски, ключі та ін.). До захватних пристроїв ставляться певні вимоги: загального характеру і спеціальні, зв'язані з конкретними умовами праці. До числа обов'язкових вимог відносяться: надійність захвату і утримання об'єкту, стабільність базування, недопустимість пошкоджень або руйнування об'єктів, міцність деталей захватних пристроїв.

Спеціальні вимоги: можливість захвату і базування деталей в широкому діапазоні (маси, розмірів і форми), легкість і швидкість заміни елементів захватних пристроїв, необхідність автоматичної зміни зусиль утримання об'єкта в залежності від його маси.

1.2 Системи керування промислових роботів

Системи керування класифікують за такими ознаками:

1. За способом позиціонування:
 - позиційні (малоточкові, багатоточкові);
 - контурні;
 - комбіновані
2. За видом енергоносія:
 - механічні;
 - гідропневматичні;
 - електричні.
3. За способом представлення (подання) інформації:
 - електромеханічні;
 - числові;
 - гібридні
 - циклові;
 - аналогові;
4. За типом програмоносія:
 - з перфострічкою;
 - з магнітним барабаном;
 - з оптичним диском;
 - з магнітною стрічкою;
 - з магнітним диском (дискета);
5. За об'єктом інформації в управляючій програмі:
 - жорстко програмні;
 - адаптивні.
6. За способом програмування:
 - методом розрахунку (складання програм);
 - методом навчання;
 - самонавчасмі.

У позиційних систем управління задаються початкові і кінцеві положення робочих органів. В малоточкових – число точок позиціювання – до 10. Багатоточкових – до 100.

Види систем керування:

1. Автономна.
2. Комплексна.
3. Багаторівнева.

Інформаційна система

Інформаційні системи в значній мірі визначають функціональні можливості промислових роботів, складність задач, експлуатаційну надійність і ефективне використання їх в виробничих умовах, а також вони являються важливими ланками в забезпеченні безпеки обслуговуючого персоналу.

Класифікація промислових робіт



Промислові роботи класифікуються за такими ознаками:

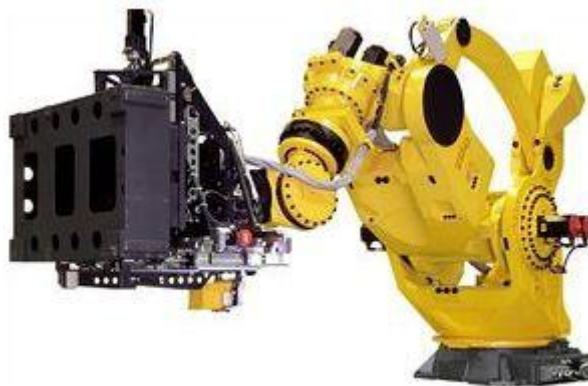
1. За характером виконуваних технологічних операцій:
 - технологічні – промислові роботи, які виконують основні операції технологічного процесу;
 - допоміжні – промислові роботи, які виконують допоміжні операції щодо обслуговування основного технологічного устаткування і транспортно-складської системи;

- універсальні – промислові роботи, які виконують різні операції.
2. За видом виробництва:
- ливарні;
 - зварювальні;
 - ковальсько-пресові;
 - фарбувальні;
 - транспортно-складські тощо.
3. За системою координат руки маніпулятора:
- прямокутна (плоска та просторова);
 - полярна і циліндрична;
 - сферична;
 - ангулярна (кутова) (плоска, циліндрична та сферична).
4. За вантажопідйомністю:
- надлегкі (0,08; 0,16; 0,32; 0,40; 0,50; 0,63; 0,80; 1,0 кг);
 - легкі (1,25; 1,60; 2,0; 2,50; 3,2; 4,0; 5,0; 6,3; 8,0; 10,0 кг);
 - середні (12,5; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0; 63,0; 80,0; 100,0; 125,0; 160,0; 200,0 кг);
 - важкі (250; 320; 400; 500; 630; 800; 1000 кг);
 - надважкі (1250; далі значення обирають з ряду R10 за ГОСТ 8032-84 [9]).
5. За типом силового приводу:
- роботи з електромеханічними приводами;
 - роботи з пневматичними приводами;
 - роботи з гідравлічними приводами;
 - роботи з комбінованими приводами.
6. За видом програми:
- жорстко програмовані – промислові роботи, які не мають пристрою швидкої зміни програми;

- гнучко програмовані – промислові роботи, які мають пристрій швидкої зміни програми;
- адаптивні – промислові роботи, які здійснюють свої дії на підставі інформації про об'єкти і явища зовнішнього середовища, отримуваної в процесі роботи;
- інтелектуальні – промислові роботи, що здатні самостійно планувати свою поведінку залежно від поставленого завдання, критеріїв якості, власного стану і стану зовнішнього середовища.

7. За характером керування:

- позиційні;
- контурні;
- комбіновані.



Складальний промисловий робот

1.3 Основні технічні показники промислових роботів

До технічних показників відносяться:

- номінальна вантажопідйомність;
- робочий простір (простір, в якому може знаходитися виконавчий (робочий) механізм робота при його функціонуванні);
- зона обслуговування (частина робочого простору, в якій може виконувати роботу промисловий робот);

- число ступенів рухомості (залежить від його конструкції ходового пристрою (від 1 до 3));
- швидкість переміщення;
- похибка позиціонування робочого органу і похибка траєкторії робочого органу (похибка позиціонування робочого органу – відхилення реального положення робочого органу від заданого програмою; відхилення траєкторії робочого органу від заданої програмою називається похибкою траєкторії).

Вантажопідйомність – найбільше значення маси об'єктів маніпулювання, включаючи і масу робочого органу, які можуть переміщатися “рукою” при заданих умовах. Для промислового робота з багатьма руками вантажопідйомність визначають як суму вантажопідйомності всіх його “рук”. Для деяких типів промислових робіт важливим показником є зусилля (або крутний момент), яке розвивається виконавчим механізмом. До числа таких показників можна віднести зусилля затиску об'єкта маніпулювання захоплювальним пристроєм, робоче зусилля “руки” промислового робота уздовж її поздовжньої осі, крутний момент при ротації захоплювального пристрою.

За величиною вантажопідйомності промислові роботи поділяють на надлегкі (до 1 кг), легкі (понад 1 до 10 кг), середні (понад 10. До 200 кг), важкі (понад 200 до 1000 кг), надважкі (понад 1000 кг). В даний час випускається до 73% моделей промислових робіт легкого і середнього типу з вантажопідйомністю від 5 до 80 кг.

Число ступенів рухливості визначають як суму можливих координатних рухів його робочого органу або об'єкта маніпулювання щодо опорної системи. Для деяких типів додатково враховують число ступенів рухливості захоплювального пристрою, рівне числу ступенів вільності всіх його ланок щодо вузла кріплення до “руки” робота. Серед

ступенів рухливості окремого маніпулятора слід розрізняти переносні і орієнтують.

За ступенем рухливості промислові роботи розділяють на три групи: малу (до 3-х ступенів рухливості); середню (4-6 ступенів рухливості) і високу рухливість б(понад 6 ступенів). Число ступенів рухливості промислового робота значною мірою визначає його універсальність. Сучасні промислові роботи мають зазвичай від 2 до 7 ступенів рухливості: найпростіші -1 – 2; найбільш складні – 7, іноді і більше. У структурі сучасного світового парку промислових роботів переважають конструкції з 4 і 5 ступенями рухливості (67%).

Величини і швидкості переміщення робочого органу з кожного ступеня рухливості характеризують геометрію робочого простору промислового робота, а також особливості руху та орієнтації об'єкта який переносимо та для рухливих роботів крім робочої зони в якості характеристики розглядається також робоче простір, визначаються кінематичною схемою маніпулятора промислового робота і можливостями приводу. Величини переміщень по лінійним координатам задаються в метрах, за кутовими – в градусах або радіанах; відповідно швидкості виражаються в метрах в секунду для лінійних і градусах або радіанах в секунду – для кутових координат. За величиною лінійного переміщення, або ходу робочого органу, розрізняють промислові роботи з малим (до 300 мм), середнім (понад 300 до 1000 мм) і великим ходом (понад 1000 мм).

Швидкість переміщень ланок маніпулятора характеризують важливу якість промислового робота – швидкодію, від якого залежить час обслуговування технологічного устаткування. Зазвичай швидкості лінійних переміщень робочих органів маніпуляторів не перевищують 1,0 – 1,5 м/с, хоча є окремі роботи зі швидкостями до 9 м/с. Швидкості кутових переміщень робочих органів переважно знаходяться в межах від 15 до 360 град/с (від 0,25 до 6,3 рад/с).

Робоча зона промислових роботів – це простір, в якому може знаходитися робочий орган при його функціонуванні. Вона характеризується своїми формою (або видом) і обсягом.

Форма, або вид робочої зони, просторова фігура, описувана робочим органом промислових роботів при проходженні ним гранично досяжних положень. Вид робочої зони обумовлений призначенням промислового робота і визначається числом ступенів рухливості маніпулятора, типом і взаємної орієнтацією кінематичних пар в просторі і відносними розмірами ланок маніпуляційної системи.

Обсяг робочої зони (або робочий об'єм) – це обсяг простору, в межах якого може переміщатися робочий орган промислового робота при його функціонуванні, вимірюється в метрах кубічних і дозволяє судити про масштаб ручної праці, доступного промислового роботу. За величиною обслуговується робочого об'єму всі роботи можна розділити на п'ять класів.

Найбільшого поширення в даний час отримали середні промислові роботи (45%), на другому місці малі (30%), потім великі (12%), міні-роботи (9%) і, нарешті, мікророботи (4%). в якому може знаходитися виконавчий пристрій при його функціонуванні. Воно визначається без урахування габаритних розмірів об'єкта маніпулювання. Іншою характеристикою простору функціонування промислового робота є зона обслуговування, в якій робочий орган виконує свої функції відповідно до призначення робота і встановленими значеннями його характеристик. При спільній роботі декількох промислових роботів як характеристики робототехнічного комплексу розглядається зона спільного обслуговування – частина простору, в якому переміщення об'єкта маніпулювання можуть виконуватися кількома промисловими роботами.

Похибка позиціонування, або відпрацювання траєкторії – це відхилення фактичного положення (або траєкторії) робочого органу від

заданого програмою при багаторазовому позиціюванні (повторенні руху), яке оцінюється в лінійних або кутових одиницях. Похибка позиціювання, або відпрацювання, траєкторії може розглядатися як в цілому для робочого органу (сумарна), так і для окремих виконавчих механізмів промислових роботів.

У характеристиках промислового робота *точність позиціювання* вказується в абсолютних одиницях, однак для порівняльної оцінки різних роботів і визначення їх типів з точки зору ступеня їх точності такий показник неприйнятний, оскільки не пов'язаний з геометричними параметрами робочої зони. Тому в основу визначення типу промислового робота за показником точності покладена відносна похибка позиціювання, або відпрацювання траєкторії.

Відносна похибка позиціювання – величина, що характеризує точність роботів з цикловим і позиційним керуванням і рівна відношенню абсолютної похибки позиціювання до максимального віддалі від осі найближчої до основи робота кінематичної пари до кордону робочої зони, виражена у відсотках.

Типи промислових роботів

Вибір типу привода залежить від функціонального призначення промислового робота, умов експлуатації, вантажопідйомності, динамічних характеристик і виду системи керування.

Класифікація приводів:

1. В залежності від виду енергії, яка використовується для руху робочого механізму привода: пневматичні, гідравлічні, електромеханічні і комбіновані.
2. За способом відліку координат:
 - з відносним відліком координат — по приростам (кроковий двигун);

- з абсолютним відліком координат (електропривод з зворотнім зв'язком).

Висновки до розділу 1

Різні аспекти застосування промислових роботів розглядаються, як правило, в рамках типових проектів промислового виробництва: виходячи з наявних вимог, вибирається оптимальний варіант, в якому конкретизований необхідний для даної задачі тип роботів, їх кількість, а також вирішуються питання інфраструктури харчування (силові підводки, подача охолоджуючої рідини – у разі використання рідинного охолодження елементів оснащення) та інтеграції у виробничий процес (забезпечення заготовками/напівфабрикатами і повернення готового продукту в автоматичну лінію для передачі наступній технологічній операції).

Промислові роботи у виробничому процесі здатні виконувати основні і допоміжні технологічні операції.

До основних технологічних операцій належать операції безпосереднього виконання формоутворення, зміни лінійних розмірів заготовки та ін.

До допоміжних технологічних операціям ставляться транспортні операції в тому числі операції з завантаження та вивантаження технологічного обладнання.

2. РОЗРОБКА КОМПОНОВКИ РТК

2.1 Розробка та проектування РТК

Автоматизації підлягає обробка деталі типу «Прокладка».

В якості основного обладнання вибираємо прес.

В якості допоміжного обладнання вибираємо магазини з заготовками і готовими деталями.

Для обслуговування преса вибираємо робота для підлоги конфігурації, що визначає радіальне розташування обладнання.

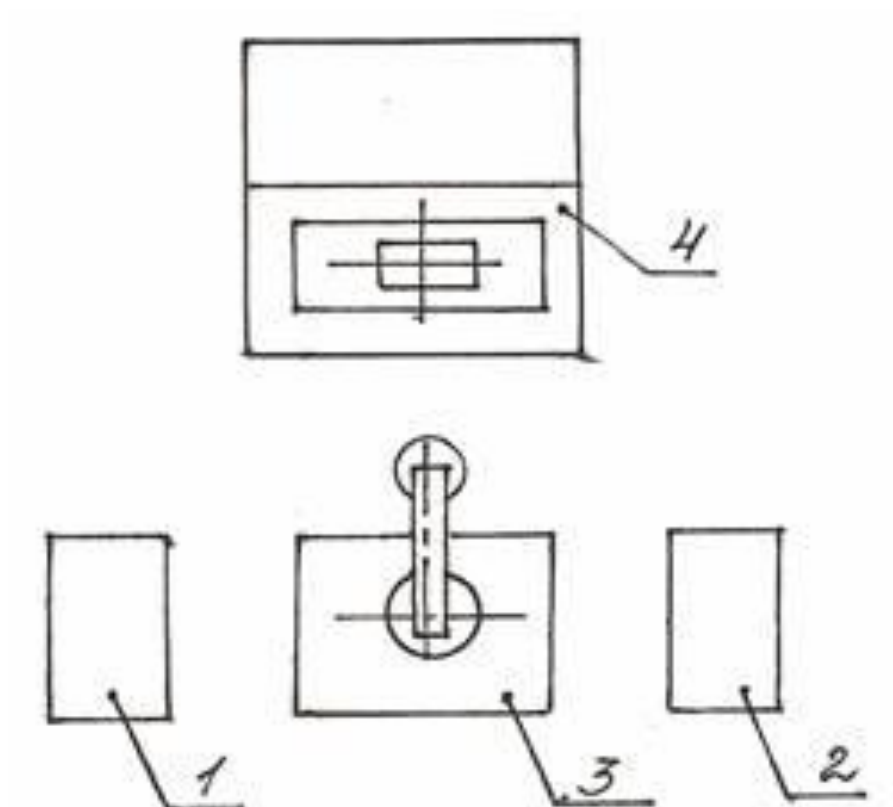


Рис. 1.1. Структура РТК

де, 1 - магазин з заготовками; 2 - магазин з деталями; 3 - підлоговий робот; 4 - прес.

Розглянемо робочий об'єм преса. Для цього положення основного і допоміжного обладнання і для даного робочого об'єму верстата вибираємо робота, що працює в циліндричній системі координат, що складається з модуля повороту, підйому і модуля висунення штанги руки.

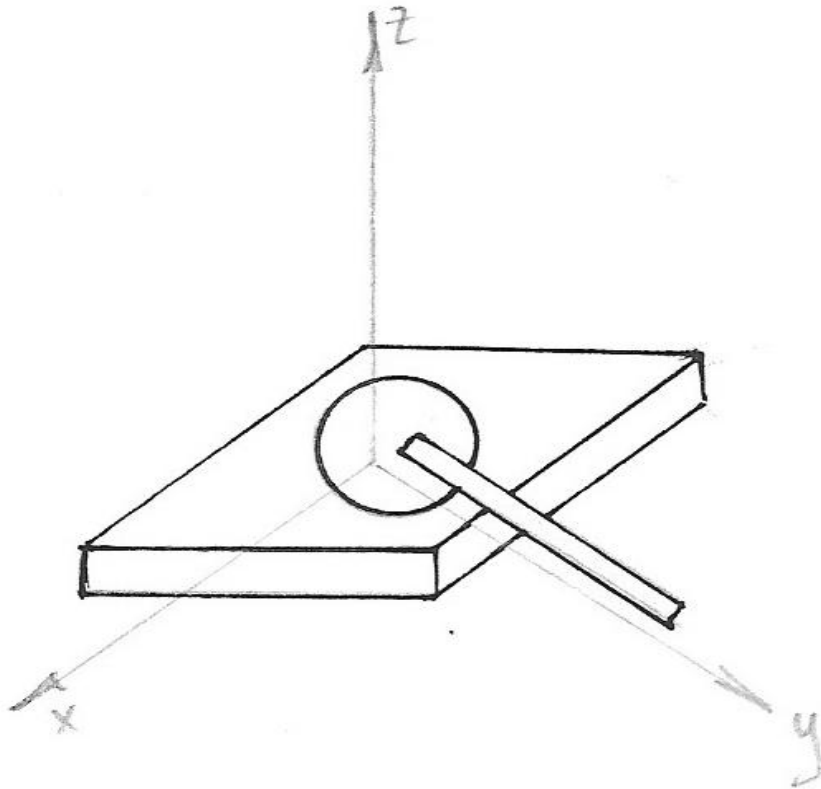


Рис. 1.2. Робочій об'єм обладнання

Промисловий робот призначений для автоматизації установки – зняття заготовок і деталей, зміни інструментів та інших допоміжних операцій при обслуговуванні верстатів з ЧПУ. Пристрій даного типу може обслуговувати один або два верстати та утворювати разом з накопичувальними і транспортними пристроями гнучкий виробничий обробний комплекс, призначений для тривалої роботи без участі оператора.

Промисловий робот складається з маніпулятора 1, змінних захватів 2 і пристрої ЧПУ, виконаного у вигляді автономної стійки 3. Маніпулятор включає в себе наступні складальні одиниці, деякі з яких можуть бути різного виконання: механізм повороту 4; механізм підйому і опускання 5; механізм висунення руки 6); балансир 7; блок підготовки повітря.

Пристрій позиційного типу забезпечує управління переміщення руки в циліндричній системі координат, циклове управління рухами пензля і затискачем-розтуляючи захват, а також подачу команд пуску циклів

роботи верстатів, іншого технологічного обладнання та прийому відповідних команд після виконання цих циклів.

Можливі три режими роботи ПР:

1) «навчання» – повернення в нульову точку, ручне управління і перемикається по кожній осі координат, введення в пам'ять заданих значень координат, швидкості переміщень, кількості оброблюваних деталей (циклів) тощо;

2) «автомат» – автоматичне керування за заданою програмою;

3) «редагування» – підготовка і коригування даних управління роботом.

Типовий робочий цикл ПР при зміні заготовки на токарному верстаті з ЧПУ включає в себе наступні етапи: підведення руки ПР до патрона верстата - захоплення обробленої деталі - відведення руки у вихідну точку - підведення руки до тактовою столу - опускання деталі - захоплення черговий заготовки - підведення заготовки до патрона верстата - вивільнення заготовки після затиску її в патроні - відведення руки у вихідну точку - початок циклу обробки на верстаті.

Найбільша кількість одночасно керованих координатних переміщень може бути:

1 - в режимі позиціонування (електродвигуна повороту, підйому-опускання або висунення руки);

2 в режимі циклового управління (пневмодвигуни блоку повороту кісті руки і захвату).

Переміщення по ступенях рухливості:

$q_{1П} = \frac{\pi}{2}$ - узагальнена координата повороту;

$q_{2П} = 15$ мм. - узагальнена координата підйому;

$q_{3П} = 220$ мм. - узагальнена координата висунення.

2.2 Розробка технічних вимог та визначення основних параметрів робота

1. Номінальна вантажопідйомність:

$$m_H = K_c \cdot K_{II} \cdot m = 1,3 \cdot 1,3 \cdot 0,06 = 0,1 \text{ кг.} \quad (1)$$

K_c - коефіцієнт, що враховує масу захвату [1.т3 (стр59)];

K_{II} - коефіцієнт, що враховує тип приводу (для пневмопривода - 1,3).

Округляємо m_H до значення із стандартного ряду, $m_H = 1$ кг.

2. Число ступенів рухливості $n=3$.

3. Діапазон переміщень по ступенях рухливості:

$$q_1 = \varphi_1 = \frac{\pi}{2}; \quad q_2 = S_2 = 15 \text{ мм.}; \quad q_3 = S_3 = 220 \text{ мм.}$$

4. Швидкості переміщення по ступенях рухливості:

$$\omega_{1\max} = q'_{1\max} = 0,314 \text{ с}^{-1}$$

$$V_{2\max} = q'_{2\max} = 0,014 \text{ м/с}$$

$$V_{3\max} = q'_{3\max} = 0,04 \text{ м/с}$$

5. Середня циклова швидкість:

$$\omega_{1ц} = q'_{1ц} = \frac{q_{1II}}{t_{II}} = \frac{\pi/2}{10} = 0,16 \text{ с}^{-1} \quad (2)$$

$$V_{2ц} = q'_{2ц} = 0,012 \text{ м/с}$$

$$V_{3ц} = q'_{3ц} = 0,02 \text{ м/с}$$

6. Максимальні прискорення за ступенями рухливості:

$$\varepsilon_{1\max} = q''_{1\max} = 0,1 \text{ с}^{-2}$$

$$a_{2\max} = q''_{2\max} = 0,11 \text{ м/с}^2$$

$$\dot{a}_{3\max} = q''_{3\max} = 0,015 \text{ м/с}^2$$

7. Похибка позиціонування:

$$\Delta_{\max} = 0,1 \text{ мм}$$

8. Кінематична структура:

3 ланки, дві кінематичні пари поступальні, одна - обертальна.

9. Робоча зона - сектор полого циліндра.

10.Об'єм робочої зони:

$$V_{PЗ} = q_{2П} \cdot [\pi \cdot (l_{2y} + q_{3П})^2 - \pi \cdot l_{2y}^2] = 0,005 \cdot [\pi \cdot (0,16 + 0,26)^2 - \pi \cdot 0,16^2] = 0,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \quad (3)$$

11. Тип системи координат - циліндрична.

12. Тип системи програмного управління - циклової.

13.Маса робота: 350 кг.

2.3 Кінематичне дослідження маніпулятора

Схема маніпулятора з одного обертальної парою і двома прогресивними парами.

S – нерухома або інерціальна система координат;

S_1, S_2, S_3 – системи координат, жорстко пов'язані з 1, 2 і 3 ланкою.

$l_{2y} = 425 \text{ мм.}$

$l_{2z} = 555 \text{ мм.}$

q_1, q_2, q_3 – узагальнені координати.

$t_{П} = 10 \text{ с. } q_{1П} = \frac{\pi}{2}; \quad q_{2П} = 15 \text{ мм.}; \quad q_{3П} = 220 \text{ мм.}$

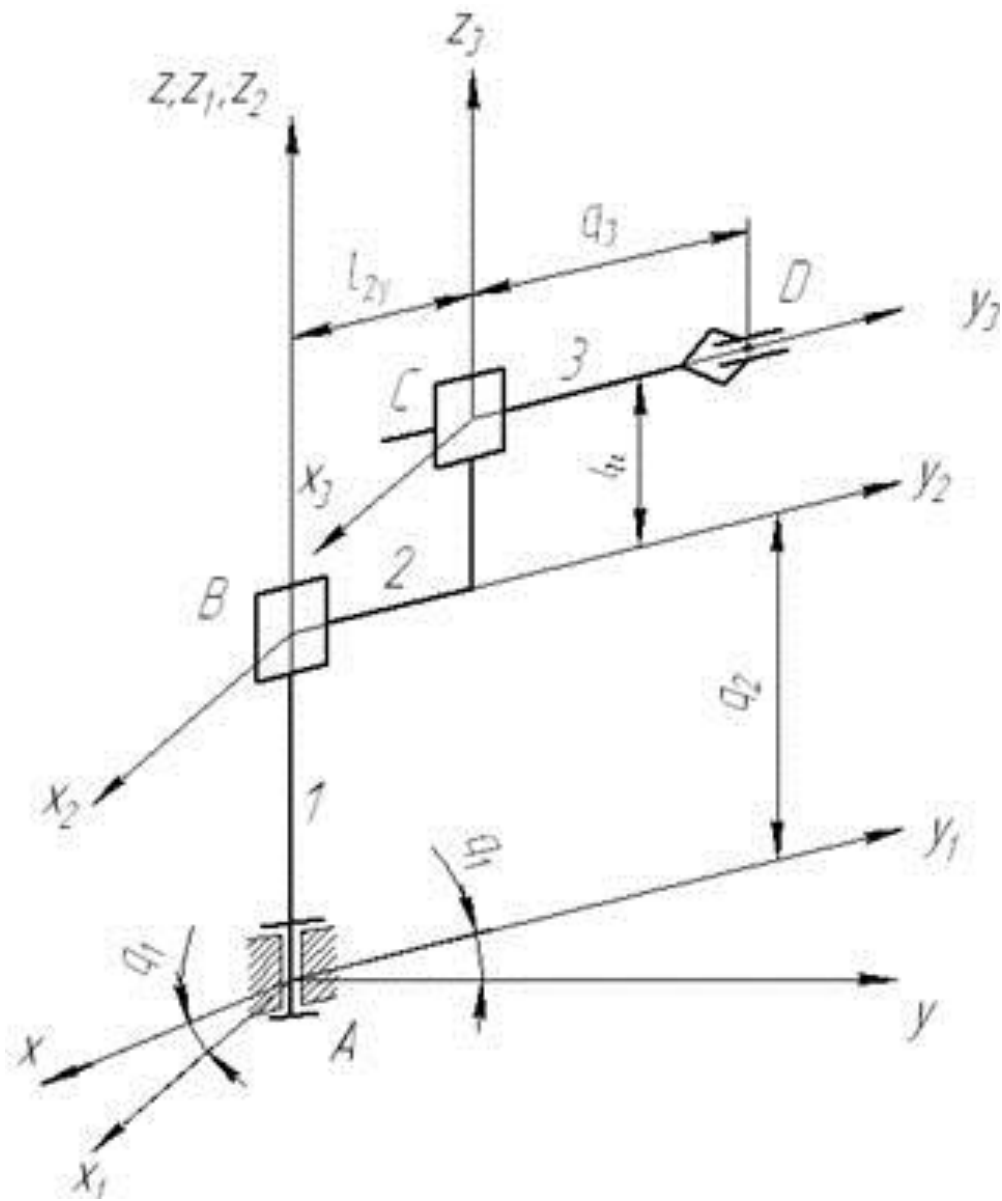


Рис. 1.3. Кінематична схема маніпулятора

Знайдемо координати точки D захвату в нерухомій системі координат S при заданих узагальнених координатах q_1, q_2, q_3 , тобто вирішимо пряму задачу кінематики. Складемо матриці перетворення систем координат в кінематичних парах:

$$T_{S_1} = \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 & 0 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ - поворот відносно вісі } OZ;$$

$$T_{S_1S_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ - підйом вдовж вісі OZ;}$$

$$T_{S_2S_3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_{2y} \\ 0 & 0 & 1 & l_{2z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ - висування вдовж вісі OY;}$$

Складаємо матричне рівняння послідовності переходу:

$$\bar{r} = T_{SS_3} \cdot \bar{r}_3 = T_{SS_1} \cdot T_{S_1S_2} \cdot T_{S_2S_3} \cdot \bar{r}_3 \quad (4)$$

$$T_{SS_3} = T_{SS_1} \cdot T_{S_1S_3} = T_{SS_1} \cdot (T_{S_1S_2} \cdot T_{S_2S_3}) \quad (5)$$

$$T_{S_1S_3} = T_{S_1S_2} \cdot T_{S_2S_3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_{2y} \\ 0 & 0 & 1 & (l_{2z} + q_2) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$T_{SS_3} = T_{SS_1} \cdot T_{S_1S_3} = \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 & -l_{2y} \cdot \sin q_1 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 & l_{2y} \cdot \cos q_1 \\ 0 & 0 & 1 & (l_{2z} + q_2) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Матричне рівняння довільної точки захоплення:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 & -l_{2y} \cdot \sin q_1 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 & l_{2y} \cdot \cos q_1 \\ 0 & 0 & 1 & (l_{2z} + q_2) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

У координатній формі рівняння має вид:

$$\begin{cases} x = x_3 \cdot \cos q_1 - y_3 \cdot \sin q_1 - l_{2y} \cdot \sin q_1 \\ y = x_3 \cdot \sin q_1 + y_3 \cdot \cos q_1 + l_{2y} \cdot \cos q_1 \\ z = z_3 + q_2 + l_{2z} \end{cases}$$

Знайдемо координати точки D захоплення при $x_3 = 0; y_3 = q_3; z_3 = 0$.

$$\begin{cases} x = (-q_3 - l_{2y}) \cdot \sin q_1 \\ y = (q_3 + l_{2y}) \cdot \cos q_1 \\ z = q_2 + l_{2z} \end{cases}$$

Знайдемо переміщення, швидкості і прискорення точки D захвату, як функції від часу. Для цього потрібно задати закони зміни узагальнених координат за часом і підставити їх замість q_1, q_2 і q_3 .

Припустимо, що в деякий початковий момент часу всі ланки маніпулятора одночасно починають рухатися. Задамо синусоїдальні закони руху для всіх приводів ланок маніпулятора:

$$q_1(t) = \frac{q_{1\Pi}}{2} \cdot \left(2 \cdot \frac{t}{t_{\Pi}} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{2\pi \cdot t}{t_{\Pi}} \right) = \frac{\pi/2}{2} \cdot \left(2 \cdot \frac{t}{10} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{2\pi \cdot t}{10} \right) = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right);$$

$$q_2(t) = \frac{q_{2\Pi}}{2} \cdot \left(2 \cdot \frac{t}{t_{\Pi}} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{2\pi \cdot t}{t_{\Pi}} \right) = \frac{5}{2} \cdot \left(2 \cdot \frac{t}{10} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{2\pi \cdot t}{10} \right) = 2,5 \cdot \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right);$$

$$q_3(t) = \frac{q_{3\Pi}}{2} \cdot \left(2 \cdot \frac{t}{t_{\Pi}} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{2\pi \cdot t}{t_{\Pi}} \right) = \frac{210}{2} \cdot \left(2 \cdot \frac{t}{10} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{2\pi \cdot t}{10} \right) = 105 \cdot \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right),$$

$t_{\Pi} = 10$ с. – час позиціонування, тобто повного руху ланки при виконанні певної операції (для всіх ланок прийmemo однаковим).

q_{Π} – величина кутового або лінійного переміщення ланки за час виконання операції.

Підставами замість q_1, q_2 і q_3 в рівняння (*) закони зміни узагальнених координат $q_1(t), q_2(t)$ і $q_3(t)$ знайдемо координати точки D

захоплення в будь-який момент часу, тобто знайдемо траєкторію руху точки D захоплення.

$$\begin{cases} x(t) = \left(-105 \cdot \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right) - 160 \right) \cdot \sin \left(\frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right) \right); \\ y(t) = \left(105 \cdot \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right) + 160 \right) \cdot \cos \left(\frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right) \right); \\ z(t) = 2,5 \cdot \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right) + 120, \end{cases}$$

Продифференціював це рівняння за часом, знайдемо проекції швидкостей точки D захоплення на осі координат, а продифференціював двічі - проекції прискорень.

$$(11) \quad \begin{cases} x' = -q_3' \cdot \sin q_1 - (q_3 + 160) \cdot q_1' \cdot \cos q_1; & q_1' = \frac{\pi}{20} \cdot \left(1 - \cos \frac{\pi \cdot t}{5} \right), \\ y' = q_3' \cdot \cos q_1 - (q_3 + 160) \cdot q_1' \cdot \sin q_1; & q_2' = 1,5 \cdot \left(1 - \cos \frac{\pi \cdot t}{5} \right), \\ z' = q_2', & q_3' = 22 \cdot \left(1 - \cos \frac{\pi \cdot t}{5} \right), \end{cases}$$

$$x'(t) = -22 \cdot \left(1 - \cos \frac{\pi \cdot t}{5} \right) \cdot \sin \left(\frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right) \right) - \left(105 \cdot \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right) + 160 \right) \cdot \frac{\pi}{20} \cdot \left(1 - \cos \frac{\pi \cdot t}{5} \right) \cdot \cos \left(\frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right) \right);$$

$$y'(t) = 22 \cdot \left(1 - \cos \frac{\pi \cdot t}{5} \right) \cdot \cos \left(\frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right) \right) - \left(105 \cdot \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right) + 160 \right) \cdot \frac{\pi}{20} \cdot \left(1 - \cos \frac{\pi \cdot t}{5} \right) \cdot \sin \left(\frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right) \right);$$

$$z'(t) = 1,5 \cdot \left(1 - \cos \frac{\pi \cdot t}{5} \right).$$

$$\begin{cases} x'' = \sin q_1 \cdot \left((q_3 + 160) \cdot (q_1')^2 - q_3'' \right) - \cos q_1 \cdot \left(2 \cdot q_3' \cdot q_1' + (q_3 + 160) \cdot q_1'' \right) ; \\ y'' = -\cos q_1 \cdot \left((q_3 + 160) \cdot (q_1')^2 - q_3'' \right) - \sin q_1 \cdot \left(2 \cdot q_3' \cdot q_1' + (q_3 + 160) \cdot q_1'' \right) ; \\ z'' = q_2'' , \end{cases}$$

$$q_1'' = \frac{\pi^2}{100} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} , \quad q_2'' = 0,1\pi \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} , \quad q_3'' = 4,2\pi \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} ,$$

$$\begin{aligned} x''(t) = & \sin \left(\frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right) \right) \cdot \left(105 \cdot \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right) + 160 \right) \cdot \left(\frac{\pi}{20} \cdot \left(1 - \cos \frac{\pi \cdot t}{5} \right) \right)^2 - \\ & - 4,2\pi \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} - \cos \left(\frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right) \right) \cdot \left(2,1\pi \cdot \left(1 - \cos \frac{\pi \cdot t}{5} \right) \right)^2 + \\ & + \left(105 \cdot \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right) + 160 \right) \cdot \frac{\pi^2}{100} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y''(t) = & -\cos \left(\frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right) \right) \cdot \left(105 \cdot \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right) + 160 \right) \cdot \left(\frac{\pi}{20} \cdot \left(1 - \cos \frac{\pi \cdot t}{5} \right) \right)^2 - \\ & - 4,2\pi \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} - \sin \left(\frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right) \right) \cdot \left(2,1\pi \cdot \left(1 - \cos \frac{\pi \cdot t}{5} \right) \right)^2 + \\ & + \left(105 \cdot \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right) + 160 \right) \cdot \frac{\pi^2}{100} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} ; \end{aligned}$$

$$z''(t) = 0,1\pi \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} .$$

$$\begin{cases} V_x = x' \\ V_y = y' \\ V_z = z' \end{cases} , \text{ де } V_x, V_y, V_z - \text{ проекції швидкостей точки D захвату на вісі } ox, oy,$$

OZ.

$$\begin{cases} a_x = x'' \\ a_y = y'' \\ a_z = z'' \end{cases} , \text{ де } a_x, a_y, a_z - \text{ проекції прискорень точки D захвату на вісі } ox, oy,$$

OZ.

Знайдемо зміна координат, проєкцій прискорень і швидкостей точки D захоплення з кроком в часі $\Delta t = 0,5$ с. і побудуємо графіки відповідних залежностей.

$S_D = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, де S_D - абсолютне переміщення точки D захвату.

(12)

$V_D = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$, де V_D - абсолютна швидкість точки D захвату. (13)

$a_D = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$, де a_D - абсолютне прискорення точки D захвату. (14)

Результати обчислень наведені в таблиці № 1-3.

Таблиця №1. Координати і переміщення точки D захоплення.

t =	x(t) =	y(t) =	z(t) =	s(t) =
0	0	425	555	980
0,5	-0,547	425,18	555,012	979,645
1	-4,321	426,379	555,097	977,173
1,5	-14,333	429,434	555,319	970,419
2	-33,253	434,429	555,73	956,905
2,5	-63,284	440,463	556,363	933,542
3	-105,893	445,281	557,23	896,618
3,5	-161,319	445,356	558,319	842,355
4	-227,988	436,461	559,597	768,07
4,5	-302,173	414,783	561,012	673,622
5	-378,302	378,302	562,5	562,5
5,5	-450,056	327,869	563,988	441,801
6	-511,945	267,418	565,403	320,876
6,5	-560,678	203,092	566,681	209,095
7	-595,688	141,661	567,77	113,744
7,5	-618,661	88,887	568,637	38,863
8	-632,45	48,41	569,27	-14,769
8,5	-639,971	21,361	569,681	-48,929
9	-643,548	6,521	569,903	-67,123
9,5	-644,819	0,829	569,988	-74,003
10	-645	$3,949 \cdot 10^{-14}$	570	-75

Таблиця №2. Проекції швидкості точки D захоплення.

$\frac{d}{dt}x(t) =$	$\frac{d}{dt}y(t) =$	$\frac{d}{dt}z(t) =$	$v(t) =$
$1,89 \cdot 10^{-14}$	$2,934 \cdot 10^{-12}$	$6,491 \cdot 10^{-12}$	$9,444 \cdot 10^{-12}$
-3,27	1,073	0,073	-2,124
-12,834	4,072	0,286	-8,476
-28,109	8,136	0,618	-19,355
-48,313	11,548	1,036	-35,728
-72,316	11,836	1,5	-58,981
-98,222	6,243	1,964	-90,015
-122,972	-7,391	2,382	-127,982
-142,451	-29,509	2,714	-169,247
-152,393	-57,914	2,927	-207,381
-149,96	-87,734	3	-234,694
-135,176	-112,655	2,927	-244,904
-111,265	-127,048	2,714	-235,599
-83,496	-127,941	2,382	-209,056
-57,145	-115,822	1,964	-171,004
-35,739	-94,05	1,5	-128,289
-20,412	-67,486	1,036	-86,861
-10,447	-41,136	0,618	-50,964
-4,397	-19,264	0,286	-23,374
-1,083	-4,956	0,073	-5,966
$1,777 \cdot 10^{-13}$	$-3,006 \cdot 10^{-12}$	$7,455 \cdot 10^{-13}$	$-2,083 \cdot 10^{-12}$

Таблиця №3. Проекції прискорень точки D захоплення.

$\frac{d^2}{dt^2} x(t) =$	$\frac{d^2}{dt^2} y(t) =$	$\frac{d^2}{dt^2} z(t) =$	a (t)=
0	0	0	0
-12,989	4,23	0,291	-8,469
-25,067	7,488	0,554	-17,025
-35,776	8,193	0,762	-26,82
-44,68	4,617	0,896	-39,166
-50,718	-4,414	0,942	-54,189
-51,883	-18,716	0,896	-69,703
-45,717	-36,004	0,762	-80,958
-30,72	-51,739	0,554	-81,906
-8,049	-60,213	0,291	-67,971
17,788	-56,886	0	-39,097
40,232	-40,849	-0,291	-0,908
53,581	-15,704	-0,554	37,323
55,673	11,944	-0,762	66,855
48,532	35,362	-0,896	82,998
36,737	50,059	-0,942	85,854
24,851	54,501	-0,896	78,456
15,526	49,463	-0,762	64,227
9,079	36,993	-0,554	45,519
4,335	19,644	-0,291	23,688
$-1,642 \cdot 10^{-11}$	0	0	$-1,642 \cdot 10^{-11}$

2.4 Визначення похибки позиціонування точки D захвату

Приймаємо, що похибка відпрацювання приводів маніпулятора становить 0,1% від повного переміщення відповідної ланки.

$$\begin{cases} \delta_{D_x} = \delta_x + \beta_y \cdot z - \beta_z \cdot y \\ \delta_{D_y} = \delta_y + \beta_z \cdot x - \beta_x \cdot z \\ \delta_{D_z} = \delta_z + \beta_x \cdot y - \beta_y \cdot x \end{cases} \quad (15)$$

де $\delta_{D_x}, \delta_{D_y}, \delta_{D_z}$ - проекції похибки позиціонування точки D захвату на вісі ox, oy і oz .

$$\beta_z = 0,1\% \cdot q_{1II} = 0,001 \cdot \frac{\pi}{2} = 0,0005\pi \text{ (рад)}. \quad (16)$$

$$\delta_z = 0,1\% \cdot q_{2II} = 0,001 \cdot 15 = 0,015 \text{ (мм)}. \quad (17)$$

$$\delta_y = 0,1\% \cdot q_{3II} = 0,001 \cdot 220 = 0,21 \text{ (мм)}. \quad (18)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_{D_x} = -\beta_z \cdot y = -0,0005\pi \cdot y \\ \delta_{D_y} = \delta_y + \beta_z \cdot x = 0,22 + 0,0005\pi \cdot x \\ \delta_{D_z} = \delta_z = 0,015 \end{array} \right. \quad (19)$$

Знайдемо зміну в часі з кроком $\Delta t = 0,5$ с. проекції похибки позиціонування на осі координат і повної похибки позиціонування точки D.

$$\delta_{D_x} = -0,0005\pi \cdot \left(105 \cdot \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right) + 160 \right) \cdot \cos \left(\frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right) \right)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_{D_y} = 0,22 + 0,0005\pi \cdot \left(-105 \cdot \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right) - 160 \right) \cdot \sin \left(\frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right) \right) \\ \delta_{D_z} = 0,015 \\ \Delta_D = \sqrt{\delta_{D_x}^2 + \delta_{D_y}^2 + \delta_{D_z}^2} \end{array} \right. \quad (20)$$

Рівняння 20 – повна похибка позиціонування точки D захоплення.
Результати обчислень наведені в додатку (Таблиця №4).

Таблиця №4. Похибка позиціонування.

T	δ_{Dx}	δ_{Dy}	δ_{Dz}	Δ_D
0	-0,251	0,180	0,280	0,417
0,5	-0,252	0,180	0,280	0,417
1	-0,254	0,183	0,280	0,420
1,5	-0,260	0,188	0,280	0,426
2	-0,270	0,198	0,280	0,436
2,5	-0,285	0,210	0,280	0,452
3	-0,303	0,224	0,280	0,470
3,5	-0,321	0,235	0,280	0,486
4	-0,334	0,238	0,280	0,496
4,5	-0,335	0,232	0,280	0,494
5	-0,322	0,213	0,280	0,477
5,5	-0,292	0,185	0,280	0,445
6	-0,248	0,152	0,280	0,404
6,5	-0,194	0,117	0,280	0,360
7	-0,139	0,086	0,280	0,324
7,5	-0,089	0,061	0,280	0,300
8	-0,049	0,043	0,280	0,288
8,5	-0,022	0,032	0,280	0,283
9	-0,007	0,025	0,280	0,281
9,5	-0,001	0,023	0,280	0,281
10	0,000	0,023	0,280	0,281

2.5 Динамічний розрахунок виконавчих механізмів маніпуляторів

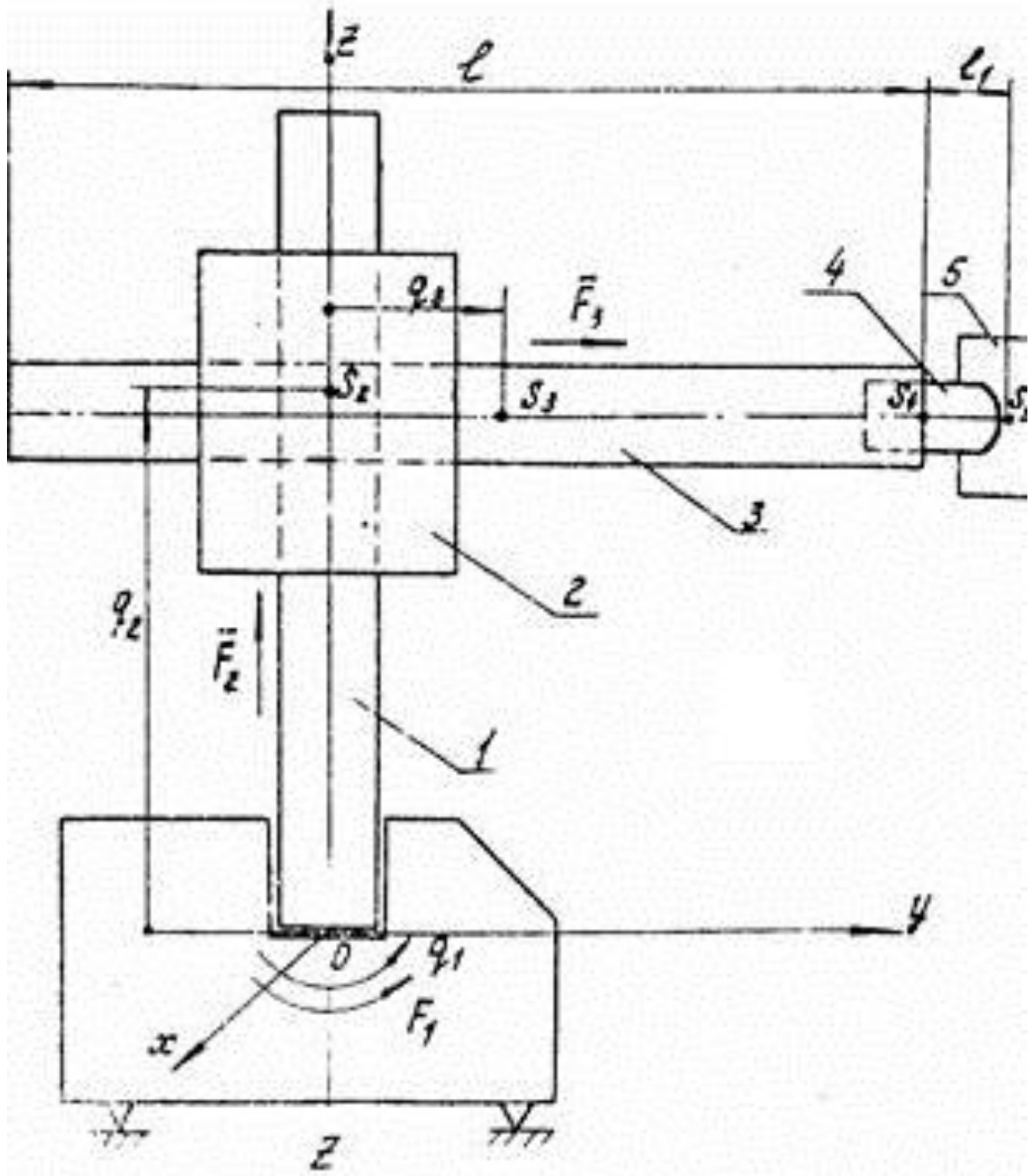


Рис. 4. Промисловий робот
де, 1 траверса; 2 каретка; 3 штанга руки; 4 захват; 5 робочий вантаж.

S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 - центри тяжкості відповідних ланок;

F_1, F_2, F_3 - зусилля приводів механізмів повороту, підймання та висування.

Складемо рівняння руху механізмів маніпулятора. Для цього скористаємося системою рівнянь Лагранжа другого роду, яка в разі ідеальних зв'язків при числі ступенів рухливості рівному трьом, запишеться в наступному вигляді:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dT}{dq'_1} \right) - \frac{dT}{d\dot{q}_1} = Q_1 \quad (21) \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{dT}{dq'_2} \right) - \frac{dT}{dq'_2} = Q_2 \quad (22) \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{dT}{dq'_3} \right) - \frac{dT}{dq'_3} = Q_3$$

(23)

де q_1 – кутове переміщення траверси маніпулятора щодо заснування;
 q_2 – лінійне переміщення каретки щодо траверси; q_3 – лінійне переміщення штанги руки при її висуванні щодо каретки підйому;
 Q_1, Q_2, Q_3 – узагальнені сили;

T – кінетична енергія розглянутої системи маніпулятора, рівна:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 \quad (24)$$

Для динамічного аналізу маніпулятора необхідно знати маси і моменти інерції щодо осей, що проходять через центри мас всіх ланок маніпулятора.

Прийmemo, що:

$$I_{1z} = 3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad m_1 = 50 \text{ кг}. \text{ – момент інерції і маси 1-ї ланки.}$$

$$I_{2z} = 4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad m_2 = 35 \text{ кг}. \text{ – момент інерції і маси 2-ї ланки.}$$

$$I_{3z} = 8 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad m_3 = 30 \text{ кг}. \text{ – момент інерції і маси 3-ї ланки.}$$

$$I_{4z} = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad m_4 = 10 \text{ кг}. \text{ – момент інерції і маси 4-ї ланки.}$$

$$I_{5z} = 0,01 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad m_5 = 0,06 \text{ кг}. \text{ – з креслення деталі.}$$

$$L = 0,91 \text{ м}. \text{ – довжина штанги руки.}$$

$$L_1 = 0,16 \text{ м}. \text{ – відстань між центрами мас захоплення і робочого}$$

вантажу.

При цьому кінетична енергія ланки 1 визначається:

$$T_1 = \frac{1}{2} I_{1z} q_1'^2, \quad (25)$$

де I_{1z} – момент інерції ланки 1 відносно осі Z ;

q_1' – кутова швидкість повороту траверси.

Кінетична енергія ланки 2 рівна:

$$T_2 = \frac{1}{2} I_{2z} q_2'^2 + \frac{1}{2} m_2 q_2'^2 \quad (26)$$

де I_{2z} – момент каретки відносно вісі Z ;

m_2 – маса каретки;

q_2' – лінійна швидкість підйому каретки.

Для визначення кінетичної енергії ланки 3, жорстко пов'язаного із захопленням і робочим вантажем, скористаємося, перш за все, теоремою Штейнера:

$$I_{iz} = I_i + m_i d^2 \quad (27)$$

де d – відстань між паралельними осями, що проходять в даному випадку через центри мас ланок 3 і 5 і паралельно осі обертання Z . З урахуванням сказаного, будемо мати:

$$T_3 = \frac{1}{2} \left[\sum_3^5 I_i + m_3 q_3'^2 + m_1 \left(q_3 + \frac{L}{2} \right)^2 + m_5 \left(q_3 + \frac{L}{2} + L_1 \right)^2 \right] q_1'^2 + \frac{1}{2} m_{\Sigma r} (q_2'^2 + q_3'^2) \quad (28)$$

де I_i ($i = 3, 4, 5$) – моменти інерції, відповідно, штанги руки, захоплення і робочого вантажу щодо осей, що проходять через центри мас цих тіл і паралельних осі обертання Z .

$$I = I_{1Z} + I_{2Z} + \sum_3^5 I_i + m_4 \frac{L^2}{4} + m_5 \left(\frac{L}{2} + L_1 \right)^2 = 3 + 4 + 8 + 0,1 + 0,01 + 10 \cdot \frac{0,91^2}{4} + 0,06 \cdot \left(\frac{0,91}{2} + 0,16 \right)^2 = 17,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (29)$$

З урахуванням цього рівняння отримаємо:

$$T = \frac{1}{2} \left\{ I + m_{\Sigma r} q_3^2 + [m_4 L + m_5 (L + 2L_1)] \cdot q_3 \right\} q_1'^2 + \frac{1}{2} (m_{\Sigma B} q_2'^2 + m_{\Sigma r} q_3'^2), \quad (30)$$

де $m_{\Sigma B} = \sum_3^5 m_i$ – маси вертикально переміщуваних деталей

маніпулятора.

$$m_{\Sigma B} = m_{\Sigma r} = 30 + 10 + 0,06 = 40,06 \text{ кг}.$$

У вираженні кінетичної енергії величина,

$$L' = \frac{1}{m_{\Sigma r}} [m_4 L + m_5 (L + 2L_1)] = \frac{1}{40,06} [10 \cdot 0,91 + 0,06 \cdot (0,91 + 2 \cdot 0,16)] = 0,229 \text{ м}. \quad (31)$$

є постійною для даної кінематичної схеми маніпулятора.

Розділивши і помноживши ліву і праву частини виразу (31) на $m_{\Sigma r}$ одержимо:

$$T = \frac{1}{2} (I + m_{\Sigma r} q_3^2 + m_{\Sigma r} q_3 L') q_1'^2 + \frac{1}{2} (m_{\Sigma B} q_2'^2 + m_{\Sigma r} q_3'^2) \quad (32)$$

Похідні від T , що входять в рівняння Лагранжа, мають вигляд:

$$\frac{dT}{dq_1} = 0; \quad \frac{dT}{dq_2} = 0; \quad \frac{dT}{dq_3} = \frac{m_{\Sigma r}}{2} (2q_3 + L') q_1'^2, \quad (33)$$

$$\frac{dT}{dq_1'} = (I + m_{\Sigma r} q_2^3 + m_{\Sigma r} q_1 L') q_1' \quad (34); \quad \frac{dT}{dq_2} = m_{\Sigma r} q_2' \quad (35); \quad \frac{dT}{dq_3} = m_{\Sigma r} q_3' \quad (36)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dT}{dq_1'} \right) = m_{\Sigma r} (2q_3 + L') q_1' q_3' + (I + m_{\Sigma r} q_3 + m_{\Sigma r} q_3 L') q_1'' \quad (37)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dT}{dq_2'} \right) = m_{\Sigma B} q_2''; \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{dT}{dq_3'} \right) = m_{\Sigma r} q_3'' \quad (38, 39)$$

Узагальнені сили представимо у вигляді:

$$Q_1 = F_1, \quad Q_2 = F_2 - m_{\Sigma B} q, \quad Q_3 = F_3,$$

де F_1, F_2, F_3 – зусилля приводів механізмів повороту, підймання та висування;

q – прискорення вільного падіння тіла.

Застосовуючи, оператор Лагранжа, отримаємо рішення рівнянь динаміки регіональних рухів в наступному вигляді:

$$F_1 = I q_1'' + m_{\Sigma r} [q_3 (q_3 + L') q_1'' + (2q_3 + L') q_1' q_3'] = 17,2 \cdot q_1'' + 40,06 \cdot [q_3 (q_3 + 0,229) q_1'' + (2q_3 + 0,229) q_1' q_3']$$

$$F_2 = m_{\Sigma B} \cdot (q_2'' + q) = 40,06 \cdot (q_2'' + 9,8); \quad (41)$$

$$F_3 = m_{\Sigma r} \left[q_3'' - \left(q_3 + \frac{L'}{2} \right) \cdot q_1'^2 \right] = 40,06 \cdot \left[q_3'' - \left(q_3 + \frac{0,229}{2} \right) \cdot q_1'^2 \right]; \quad (42)$$

$$F_1(t) = 17,2 \cdot \frac{\pi^2}{100} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} + 40,06 \cdot \left(105 \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right) \cdot \left(105 \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right) + 0,229 \right) \cdot \frac{\pi^2}{100} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} + \left(2 \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right) \cdot 105 + 0,229 \right) \cdot \frac{\pi}{20} \cdot \left(1 - \cos \frac{\pi \cdot t}{5} \right) \cdot 21 \cdot \left(1 - \cos \frac{\pi \cdot t}{5} \right) \right)$$

$$F_2(t) = 40,06 \cdot \left(0,0001\pi \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} + 9,8 \right);$$

$$F_3 = 40,06 \cdot \left[0,0042\pi \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} - \left(0,105 \left(\frac{t}{5} - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{5} \right) + \frac{0,229}{2} \right) \cdot \left(\frac{\pi}{20} \left(1 - \cos \frac{\pi \cdot t}{5} \right) \right)^2 \right];$$

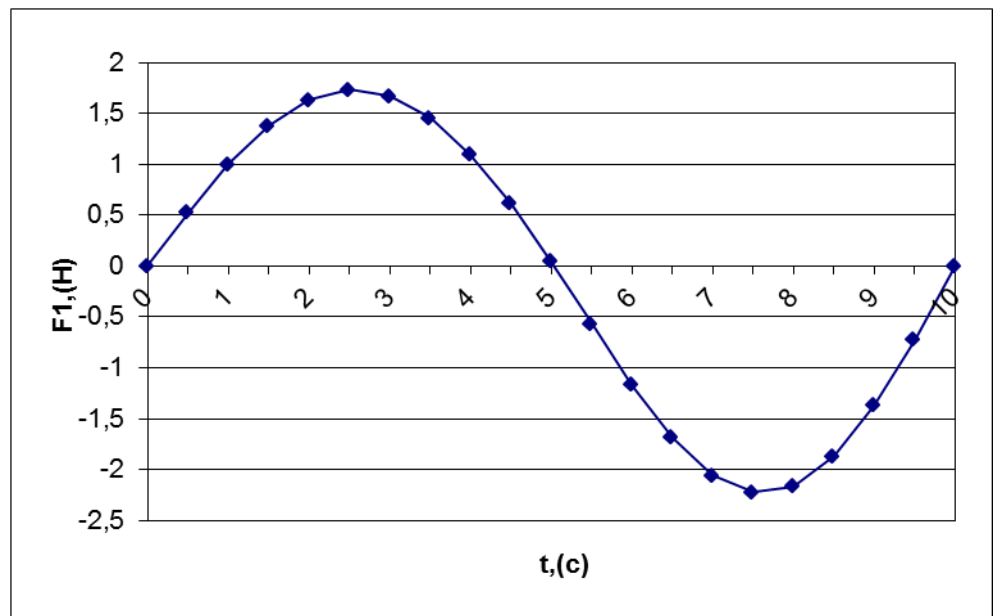
Отримані рівняння дозволяють обґрунтовано вибрати параметри приводів механізмів регіональних рухів маніпулятора, так як можна розрахувати моменти і зусилля, що розвиваються приводами для забезпечення заданого закону руху, в певний момент часу, в найбільш несприятливих, з точки зору динаміки положеннях ланок механізмів маніпулятора.

2.6 Вибір параметрів приводу висунення штанги руки маніпулятора

Знайдемо зусилля в приводі висунення F_3 через проміжки часу $\Delta t = 0,5c$. Результат розрахунків наведені в додатку. З таблиці № 5-7 видно, що максимальне зусилля в приводі F_{3MAX} виникає в момент часу $t = 6c$. $F_{3MAX} = -1,15$ (Н). Обираємо для механізму висунання штанги руки пневмопривод двостороннього дії.

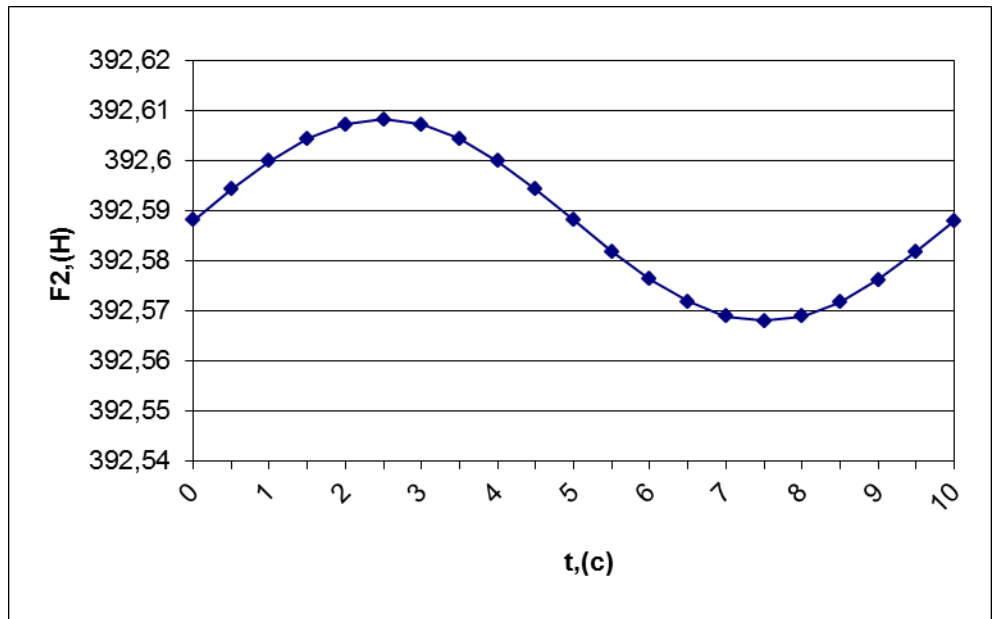
Таблиця №5. Зусилля в приводі механізму повороту.

t	F1
0	0
0,5	0,524783
1	0,999298
1,5	1,379472
2	1,631049
2,5	1,731832
3	1,672431
3,5	1,455557
4	1,094584
4,5	0,612632
5	0,043053
5,5	-0,56914
6	-1,16693
6,5	-1,68457
7	-2,05581
7,5	-2,22577
8	-2,16295
8,5	-1,86693
9	-1,36899
9,5	-0,72558
10	-0,00741



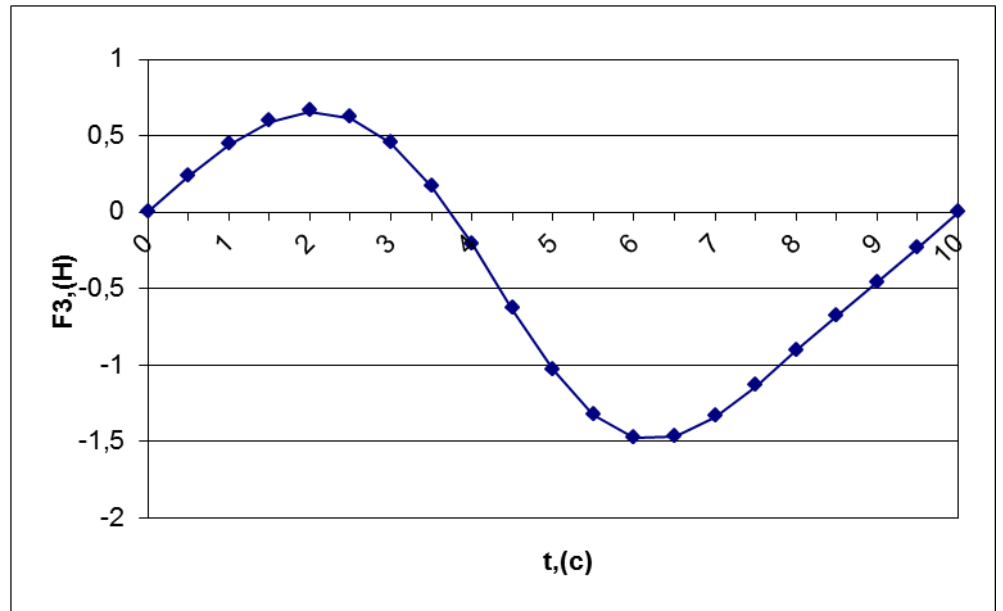
Таблиця №6. Зусилля в приводі механізму підйому.

t	F2
0	392,588
0,5	392,5942
1	392,5998
1,5	392,6043
2	392,6071
2,5	392,6081
3	392,6071
3,5	392,6043
4	392,5999
4,5	392,5942
5	392,588
5,5	392,5818
6	392,5762
6,5	392,5717
7	392,5689
7,5	392,5679
8	392,5688
8,5	392,5717
9	392,5761
9,5	392,5817
10	392,5879



Таблиця №7. Зусилля в приводі механізму висування.

t	F3
0	0
0,5	0,232846
1	0,439347
1,5	0,590638
2	0,658307
2,5	0,617962
3	0,454338
3,5	0,168919
4	-0,21224
4,5	-0,63616
5	-1,03136
5,5	-1,32707
6	-1,47619
6,5	-1,47055
7	-1,34008
7,5	-1,13599
8	-0,90685
8,5	-0,6805
9	-0,46039
9,5	-0,23641
10	-0,0024



Вихідні данні:

$F_{II} = 1,15$ (H) – корисне навантаження;

$$V = \frac{q_{3II}}{t_{II}} = \frac{0,21}{10} = 0,021 \text{ м/с} \quad (43)$$

Де рівняння (43) – середня швидкість руху;

$S = 0,2$ (м) - діапазон переміщення;

$m = m_{\Sigma T} = 40,06$ (кг) - маса рухомих ланок;

$p_M = 0,001$ МПа - тиск повітря в магістралі;

$a_3 = a_{3B}$ - умова рівності каналів входу виходу.

1. Визначаємо конструктивні розміри:

$$a_{1y} = K \cdot p_M / (V_{cp} \cdot F_{II}) = 755 \cdot 0,001 / (0,021 \cdot 1,15) = 31,26 \text{ (мм}^{-2}\text{)} \quad (44)$$

$$a_2 = p_M / F_{II} = 0,001 / 1,15 = 8,7 \cdot 10^{-4} \text{ (мм}^{-2}\text{)} \quad (45)$$

2. Знаходимо сумарне навантаження на привод:

$$F = F_{II} + F_{TP} = F_{II} + 3,5\sqrt{F_{II}} = 1,15 + 3,5\sqrt{1,15} = 4,9 \text{ (H)} \quad (46)$$

3. Так як привід виконаний на базі двостороннього циліндра, то приймаємо коефіцієнт $\Omega = 1$

4. З залежності відповідної $\Omega = 1$ знаходимо параметр $U_{1y\min} = 10,5$ прийнявши значення $\frac{1}{\chi} = 1,5$

5. Перевіряємо стійкість руху поршня:

$$\delta = V_{cp} \cdot \sqrt{10^3 \cdot m / (F \cdot S)} = 0,021 \cdot \sqrt{10^3 \cdot 40,06 / (4,9 \cdot 200)} = 0,13. \quad (47)$$

Рівняння (47) задовольняє умові $\delta \leq 0,25$.

6. Знайдемо площу поршня:

$$A_{II} = (1 / \chi) / a_2 = 1,5 / 8,7 \cdot 10^{-4} = 1724 \text{ (мм}^2\text{)} \quad (48)$$

Діаметр поршня:

$$d = \sqrt{4 \cdot A_{II} / \pi} = \sqrt{4 \cdot 1724 / \pi} = 46,85 \text{ (мм)} \quad (49)$$

Приймаємо $d = 50(\text{мм})$ тоді:

$$A_{II} = \pi \cdot 50^2 / 4 = 1963(\text{мм}^2) \quad (50)$$

7. Визначимо площу входу та виходу:

$$a_{\text{э}} = a_{\text{эВ}} = u_{1y} / a_{1y} = 10,5 / 31,26 = 0,33(\text{мм}^2) \quad (51)$$

За отриманими значеннями $a_{\text{э}}$ і $a_{\text{эВ}}$ знаходимо їх дійсні геометричні розміри:

$$a_{\text{эД}} = a_{\text{эВД}} = a_{\text{э}} / \mu = 0,33 / 0,3 = 1,1(\text{мм}^2) \quad (52)$$

Тоді

$$d_{\text{эД}} = d_{\text{эВД}} = \sqrt{4 \cdot a_{\text{эД}} / \pi} = \sqrt{4 \cdot 1,1 / \pi} = 1,18(\text{мм}) \quad (53)$$

Приймаємо: $d_{\text{эД}} = d_{\text{эВД}} = 2(\text{мм})$, звідки:

$$a_{\text{эД}} = a_{\text{эВД}} = \pi d_{\text{эД}}^2 / 4 = \pi \cdot 2^2 / 4 = 3,14(\text{мм}^2) \quad (54)$$

8. Визначимо шлях зупинки: $A_T = A_{II}$; $b_T = 0,5$:

$$V_{OT} = \xi \cdot A_T \cdot S = 0,15 \cdot 1963 \cdot 200 = 58890(\text{мм}^2); \quad (55)$$

$$B = \frac{\delta^2 \cdot F \cdot S \cdot A_T}{(p_M \cdot A_T - F) \cdot V_{OT}} = \frac{0,11^2 \cdot 8,7 \cdot 200 \cdot 1963}{(0,001 \cdot 1963 - 8,7) \cdot 58890} = 0,1 \quad (56)$$

$$\text{де } \delta = V_y \cdot \sqrt{10^3 \cdot m / (F \cdot S)} = 0,0231 \cdot \sqrt{10^3 \cdot 40,06 / (8,7 \cdot 200)} = 0,11 \quad (57)$$

$$V_y = 1,1 \cdot V = 1,1 \cdot 0,021 = 0,0231(\text{м} / \text{с}) \quad (58)$$

Виходячи з графіка при $B = 0,1 \Rightarrow b_T = 0,53$

Шлях гальмування:

$$S_T = (1 - b_T) \cdot V_{OT} / (A_T \cdot b_T) = (1 - 0,53) \cdot 58890 / (1963 \cdot 0,53) = 26,6(\text{мм}) \quad (59)$$

Таким чином, заданим параметрам задовольняє пневмопривод на базі пневмоцилиндру з діаметром поршня 50 мм і діаметром вхідних отворів 2 мм. При цьому забезпечується шлях гальмування 27 мм.

2.7 Розрахунок захвату

Для деталей типу «Пластина» вибираємо захватний пристрій, оснащений вбудованими датчиками торкання пружинно-важільного типу, що забезпечує обертальний рух губок, а, отже, точне, точне базування деталей.

Початкові дані:

$m = 0,06(\text{кг})$ – маса об'єкта маніпулювання;

$a = 46,766(\text{мм}/\text{с}^2) = 0,046(\text{м}/\text{с}^2)$ – максимальне прискорення захвату,

(виходячи з таблиці №3 при $t = 4,5(\text{с.})$);

1. Зусилля затримання заготовки:

$$F = m \cdot (g + a) \cdot K_1 \cdot K_2 = 0,06 \cdot (9,8 + 0,046) \cdot 1,25 \cdot 2 = 1,47(\text{Н}) \quad (60)$$

$$K_1 = \frac{1}{2\mu} = \frac{1}{2 \cdot 0,4} = 1,25, \quad (61)$$

де μ - коефіцієнт тертя губок захвату ($\mu = 0,4$)

$K_2 = 2$ - коефіцієнт запасу.

3. Зусилля привода:

Від дії нормальних сил N_i і сил тертя F_{Ti} виникає утримує момент щодо осі обертання поворотної частини пальця (точка А).

Для j -ого пальцю:

$$M_j = \sum_{i=1}^k F_i \cdot \cos \alpha_i \cdot [a_i \cdot \operatorname{tg} \alpha_i \pm c_i - \mu(a_i \pm c_i \operatorname{tg} \alpha_i)] = (1,47 \cdot \cos 45^\circ \cdot [0,055 \cdot \operatorname{tg} 45^\circ + 0,006 - 0,4 \cdot (0,055 + 0,006 \cdot \operatorname{tg} 45^\circ)] + (1,47 \cdot \cos 70^\circ \cdot [0,035 \cdot \operatorname{tg} 70^\circ + 0,003 - 0,4 \cdot (0,035 + 0,003 \cdot \operatorname{tg} 70^\circ)]) = 0,11(\text{Нм})$$

(62)

За значеннями утримують моментів визначаємо зусилля приводу загартного пристрої:

$$P = \sum_{j=1}^m M_j / R = 1 \cdot 0,11 / 0,01275 = 8,63(\text{мм}), \quad (63)$$

де m - кількість пальців ($m=1$).

2. Площина поршню пневмоцилиндру:

$p = 0,4(\text{МПа})$ - тиск в магістралі;

$$d = \sqrt{4P/(p\pi)} = \sqrt{4 \cdot 8,63 / (0,4\pi)} = 5,2(\text{мм}) \quad (64)$$

Прийmemo $d = 10(\text{мм})$

Висновок: для заданих параметрів захвату маємо: діаметр пневмоцилиндра 10 (мм).

Висновок до розділу 2

Було проаналізовано існуючі конструкції маніпуляторів і промислових роботів і засобів їх оснащення, в тому числі захватних пристроїв, як однієї з різновидів мехатронних систем. Здійснено кінематичний і динамічний розрахунок маніпуляторів, а саме необхідні швидкісні, силові і точності параметри.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Проведено аналіз вимог до конструкцій та застосування промислових роботів. Також розглянуті вимоги до кінематичних параметрів роботів (маніпуляторів), що необхідні при виконанні певних технологічних операцій. Зроблена класифікація промислових роботів (робототехнічних пристроїв для розвантаження міжцехового транспорту РПРМТ).

Розроблені технічні вимоги та визначені основні параметри робототехнічних пристроїв. Проведено кінематичне дослідження робототехнічного пристрою, а саме робота-маніпулятора.

Визначено похибку позиціонування точки D (точки захвату виробу або деталі).

Зроблений динамічний розрахунок виконавчих механізмів робота-маніпулятора.

ЛІТЕРАТУРА

1. Захарова В.І., Васильєва М.П. Промислові роботи. – М., 1998.
2. Виробництво і прогрес. – К.: 1999.
3. Проць Я. І. Захоплювальні пристрої промислових роботів: Навчальний посібник./ Я.І. Проць — Тернопіль: Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя, 2008. — 232 с.
4. Робототехніка. Підручник / [В. І. Костюк, Г. О. Спину, Л. С. Ямпольський, М. М. Ткач.] – К.: Вища школа. – 1994. – 447 с.
5. Воротников С. А. Информационные устройства робототехнических систем: учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 384 с.
6. ДСТУ 2879-94 Маніпулятори, автооператори, роботи промислові та системи виробничі гнучкі. Терміни та визначення.
7. ГОСТ 30097-93 Роботы промышленные. Системы координат и направления движений.
8. ГОСТ 25204-82 Роботы промышленные. Ряд номинальной грузоподъемности.
9. ГОСТ 8032-84 Предпочтительные числа и ряды предпочтительных чисел.
10. ГОСТ 25685-83 Роботы промышленные. Классификация.
11. “Сучасний електропривод верстатів з ЧПУ й управління промислових роботів” Михайлов О.П., Орлова Р.Т., Пальців А.В., 2001 р.
12. “Роботизированные технологичні комплекси в ДПС” М. М. Довбня, А. М. Кондратьев, Є. І. Юревич, 2000 р.
13. “Робототехнические комплексы” Під редакцією Б.І. Черпакова, 2002р.
14. “Роботизированные складальні комплекси” А. А. Іванов, У. У. Сафронов, 2001 р.
15. “Технологія й устаткування виробництва електричних машин” А.А. Осьмаков, 2003 р.

16. Арасланов А.М. Расчет элементов конструкций заданной надежности при случайных воздействиях // А.М. Арасланов. - М.: Машиностроение, 1987. - 128с.
17. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности // Р. Барлоу, Ф. Прошан. - М.: Сов. радио, 1969. - 488с.
18. Биргер И.А. Детерминированные и статические модели суммирования повреждений // Проблемы прочности. - 1978. - №11. - С.3 - 11.
19. Биргер И.А. Расчет на прочность деталей машин // И.А. Биргер, Б.Ф. Шор, Г.Б. Иосилевич. - М.: Машиностроение, 1979. - 702с.
20. Брауде В.И. Вероятностные методы расчета грузоподъемных машин // В.И. Брауде. - М.: Машиностроение, 1969. - 231с.
21. Горов Э.А., Снетков В.А. Определение усилия взаимодействия иглы и клина трикотажной машины. - М., 1981, -7с. - Деп. в ЦНИИТЭИлегпром 7.04.81, №443-81.
22. Гусев А.С. Расчет конструкций при случайных воздействиях // А.С. Гусев, В.А. Светлицкий. - М.: Машиностроение, 1984. - 240с.
23. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем: Пер. с англ./ Под ред. И.А. Ушакова. М.: Мир, 1980. - 604с.
24. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник - М.: Машиностроение, 1985. - 224с.
25. Кузнецов А.А. Вероятностные характеристики прочности авиационных материалов // А.А. Кузнецов, С.М. Алифанов, В.И. Ветров и др. - М.: Машиностроение, 1970. - 353с.
26. Лазаренко В.М. Процессы петлеобразования // В.М. Лазаренко. - М.: Легбытиздат, 1986. - 136с.
27. Лебедев А.Н., Гарбарук В.Н. Профилирование клиньев кругловязальных машин по дугам окружностей // Изв. вузов. Технология лег.пром-сти. - 1977. - №4. - С.139-146.

- 28.Лейкин А.С. Напряженность и выносливость деталей сложной конфигурации // А.С. Лейкин. - М.: Машиностроения, 1968. - 372с.
- 29.Методические указания. Методы расчета деталей машин на выносливость в вероятностном аспекте.-М.: Изд.стандартов,1980
- 30.Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними: ДСТУ 3004-95. - К.: Держспоживстандарт України, 1995. - 129с.
- 31.Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги: ДСТУ 2862-94. - К.: Держспоживстандарт України, 1994. -90 с.
- 32.Петров Ю.И., Петров Е.И. Влияние ударных волн на разрушение крючков трикотажных игл //Текстиль. пром-сть. - 1960. - №5. - С.39-43.
- 33.Проников А.С. Надежность машин // А.С. Проников. - М.: Машиностроение, 1978. - 592с.
- 34.Решетов Д.Н. Надежность машин // Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев. - М.: Высш. шк., 1988. - 238с.
- 35.Соловьев Л.И., Гарбарук В.Н. Клинья трикотажных машин, спроектированные по составным законам движения //Изв.Вузов. Технология легкой промышленности. - 1967. - №5. - С.111-117.
- 36.Сарксян Ф.В. Новые замковые системы для кругловязальных машин КЛК //Пром-сть Армении.- 1978. №5. - с.76-77.
- 37.Сосновский Л.А. Основы дифференциации расчетов деталей на прочность // Вестн. машиностроения. - 1984. - №9. - С. 8-11.
- 38.Трощенко В.Т. Прочность металлов при переменных нагрузках // В.Т. Трощенко. - К.: Наук. думка, 1978. - 174с.
- 39.Трощенко В.Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: Справочник. Ч.1,2 // В.Т. Трощенко, Л.А. Сосновский. - К.: Наук. думка, 1987. - 1315с.

- 40.Фролов К.В. Методы совершенствования машин и современные проблемы машиноведения // К.В. Фролов. - М.: Машиностроение, 1984. - 224с.
- 41.Мясников В.К. Кинематика манипуляторов. Методические указания №2160. – ЯГТУ , 1997 г.
- 42.Разработка мехатронной системы в виде манипулятора для загрузки – выгрузки металлообрабатывающего оборудования. Методические указания №2572. – ЯГТУ , 2005 г.
- 43.Механика промышленных роботов (Под ред. К.В. Фролова, Е.И. Воробьева). – М.: Высшая школа, 1989 г. –2т., 3т.