

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) ННІТІ ім. акад. І.С.Гулого
Кафедра мехатроніки та пакувальної техніки

«До захисту в ЕК»

«До захисту допущено»

Директор інституту(декан факультету)

Завідувач кафедри

(підпис)

Сергій БЛАЖЕНКО

(ім'я та прізвище)

(підпис)

Людмила КРИВОПЛЯС-ВОЛОДИНА

(ім'я та прізвище)

« 01 » 12 2024р.

« 01 » 12 2024р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

зі спеціальності 131 Прикладна Механіка

(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми Прикладна Механіка

на тему: Оптимізація роботи мехатронної системи робота-маніпулятора пакувальної лінії

Виконав: здобувач 2 курсу, групи 2М

ТУРЕНКО Євгеній Анатолійович

(прізвище, ім'я, по батькові повністю)

(підпис)

Керівник ДЕРЕНІВСЬКА Анастасія

(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

(підпис)

Консультанти

(ім'я та прізвище)

(підпис)

(ім'я та прізвище)

(підпис)

(ім'я та прізвище)

(підпис)

Рецензент

Юрій Бойко

(ім'я та прізвище)

(підпис)

Я як здобувач(ка) Національного університету харчових технологій розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав(-ла) і не одержував(-ла) незарядженої допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувач

(підпис)

Київ - 2024 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) ННІТІ ім. акад. І.С. Гулого

Кафедра Мехатроніки та пакувальної техніки

Освітній ступінь Магістр

Спеціальність 131 «Прикладна механіка»

(код і назва)

Освітньо-професійна програма Прикладна механіка

(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____ МПТ

 Людмила КРИВОПЛЯС-ВОЛОДИНА

« 01 » _____ 12 _____ 2024 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Туренко Євгеній Анатолійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Оптимізація роботи мехатронної системи робота-маніпулятора пакувальної лінії.

керівник Деренівська Анастасія Василівна к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 01 » 10 2024 року № _____

2. Строк подання здобувачем роботи 01.12.2024

3. Вихідні дані до роботи Технологія процесу пакування; технологічні, кінематичні та динамічні параметри, характерні конструкції роботів-маніпуляторів та їх мехатронних систем

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Реферат; Вступ; 1. Огляд мехатронних систем і роботів-маніпуляторів у пакувальній галузі, 2. Структурно-кінематичний аналіз мехатронних систем робота-маніпулятора, 3. Методи та інструменти оптимізації роботи пристроїв захоплення робота-маніпулятора, 4. Експериментальне дослідження та оптимізація мехатронної системи пакувальної лінії 5. Охорона праці, Висновки; Список використаної літератури.

5. Перелік графічного матеріалу

6. Консультанти розділів роботи

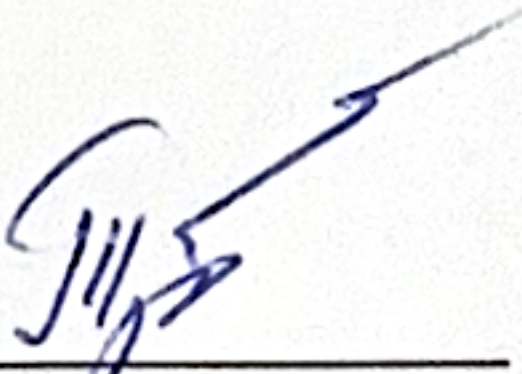
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 01.10.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Реферат	12.09.24	виконано
2	Вступ	19.09.24	виконано
3	Огляд мехатронних систем і роботів-маніпуляторів у пакувальній галузі	23.04.24	виконано
4	Висновок до розділу 1	24.09.24	виконано
5	Структурно-кінематичний аналіз мехатронних систем робота-маніпулятора	28.09.24	виконано
6	Методи та інструменти оптимізації роботи пристроїв захоплення робота-маніпулятора	30.09.24	виконано
7	Експериментальне дослідження та оптимізація мехатронної системи пакувальної лінії	10.10.24	виконано
8	Висновок до розділу 4	15.10.24	виконано
9	Охорона праці	15.10.24	виконано
10	Висновок до розділу 5	18.11.24	виконано
11	Вимоги охорони праці	20.11.24	виконано
12	Висновки	27.11.24	виконано

Здобувач


(підпис)

Євгеній ТУРЕНКО
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи


(підпис)

Анастасія ДЕРЕНІВСЬКА
(ім'я та прізвище)

РЕФЕРАТ

Оптимізація роботи мехатронної системи робота-маніпулятора пакувальної лінії

Оптимізація роботи мехатронної системи робота-маніпулятора пакувальної лінії є актуальним напрямом, що дозволяє підвищити ефективність виробничих процесів шляхом інтеграції сучасних технологій. У харчовій та пакувальній промисловості широко використовуються мехатронні системи та робототехнічні модулі, які забезпечують автоматизацію і вирішення складних завдань, таких як сортування, транспортування та пакування продукції. Основними критеріями для таких систем є висока гнучкість, енергоефективність та компактність, що дозволяє адаптувати їх до змін у технологічних процесах.

Актуальність обраної теми обумовлена необхідністю зменшення витрат і підвищення продуктивності підприємств, особливо з огляду на високу вартість імпортного обладнання. Впровадження оптимізованих мехатронних систем дозволяє зменшити витрати на пакувальні лінії, забезпечити високу якість продукції та мінімізувати ризики, пов'язані з ручною працею.

Мета дослідження: розробка і впровадження методів оптимізації роботи мехатронної системи робота-маніпулятора пакувальної лінії для підвищення її продуктивності та зниження енергоспоживання.

Завдання дослідження:

- Провести аналіз існуючих систем роботів-маніпуляторів для пакувальних ліній;
- Розробити алгоритми для оптимізації кінематичних і динамічних характеристик робота-маніпулятора;
- Виконати моделювання роботи робота-маніпулятора за допомогою програмного забезпечення FluidSIM;
- Провести аналіз ефективності використання пневматичних захоплювачів у пакувальних лініях;

- Оцінити вплив оптимізованої мехатронної системи на загальні показники виробничого процесу.

Методика дослідження включає розробку математичної моделі робота-маніпулятора, моделювання його руху, аналіз кінематичних і динамічних характеристик, тестування різних конструкцій захоплювачів, а також оцінку енергоефективності та продуктивності. Для виконання моделювання використовуватиметься програмне забезпечення PTC Mathcad та FluidSIM, яке дозволяє проводити точний аналіз робототехнічних систем.

Структура роботи: магістерська робота включає вступ, п'ять основних розділів, загальні висновки та список використаних джерел. У роботі представлено огляд існуючих технологій, обґрунтування вибору методів оптимізації, результати моделювання та практичні рекомендації для впровадження розробленої системи.

Ключові слова: мехатронна система, оптимізація, робот-маніпулятор, пакувальна лінія, пневматичний захоплювач..

ABSTRACT

Optimization of the Mechatronic System of a Packaging Line Robotic Manipulator

Optimization of the Mechatronic System of a Packaging Line Robotic Manipulator is a relevant research area aimed at enhancing production efficiency through the integration of modern technologies. Mechatronic systems and robotic modules are widely used in the food and packaging industries to automate complex tasks such as sorting, transportation, and packaging. The primary criteria for such systems include high flexibility, energy efficiency, and compactness, enabling their adaptation to changes in technological processes.

The relevance of the chosen topic is driven by the need to reduce costs and increase productivity in enterprises, especially considering the high cost of imported equipment. The implementation of optimized mechatronic systems allows for reduced expenses on packaging lines, ensures high product quality, and minimizes risks associated with manual labor.

Research goal: to develop and implement methods for optimizing the operation of the mechatronic system of a packaging line robotic manipulator to enhance its productivity and reduce energy consumption.

Research objectives:

- Analyze existing robotic manipulator systems for packaging lines;
- Develop algorithms to optimize the kinematic and dynamic characteristics of the robotic manipulator;
- Perform simulations of the robotic manipulator's operation using FluidSIM software;
- Analyze the efficiency of using pneumatic grippers in packaging lines;
- Assess the impact of the optimized mechatronic system on overall production process indicators.

Research methodology includes the development of a mathematical model of the robotic manipulator, simulation of its movements, analysis of kinematic and dynamic characteristics, testing of various gripper designs, and evaluation of energy efficiency and productivity. The modeling will be carried out using PTC Mathcad and FluidSIM software, which enables precise analysis of robotic systems.

Structure of the study: The thesis consists of an introduction, five main chapters, general conclusions, and a list of references. The study provides an overview of existing technologies, justifies the selection of optimization methods, presents modeling results, and offers practical recommendations for implementing the developed system.

Keywords: mechatronic system, optimization, robotic manipulator, packaging line, pneumatic gripper.

ЗМІСТ

ЗМІСТ.....	5
ВСТУП.....	7
Розділ 1. ОГЛЯД МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ І РОБОТІВ-МАНІПУЛЯТОРІВ У ПАКУВАЛЬНІЙ ГАЛУЗІ.....	9
1.1. Основні поняття та класифікація мехатронних систем у пакувальній галузі.....	9
1.2. Аналіз технологічних рішень пакувальних ліній із застосуванням роботів- маніпуляторів.....	19
Висновки до розділу 1.....	34
Розділ 2. СТРУКТУРНО-КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА.....	35
2.1. Класифікація роботів-маніпуляторів для пакувальних ліній.....	35
2.2. Структура і кінематичні особливості роботів-маніпуляторів.....	41
Висновки до розділу 2.....	61
Розділ 3. МЕТОДИ ТА ІНСТРУМЕНТИ ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ ПРИСТРОЇВ ЗАХОПЛЕННЯ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА.....	62
3.1. Класифікація та функціональні особливості пристроїв захоплення.....	62
3.2. Розрахунок параметрів захоплення для різних видів упаковок.....	69
Висновки до розділу 3.....	87
Розділ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ ПАКУВАЛЬНОЇ ЛІНІЇ.....	88
4.1. Аналіз існуючих конструкцій пневматичних пристроїв захоплення.....	88
4.2. Розробка математичної моделі для оцінки ефективності роботи маніпулятора.....	96
Висновки до розділу 4.....	98
Розділ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ У ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РОБОТА- МАНІПУЛЯТОРА.....	99
ВИСНОВКИ.....	104
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	106

ВСТУП

У сучасному промисловому виробництві поняття "ефективність" набуває ключового значення, оскільки підприємства прагнуть оптимізувати процеси, знижуючи витрати та збільшуючи продуктивність. Особливу роль у цьому відіграють роботизовані системи, зокрема мехатронні модулі роботів-маніпуляторів, що забезпечують високий рівень автоматизації виробничих процесів на пакувальних лініях. Їх оптимізація стає необхідністю для досягнення високих стандартів якості та економічної ефективності.

Обрана тема є актуальною, оскільки інтеграція та вдосконалення мехатронних систем роботів-маніпуляторів відкриває нові можливості для підвищення продуктивності, зменшення витрат і підвищення точності виконання технологічних операцій. У цьому вступі ми розглянемо сутність проблеми оптимізації роботи мехатронних модулів у пакувальних лініях, ключові аспекти, що впливають на їх ефективність, та можливі шляхи вдосконалення цих систем.

Мехатронні модулі роботів-маніпуляторів у пакувальних лініях виконують широкий спектр завдань, таких як транспортування, сортування, укладання та пакування продукції. Завдяки інтеграції механічних, електронних та програмних компонентів ці модулі забезпечують високу швидкість і точність виконання операцій. Однак, навіть за наявності високотехнологічних рішень, існують певні обмеження, що знижують ефективність їх роботи.

Однією з основних проблем є недостатня адаптивність мехатронних систем до змінних умов виробництва, що може призводити до збоїв та затримок. Наприклад, необхідність частого переналаштування для обробки різних об'єктів збільшує час простою та знижує продуктивність. Другою суттєвою проблемою є необхідність підвищення швидкості та точності роботи маніпуляторів в умовах високого завантаження виробництва, що вимагає вдосконалення алгоритмів управління та модернізації конструктивних компонентів.

Для подолання цих викликів оптимізація мехатронних систем має зосереджуватися на таких аспектах:

- Підвищення продуктивності через вдосконалення алгоритмів управління та впровадження інноваційних підходів до організації руху маніпулятора;
- Розширення функціональності за рахунок використання інтелектуальних сенсорів і датчиків, які забезпечують точне відслідковування положення об'єкта та корекцію дій у реальному часі;
- Зменшення витрат енергії та матеріалів шляхом впровадження легких і міцних конструкцій елементів маніпулятора.

Крім того, інтеграція мехатронних модулів із загальною системою управління виробництвом сприятиме створенню єдиної автоматизованої системи, що дозволить оптимізувати всі процеси на підприємстві. Це включає стандартизацію протоколів зв'язку, створення інтерфейсів для сумісної роботи з іншими пристроями та системами, а також впровадження новітніх інформаційних технологій для моніторингу та аналізу роботи.

Таким чином, оптимізація мехатронних систем роботів-маніпуляторів у пакувальних лініях є важливим інструментом для забезпечення конкурентоспроможності підприємств у сучасному динамічному ринку. Впровадження передових рішень у цій галузі дозволить досягти значних успіхів у зменшенні витрат, підвищенні продуктивності та забезпеченні стабільності виробництва..

Розділ 1. ОГЛЯД МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ І РОБОТІВ-МАНПУЛЯТОРІВ У ПАКУВАЛЬНІЙ ГАЛУЗІ

1.1. Основні поняття та класифікація мехатронних систем у пакувальній галузі

Поява роботизованих виробничих систем на початку 1980-х років ХХ століття була обумовлена змінами в різних галузях промисловості, які потребували підвищення гнучкості виробничих процесів. Ці зміни знаменували перехід від жорстких автоматизованих систем із циклічним управлінням до гнучких виробничих систем, здатних швидко адаптуватися до змін асортименту продукції. Такий перехід став відповіддю на суспільний запит на товари зі скороченим життєвим циклом — вироби, які можна оперативно модернізувати для відповідності сучасним вимогам.

Основою для створення роботизованих виробничих систем стала широкомасштабна інтеграція верстатів із числовим програмним управлінням (ЧПУ). Ці системи стали ключовим етапом у розвитку промисловості, оскільки забезпечили можливість автоматизації точного виготовлення продукції та підвищення продуктивності. Соціальна значущість роботизованих систем полягала в передачі багатьох функцій від ручної праці людини до автоматизованого обладнання. Людина в цьому процесі отримала нові функції, такі як програмування та налагодження виробничого устаткування, що змінило роль працівника у виробництві. [1]

Концепція типу виробництва

У теорії організації виробництва ключову роль відіграє поняття типу виробництва, яке визначає комплексну організаційно-технологічну характеристику виробничого процесу. Тип виробництва враховує такі фактори, як:

- Ступінь спеціалізації виробництва;
- Різноманітність і стабільність асортименту продукції;
- Обсяги виробничих партій;
- Регулярність випуску продукції.

Ці характеристики дозволяють формувати оптимальні методи управління виробничими процесами та організації виробничо-господарської діяльності підприємства. Гнучкі виробничі системи, що включають роботизовані маніпулятори та мехатронні модулі, відповідають вимогам сучасних типів виробництва, де необхідна швидка адаптація до змін, зниження витрат і підвищення якості продукції.

Розвиток таких систем став каталізатором технологічних змін у промисловості, забезпечивши підприємствам можливість ефективно реагувати на виклики сучасного ринку та швидко впроваджувати інновації у виробничі процеси.

Згідно з довідковою літературою, робот - це автоматична машина, яка включає перепрограмований пристрій управління та інші технічні засоби для виконання дій, що характерні для людини в процесі трудової діяльності. Найбільш розвинений робот може самостійно приймати рішення, адаптуватися до зовнішнього середовища та виконувати різноманітні трудові завдання. Характерною особливістю роботів є здатність швидко переналаштовуватися для автоматичного виконання різних завдань, передбачених програмою.

Наразі не існує загальноприйнятого визначення промислового робота. В Японії, наприклад, під промисловим роботом розуміють автомати зі змінною програмою, які використовуються для автоматизації ручних операцій. За цим визначенням промисловий робот, так само, як і людина, має фізичні, функціональні та розумові можливості. Функціональні можливості включають пристосованість та рухливість, а розумові - здатність до відчуття і сприйняття, пам'ять, логіку і навчання. Визначення промислового робота, прийняте в Україні, описує його як автономну автоматичну машину з маніпулятором та програмним управлінням, призначену для виконання операцій виробничого циклу без участі людини.

В технічній літературі широко використовується коротке визначення: промисловий робот - перепрограмований автоматичний маніпулятор

промислового застосування.

Маніпулятор (рис.1.1) (англ. manipulator; нім. Manipulator m) — керований пристрій (машина), оснащений робочим органом для виконання рухових функцій, аналогічних до функцій руки людини, під час переміщення об'єктів у просторі [2, 3, 4, 5, 6, 7]



Рис. 1.1. Робот- маніпулятор Motoman Yaskawa

Важливі параметри систем координат для динамічного аналізу зручно визначати, використовуючи систему координат з початком в шарнірах, яку представили Денавіт та Хартенберг. Вони використовують метод послідовного формування систем координат для створення кінематичної схеми.

До числа автоматичних роботів маніпуляторів можна віднести автооператорів. Автооператор - це автоматично діючий пристрій з виконавчим органом у вигляді маніпулятора, засобами пересування і неперепрограмованою системою управління. Такі пристрої зазвичай виконують прості операції та використовують системи циклової автоматики для управління. Регулювання або заміна кінематичних ланок може бути необхідним для переналаштування автооператора.

Робототехнічна система (РТС) — це інтегрована структура, яка поєднує інформаційно-сенсорні, механічні виконавчі та керуючі пристрої. Всі ці компоненти працюють у взаємодії для виконання заданого технологічного процесу або операції. РТС забезпечує автоматизацію виробничих процесів і

використовується для підвищення продуктивності, точності та ефективності роботи. [8]

Реалізація РТС відбувається у вигляді комплексу технологічного та транспортного обладнання, до складу якого входять промислові роботи. Ці роботи виконують основні або допоміжні технологічні операції в умовах автоматизованого виробництва. Такий підхід дозволяє інтегрувати промислових роботів у виробничі процеси для досягнення більшої гнучкості, надійності та ефективності виконання завдань. Робототехнічна система представляє собою інтегровану сукупність підсистем.

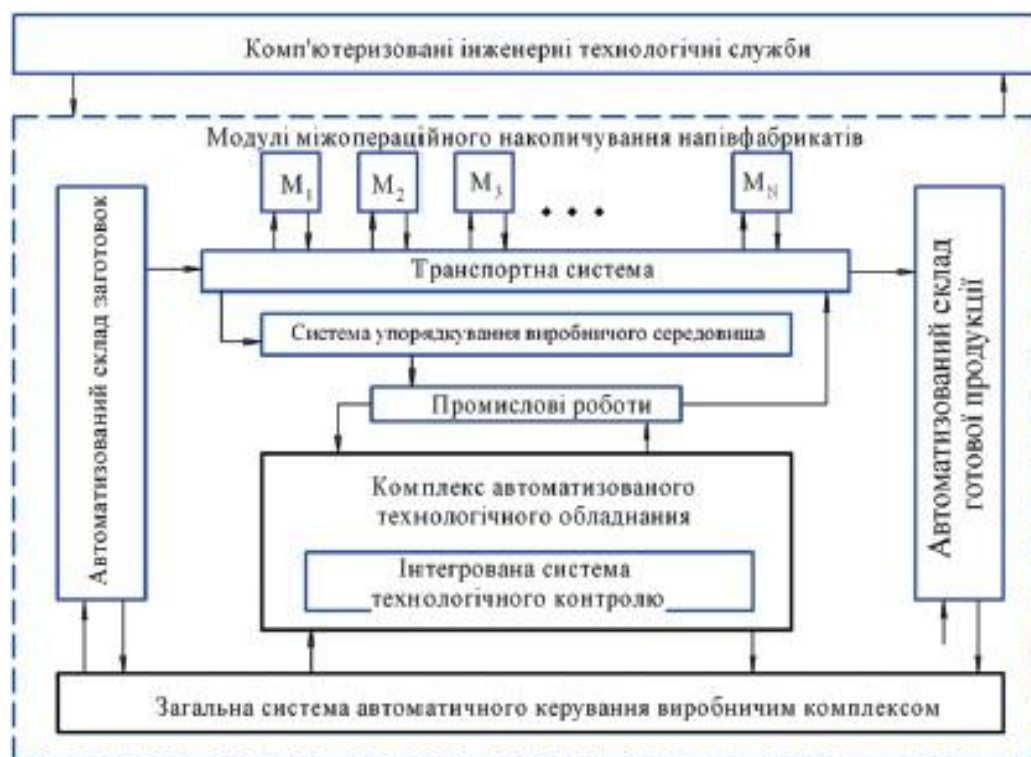


Рис. 1.2. Узагальнена схема РТС

Класифікація роботизованих виробничих систем проводиться з урахуванням кількох ключових аспектів, включаючи область застосування, рівень розвиненості структури, гнучкість, ступінь автоматизації, функціональне призначення системи управління обладнанням і тип конфігурації АТСС (див. рис. 1.3) [9].



Рис. 1.3. Класифікація РТС

За рівнем розвиненості структури виокремлюють п'ять рівнів роботизованих виробничих систем (РТС):

1) Роботизований виробничий модуль (комірка): це переналагоджувальна на конкретну номенклатуру виробів одиниця основного технологічного обладнання. Вона обладнана пристроями програмного керування, можливістю заміни інструменту, автоматичного видалення виробів (автооператор або ПР), системами накопичення початкового матеріалу та напівфабрикатів, пристроями для видалення відходів, а також системами контролю та налаштування технологічного процесу та корекції якості виробу. Модуль здійснює повторювані автоматичні цикли, призначений для автономної роботи і може бути вбудований в систему більш високого рангу.

2) Роботизована виробнича лінія – це комплекс, що включає дві чи більше одиниці основного технологічного обладнання або роботизованих модулів, які взаємодіють завдяки системі автоматичного керування і транспортно-нагромаджувальним системам. Ця лінія може бути адаптована для виробництва продукції певної номенклатури в рамках технічних обмежень та обладнання. Її особливістю є організація матеріальних потоків між різними одиницями технологічного обладнання.

3) Роботизована виробнича ділянка – це концепція, ідентична гнучкій виробничій лінії, за винятком того, що організація матеріального потоку на цій ділянці здійснюється незалежно для кожної окремої одиниці технологічного

обладнання.

4) Роботизований виробничий цех представляє собою комплекс гнучких ділянок, ліній та модулів, спроектований для послідовного виконання технологічного процесу і здатний бути переналагоджуваним для виготовлення продукції конкретної номенклатури.

5) Гнучкий переналагоджуваний завод представляє собою комплекс гнучких виробничих цехів, ліній, ділянок і модулів, таких як ливарні, ковальсько-пресові, металорізні, термічні, мийні, сушильні, контрольні, складальні, консерваційні, пакувальні та інші, оснащених основним обладнанням. Цей комплекс здатен переналагоджуватися для виконання різноманітних технологічних процесів при виробництві різних видів продукції.

Робот представляє собою автоматичну систему, що включає перепрограмований блок управління та інші технічні пристрої, спроможні здійснювати визначені дії, що характерні для людей під час трудової діяльності. Сучасний робот визначається як машина, здатна самостійно та в координації вирішувати завдання, пов'язані з власним вдосконаленням, адаптацією до навколишнього середовища та виконанням різноманітних технологічних завдань. Роботи, різнячись за технічним рівнем, параметрами систем управління, інформаційним забезпеченням і виконавчими органами, входять в широкий клас машин, спрямованих на виконання різноманітних операцій. Спільною характеристикою роботів є їхня можливість ефективного перепрограмування для автоматичного виконання різних завдань, передбачених програмою.

Промисловий робот є автоматизованою машиною, яка програмується та використовується в промисловому виробничому процесі для здійснення рухових операцій, аналогічних тим, які виконує людина,

у переміщенні предметів виробництва та обробці технологічної оснастки. Для виконання цих завдань промисловий робот оснащений маніпулятором та системою управління.

Маніпулятор – пристрій, розроблений для емуляції рухових та працюючих функцій верхньої кінцівки людини і оператором (у випадку біотехнічних маніпуляторів) або автоматично. Автооператори, що також включаються в категорію автоматичних маніпуляторів промислового призначення, обмежені кількістю ступенів свободи, яка, як правило, не перевищує 3, і вони діють в рамках жорсткого циклу, на відміну від програмованих роботів-маніпуляторів.

Виробничі об'єкти, що переміщуються у просторі маніпулятора, розглядаються як об'єкти маніпулювання. Серед них можуть бути вказані заготовки, деталі, складальні з'єднання, пристрої захоплення, а також допоміжні, вимірювальні або обробляючі інструменти. До класу роботів можна віднести маніпулятори з інтерактивним управлінням, які періодично керуються оператором та діють автоматично. Інтерактивні роботи та класифікація промислових роботів

У порівнянні з біотехнічними маніпуляторами, інтерактивні роботи оснащені пристроями пам'яті, які дозволяють автоматично виконувати задані завдання. Вони можуть працювати у двох основних режимах, що залежить від рівня участі оператора:

Автоматизований режим: у цьому режимі автоматичне управління чергується з біотехнічним, що дозволяє оператору втручатися лише на певних етапах.

Супервізорний режим: робот виконує всі етапи технологічного циклу автоматично, але перехід між етапами можливий лише за умови отримання цілеспрямованої команди від оператора.

Інтерактивні роботи зазвичай використовуються в умовах, які вимагають високого рівня безпеки для людини, наприклад:

- Обслуговування атомних реакторів;
- Маніпуляції з хімічно або вибухонебезпечними речовинами;
- Виконання завдань у зонах техногенних катастроф.

Такі роботи забезпечують безпечне виконання операцій, де безпосереднє втручання людини є небезпечним або неможливим.

Класифікація промислових роботів [10]

Класифікація промислових роботів базується на основних характеристиках, які визначають їх функціональність і сферу застосування. За призначенням роботи групуються на різні класи, серед яких виділяється клас промислових роботів, створених для автоматизації виробничих процесів у різних галузях, зокрема у машинобудуванні.

Основні критерії класифікації включають:

- Тип виконуваних завдань: роботи для транспортування, складання, зварювання, фарбування тощо;
- Конструктивні особливості: кількість ступенів свободи, тип приводу (електричний, гідравлічний, пневматичний);
- Методи управління: програмовані, супервізорні, інтерактивні;
- Середовище використання: роботи для стандартних або екстремальних умов.

Розробка конкретних типів роботів орієнтована на вирішення певних виробничих завдань, що дозволяє забезпечувати їх ефективність і гнучкість у різних виробничих процесах.



Рис. 1.4. Класифікація промислових роботів

Промислові роботи поділяються на різні групи залежно від характеру виконуваних операцій та їх виробничо-технологічних характеристик. Основними групами є:

Виробничі (технологічні) роботи

Ці роботи беруть безпосередню участь у технологічному процесі, виконуючи основні операції, які сприяють виготовленню чи обробці продукції. До таких операцій належать:

Механічна обробка (точіння, фрезерування, шліфування тощо);

Складання деталей і вузлів;

Зварювання різних типів;

Фарбування та нанесення покриттів.

Технологічні роботи функціонують як обробляючі чи виробляючі машини, інтегровані у виробничий процес для забезпечення високої точності, продуктивності та якості.

Підйомно-транспортні (допоміжні) роботи

Ця група роботів виконує допоміжні функції, необхідні для обслуговування основного технологічного обладнання та забезпечення автоматизації допоміжних операцій. Основні завдання таких роботів включають:

- Установлення та зняття заготовок, деталей, інструментів;
- Очищення базових поверхонь деталей та обладнання;
- Завантаження та живлення конвєсрів;

Виконання транспортно-складських операцій, включаючи переміщення, укладання та складування продукції.

Ці групи роботів функціонують як частина інтегрованої автоматизованої системи, спрямованої на підвищення ефективності та зниження трудових витрат у виробничому процесі. Завдяки такій класифікації можна чітко визначати сфери застосування роботів і розробляти їх технічні характеристики відповідно до потреб виробництва.

1.2. Аналіз технологічних рішень пакувальних ліній із застосуванням роботів-маніпуляторів

Типові конструкції автоматичних маніпуляторів. Маніпулятор ПР поєднує в собі привод із двигуном і підсилювально-передатною ланкою (редуктором) і виконавчий механізм. Така комбінація найбільш характерна для маніпуляторів з електромеханічним приводом і антропоморфних роботів. У ряді випадків виконавчий механізм і привод виявляють собою єдине ціле, підсилювально-передатний механізм відсутній. Це властиво маніпуляторам із пневматичним і гідравлічним приводами, у яких шток пневматичного або гідравлічного циліндра одночасно є приводною й виконавчою ланкою маніпулятора. Компонування виконавчих пристроїв (рис. 1.5) визначається тою системою координат, для роботи в якій призначений робот. Як правило, кожний виконавчий механізм має один ступень рухливості. Тому на кожний ступінь свободи доводиться по одному приводу. Такі механізми побудовані на кінематичних парах п'ятого класу, що мають один ступень свободи. Вони більш надійні в експлуатації й простіше в обслуговуванні на відміну від механізмів четвертого й третього класів, які мають відповідно два й три ступені рухливості. Типовим прикладом маніпулятора, що працює в Декартові прямокутній системі координат, може служити маніпулятор (рис. 1.5,а), постачений двома поперечними каретками, які забезпечують транспортне переміщення робочого органа в горизонтальній площині ХУ і пневматичним приводом для переміщення у вертикальній площині. Маніпулятор (рис. 1.5,б) постачено двома електромеханічними приводами для переміщення в пласкій прямокутній системі координат ХУ. В обох випадках рух ротації робочого органу, тобто повороту захватною пристроєм на певний кут, є технологічним. Як видно із цих прикладів, підсилювально-передатними ланками маніпуляторів є приводні каретки, які можуть бути виконані у вигляді різних механізмів поступального переміщення, наприклад, у вигляді зубчасто-рейкової передачі, гвинтової пари ковзання або кочення, постачених додатковими напрямними.

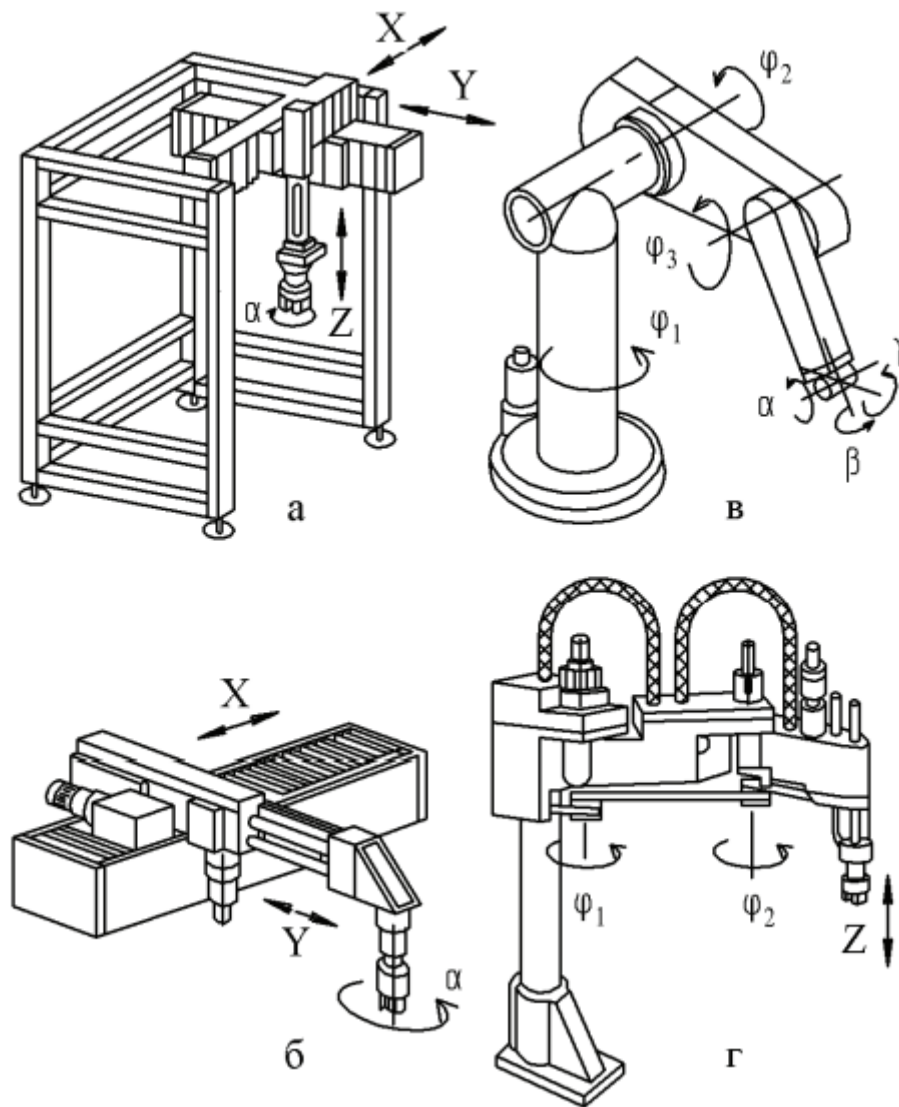


Рис. 1.5. Типові конструкції маніпуляторів промислових роботів

Останні роки ознаменувалися значним прогресом у технологіях і техніці, що вплинули на всі сфери людської діяльності, включаючи пакувальну індустрію. Ці зміни стали частиною глобального процесу, відомого як четверта промислова революція (Індустрія 4.0). З історичної точки зору, після винаходу машин, однією з ключових ліній розвитку стало створення автоматичних систем і робототехнічних комплексів, які поступово впроваджуються в пакувальні процеси. [11]

Виробництво упаковки та процес упакування продукції вимагають значних матеріальних і людських ресурсів, що прямо впливають на економіку

підприємств. Упаковка є суттєвим елементом, який визначає кінцеву вартість продукції. Особливо великі витрати на упаковку характерні для харчової промисловості, де якість упаковки безпосередньо впливає на термін зберігання та споживчі властивості продукції.

Основні функції упаковки [12]

Упаковка відіграє важливу роль у забезпеченні збереження та ефективного використання продукції. Вона виконує такі основні функції:

Ідентифікація товару та надання інформації

Упаковка дозволяє споживачеві розпізнати товар та отримати необхідну інформацію про нього. Це здійснюється через нанесення написів, етикеток, штрих-кодів, маркувань тощо.

Захист продукції від пошкоджень

Упаковка забезпечує захист товару від впливу агресивних хімічних середовищ, фізичних пошкоджень, псування та можливих крадіжок, тим самим підвищуючи надійність зберігання та транспортування.

Підвищення ефективності вантажопереробки

Уніфікація упаковки дозволяє стандартизувати складське та вантажопереробне обладнання, оптимізувати характеристики транспортних засобів і полегшити логістичні процеси.

Сприяння маркетингу та просуванню продукції

Упаковка виконує роль маркетингового інструмента, сприяючи рекламі, просуванню товарів та інформуванню споживачів про переваги продукції.

Значення автоматизації у пакувальній індустрії

Інтеграція робототехнічних систем у пакувальні процеси дозволяє не лише знизити витрати на упаковку, але й підвищити ефективність виробництва, забезпечити стабільну якість продукції та оптимізувати логістичні операції. У рамках Індустрії 4.0 акцент робиться на використанні інтелектуальних мехатронних систем, які здатні автоматизувати пакувальні операції, зменшити втрати та забезпечити конкурентоспроможність підприємств на глобальному ринку

У ході технологічного процесу пакування виконується послідовність

технологічних операцій, спрямованих на досягнення пакування продукції як кінцевого результату. Зазвичай, типовий технологічний процес пакування включає етапи, такі як дозування, фасування, виготовлення тари, закупорювання та етикетування. Враховуючи ці стадії технологічного процесу пакування, ключові функціональні модулі будь-якого упаковочного обладнання включають устаткування, що проводить дозування, фасування, виготовлення тари, закупорювання, етикетування та інші операції.

Для організації процесу пакування продукції на промисловому рівні важливо використовувати комплексний підхід, який включає в себе наступні аспекти:

- ефективне використання матеріальних, енергетичних, трудових та фінансових ресурсів з мінімізацією виробничих втрат;
- раціональна організація процесу пакування з створенням безперервного потокового виробництва;
- повна автоматизація та механізація всіх основних та вторинних операцій;
- комплексний контроль якості продукції та операцій пакування;
- інтегроване управління виробництвом, використовуючи сучасні комп'ютерні технології.

Під терміном «пакувальне обладнання» розуміється комплекс пристроїв, машин, поточкових ліній та інших технічних засобів, які виконують різноманітні операції, як основні, так і допоміжні, для забезпечення ефективного процесу пакування продукції.

Основні процедури пакування включають в себе модифікації у стані, структурі та фізико-хімічних характеристиках виробів, у той час як допоміжні операції стосуються змін у формі, розмірах, стані, розташуванні пакувальних матеріалів, тари та інших компонентів упаковки. Крім того, здійснюються обслуговуючі процедури, в основному пов'язані із функціонуванням обладнання, такі як діагностика, змащення, очищення та заміна робочих органів. Важливо відзначити, що всі ці операції можуть бути виконані за допомогою того ж самого типу обладнання.

Наразі існують два основних підходи до класифікації пакувального обладнання: перший базується на функціональному призначенні, а другий враховує конструктивні особливості цих засобів.

За функціональним призначенням пакувальне обладнання класифікується з урахуванням різних ознак:

1) Тип дії: Пакувальні машини розподіляються за типом дії на два класи – дискретної та безперервної дії.

2) Тип руху продукції: В залежності від руху продукції щодо робочих органів машини виділяють три класи:

- I клас – це машини непотокового типу, або так звані "непрохідні";
- II і III класи – це поточкові машини.

3) Ступінь механізації і автоматизації: Машини поділяються за ступенем механізації і автоматизації на три групи:

- з ручною системою керування;
- напівавтоматичної дії;
- автоматичної дії.

4) Кількість стадій пакування: Машини розподіляються за кількістю стадій пакування на одностадійні та багатостадійні.

У механізмах з дискретною дією виробу піддають обробці протягом конкретного визначеного періоду, а упакований продукт виводиться із машини по закінченню цього інтервалу. Після чого цей процес розпочинається знову. У пакувальних машинах безперервної дії робочий процес оперує в строго визначеному в часі режимі, де завантаження продукції та вивантаження упакованої одиниці відбуваються одночасно.

У машинах першого класу характеризується тим, що продукція, яка піддається упаковці, залишається на постійному положенні під час обробки, при цьому робочі органи спрямовані до неї, а потім відводяться від неї. Багатофункціональні машини цього класу можуть виконувати операції в паралельному, послідовному або послідовно-паралельному режимі. Цей тип машин характеризується невисокою продуктивністю.

У машинах другого класу характеризується можливістю розміщення

пакувальної продукції в різних положеннях, і в процесі зупинок у цих положеннях вона піддається обробці різними робочими органами. Машини цього класу поділяються на групи А і Б в залежності від системи транспортування. Групу А складають машини, де продукція переміщується лінійними або роторними системами, а до групи Б входять машини,

де переміщення продукції здійснюється робочими органами чи спеціальними пристроями, такими як елементи захоплення.

В машини третього класу впроваджено принцип поєднання операцій пакування з безперервним рухом в лінійних або роторних транспортних системах. Ці машини розподіляються на групи А і Б. У машинах групи А робочі органи не переміщуються разом із продукцією, тоді як у групі Б робочі органи рухаються паралельно з продукцією.

Машини другого і третього класів володіють високою продуктивністю, але мають значно більш складну конструкцію порівняно з машинами першого класу, що призводить до збільшення витрат на їх виробництво.

У пристроях напівавтоматичної дії в основному виконуються операції в автоматичному режимі, у той час як допоміжні процеси реалізуються залученням ручної праці. Інтеграція численних автоматизованих машин в потокову лінію з однією централізованою системою управління утворює складну автоматизовану систему.

Багатостадійні машини іноді отримують найменування «агрегати» або «лінії пакування». Багатостадійні та одностадійні машини також розрізняються за ступенем уніфікації операцій на універсальні і спеціальні. Спеціальні машини призначені для пакування продукції однакового типу у однаковий вид тари або упаковки. Універсальні машини відрізняються тим, що можуть використовуватися для різноманітної гами продукції та тари.

За конструктивними ознаками пакувальне обладнання поділяється на наступні види (табл. 1.1).

Таблиця 1.1. Класифікація пакувального обладнання

Класифікатор	Види
Компонування робочих органів	площинне просторове
Траєкторія переміщення пакувального продукту	горизонтальна вертикальна складна
Структура вхідних і вихідних потоків	однопотокові багатопотокові з розбіжними потоками із збіжними потоками із паралельними потоками із змішаними потоками
Траєкторія переміщення робочих органів	лінійні горизонтальні вертикальні складні комбіновані
Вид транспортних систем	лінійні роторні
Тип і вид приводу	одноприводні багатоприводні електромеханічні пневматичні гідравлічні, комбіновані

Розширення асортименту прийомів та технічних рішень, що використовуються для упакування завершеної продукції у споживчу упаковку, є наслідком варіації структурно-механічних властивостей виробів. У другому розумінні, це пов'язано з різноманітністю упаковочних матеріалів, і, в третьому, з умовами зберігання, транспортування та реалізації упакованих товарів. Типовий технологічний процес пакування готової продукції в споживчу упаковку можна розглядати як сукупність послідовно виконаних операцій [13, 14] (див. рис. 1.14).

Пакувальні операції виконуються за допомогою окремих машин або робочих органів, які вбудовуються у склад функціональних пристроїв або модулів.

Загальну структуру обладнання для пакування продукції можна представити наступним чином (рис. 1.15).



Рис. 1.14 – Технологічний процес пакування готової продукції

На сучасному етапі існують три основних методи пакування продукції в споживчу тару. Перший метод включає використання готової, завчасно виготовленої тари (банок, пляшок, коробок, ящиків тощо), в яку розміщується відповідна доза продукції. Зазвичай цей метод використовується для пакування в'язких або сипучих продуктів, які не мають стабільної форми та тенденції до зміни розмірів. Другий метод передбачає обгортання продукції упаковочним матеріалом або підготовленою упаковкою (висічкою, флатом).

Для використання цього методу продукція повинна мати стабільну конфігурацію і розміри, а також відповідну жорсткість та міцність. Третій метод базується на комбінації двох перших.

Висновки до розділу 1

Запропонована інформація надає обширний огляд розвитку та застосування промислових роботів, зокрема роботів-маніпуляторів у сучасних виробничих процесах. Класифікація роботів відбувається за різними критеріями, такими як елементна база, функції та покоління.

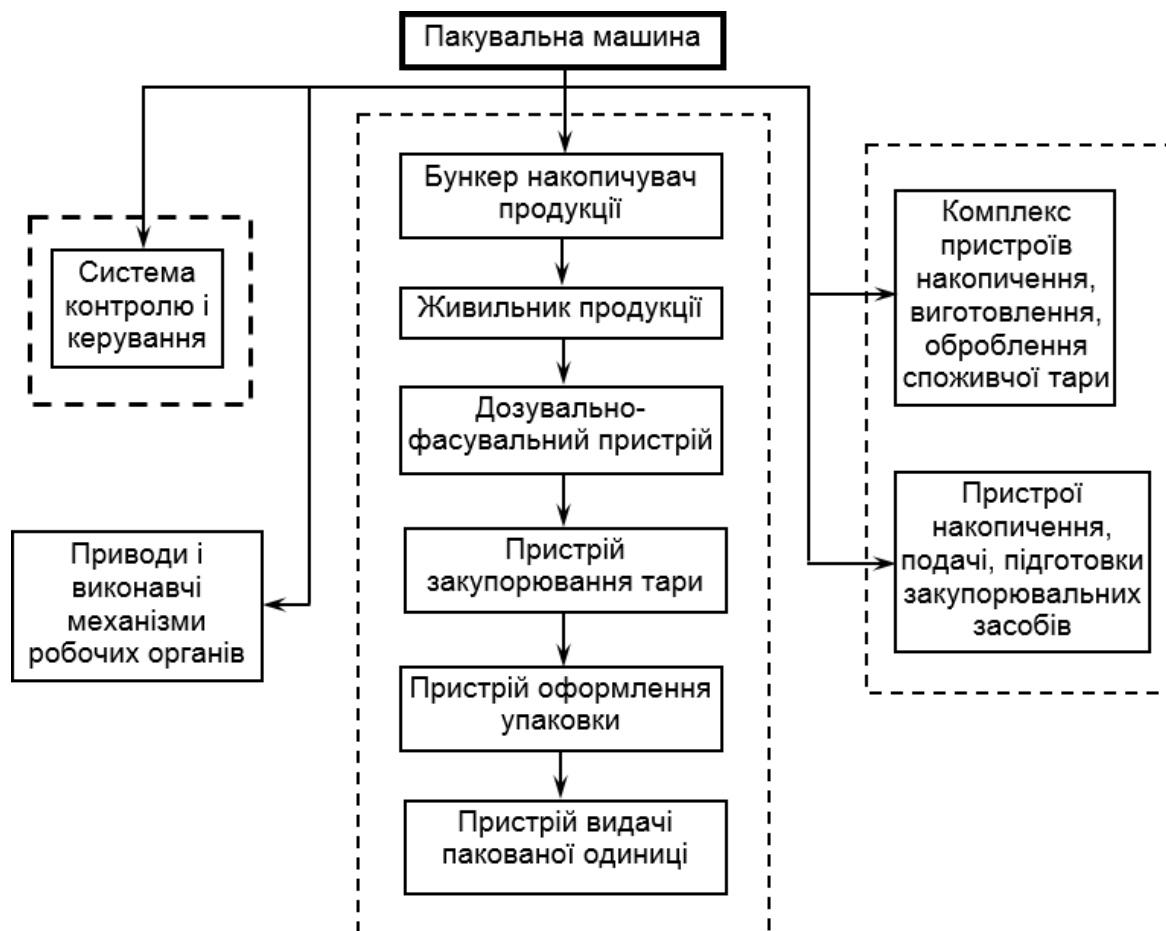


Рис. 1.15 – Структура пакувальної машини

Згідно з класифікацією за поколіннями, роботи першого покоління працюють на основі жорстко заданих програм, тоді як роботи другого покоління мають адаптивні системи відчуття, що дозволяє їм адаптуватися до змін у робочих умовах. Роботи третього покоління володіють інтелектуальними властивостями та можливістю самостійного навчання та прийняття рішень.

Подальше розглядання показало, що робототехнічні пристрої грають важливу роль у створенні гнучких виробничих систем. Інтеграція роботів у виробничі процеси дозволяє створювати комплексно-автоматизовані ділянки та цехи, а також гнучкі виробничі системи, що пристосовані для серійного виробництва різноманітних виробів.

Узагальнюючи, можна визначити, що роботи-маніпулятори є ключовим елементом сучасних виробничих систем, допомагаючи підвищувати ефективність, точність та гнучкість виробничих процесів у різних галузях промисловості.

Розділ 2. СТРУКТУРНО-КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА

2.1. Класифікація роботів-маніпуляторів для пакувальних ліній

Історичний розвиток робототехніки привів до формування трьох основних етапів оцінки рівня промислових роботів та робототехнічних установок (РТУ): роботи першого, другого та третього покоління. Кожне покоління характеризується певним рівнем технічної складності, функціональності та адаптивності. Роботи першого покоління працюють за жорсткою програмою, що означає їхню нездатність адаптуватися до змінних умов виробництва та зовнішнього середовища. Вони потребують суворо впорядкованого розміщення орієнтованих деталей у накопичувачі, що зумовлює обмеження в їх використанні. Основними характеристиками таких роботів є проста конструкція, можливість виконання повторюваних завдань, таких як завантаження та розвантаження верстатів, транспортування, складування. Попри обмежену гнучкість, ці роботи широко застосовуються у промисловості завдяки їхній простоті, надійності та економічній доцільності.

Роботи другого покоління працюють за гнучкою програмою та оснащені розвиненими сенсорними системами. Це дозволяє їм виконувати операції за принципом "ситуація – дія", адаптуючи алгоритм функціонування до поточного стану виробничого процесу. Основними характеристиками таких роботів є можливість аналізу зовнішніх умов за допомогою сенсорів, здатність до виконання складних завдань, таких як складання прецизійних виробів, а також гнучкість у зміні алгоритмів роботи залежно від виробничої ситуації. Ці роботи демонструють вищу ефективність та універсальність у порівнянні з роботами першого покоління.

Роботи третього покоління є інтегральними або інтелектуальними системами, які використовують елементи штучного інтелекту. Вони здатні до самонавчання, розпізнавання образів і адаптації до змін у зовнішньому середовищі. Основними характеристиками таких роботів є моделювання зовнішнього середовища, проведення аналізу виробничої ситуації, прийняття

рішень і планування власних дій, а також здатність навчатися на основі досвіду. Завдяки використанню штучного інтелекту ці роботи стають ключовим елементом сучасних автоматизованих систем. Вони мають широкий спектр застосувань, включаючи складні виробничі процеси, роботи в екстремальних умовах та взаємодію з людиною. Таким чином, еволюція роботів від простих автоматизованих систем до інтелектуальних пристроїв свідчить про поступовий перехід до високотехнологічного виробництва, що характеризується гнучкістю, адаптивністю та інноваційністю. Кожне нове покоління сприяє підвищенню ефективності, точності та безпеки виробничих процесів.

Щодо робіт третього покоління, в промислово розвинених країнах світу проводяться дослідження щодо переходу в системи управління роботизованими комплексами з використанням швидкодіючих ЕОМ з інтелектуальним інтерфейсом.

Це дозволяє користувачам працювати з керуючими ЕОМ засобами природної мови.

Загальна класифікація промислових роботів включає в себе від 7 до 12 класифікаційних ознак (залежно від джерела інформації). Оскільки ця класифікація досить громіздка, можливо розглянути її поетапно, розглядаючи приватні класифікації за найважливішими характеристиками.

Класифікація за характером виконуваних операцій (рис. 2.1)

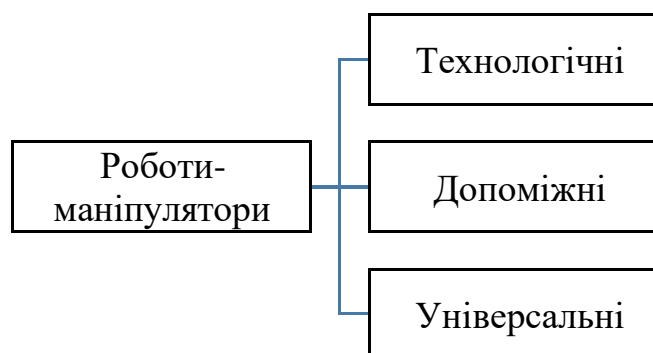


Рис. 2.1. Класифікація РМ за характером виконуваних операцій

Допоміжні технічні засоби використовуються для обслуговування основного технологічного обладнання, займаючись встановленням та зняттям заготовок, деталей, інструментів і оснащення, а також виконуючи різноманітні транспортно- складські операції та інші завдання. Універсальні технічні системи можуть виконувати як основні, так і допоміжні операції, здатні об'єднувати ознаки обох груп.

Класифікація за ступенем спеціалізації (рис. 2.2)

Функціональні можливості спеціального робочого механізму дозволяють йому виконувати конкретну технологічну операцію або обслуговувати певний тип обладнання. Спеціалізовані робочі механізми призначені для виконання конкретних технологічних операцій, таких як збірка, зварювання, гнуття, фарбування, штабельювання і інші.

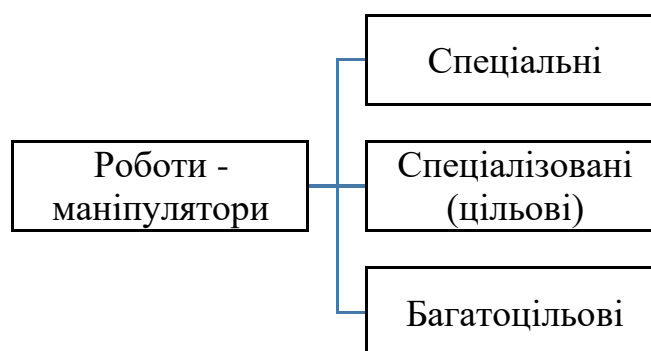


Рис. 2.2. Класифікація РМ за ступенем спеціалізації

Спеціалізовані допоміжні робочі механізми використовуються для обслуговування широкого спектру моделей основного технологічного обладнання, які об'єднані загальним набором маніпуляційних дій. Багатофункціональні робочі механізми призначені для виконання різноманітних основних або допоміжних операцій.

Якщо багатофункціональний робочий механізм може виконувати як основні, так і допоміжні операції, то його можна віднести до категорії універсальних.

Класифікація за системами координатних переміщень (рис. 2.3). Прямокутна система координат підрозділяється на плоску і просторову.

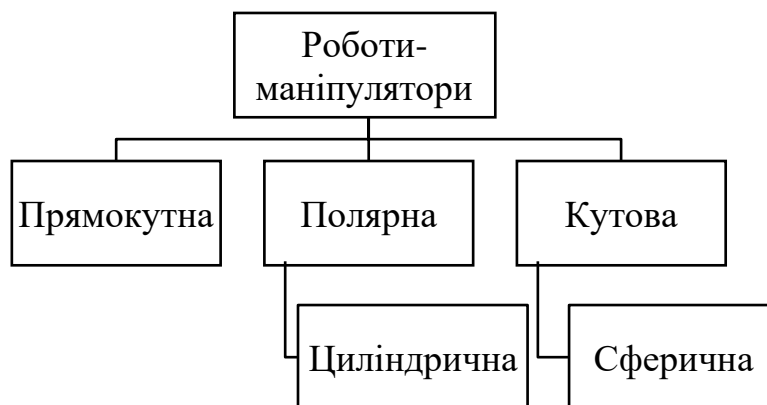


Рис. 2.3. Класифікація РМ по системі координатних переміщень
Класифікація за типом силового приводу (рис. 2.4)



Рис.2.4. Класифікація РМ за типом силового приводу

Класифікація за характером відпрацювання програми (рис. 2.5)



Рис. 2.5. Класифікація РМ за характером відпрацювання програми

Більшість використовуваних роботів відносяться до категорії жорстко програмованих. У цих роботах програма дій містить необхідну інформацію і залишається незмінною протягом процесу роботи. Адаптивні робочі механізми включають в себе інформацію про об'єкти та умови зовнішнього середовища. Завдяки сенсорному обладнанню ці роботи можуть коригувати

свою керуючу програму в реальному часі.

Гнучкопрограмовані автоматичні системи можуть розвивати стратегію дій, враховуючи свою ціль та інформацію, що надходить з оточуючого середовища.

Класифікація за характером програмування швидкостей і дискретності переміщень (рис. 2.6)

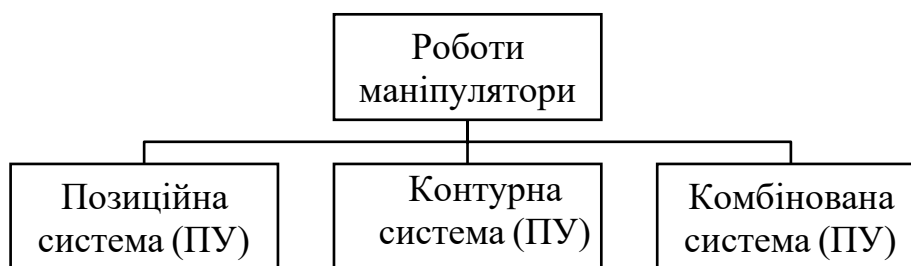


Рис.2.6. Класифікація РМ за характером програмування швидкостей і дискретності переміщень (ПУ - програмне управління)

Щодо характеру переміщення робочого органу, робочі механізми із позиційною системою програмного керування (СПУ) рухаються від точки до точки, встановлюючи конкретні координати позицій. У той час як робочі механізми з контурною СПУ рухаються по безперервній траєкторії, намічаючи контур або шлях.

В залежності від способу обробки наданої інформації, системи програмованого керування (СПК) можуть бути розділені на кілька типів: циклові, аналогові, цифрові та аналого-цифрові (гібридні). У циклових СПК переміщення програмується шляхом установки упорів, які управляють кінцевими перемикачами. В аналогових СПК інформація виражається у формі неперервно змінюваних значень фізичних (аналогових) величин. У системах числового програмованого керування (ЧПК) (як позиційних, так і контурних) інформація подається у вигляді цифрових кодів, що зберігаються на швидкозмінних носіях.

Інші класифікаційні ознаки включають область застосування за видами виробництва, число ступенів рухливості, вантажопідйомність, мобільність, конструктивне виконання та схему розташування приводів.

Метод управління маніпулятором робототехнічного пристрою поділяється на біотехнічні (зручним керуванням), інтерактивні (зі змішаним управлінням) та автоматичні.

Таким чином, класифікація робочих механізмів за різними ознаками надає детальний огляд їхніх характеристик та застосувань.

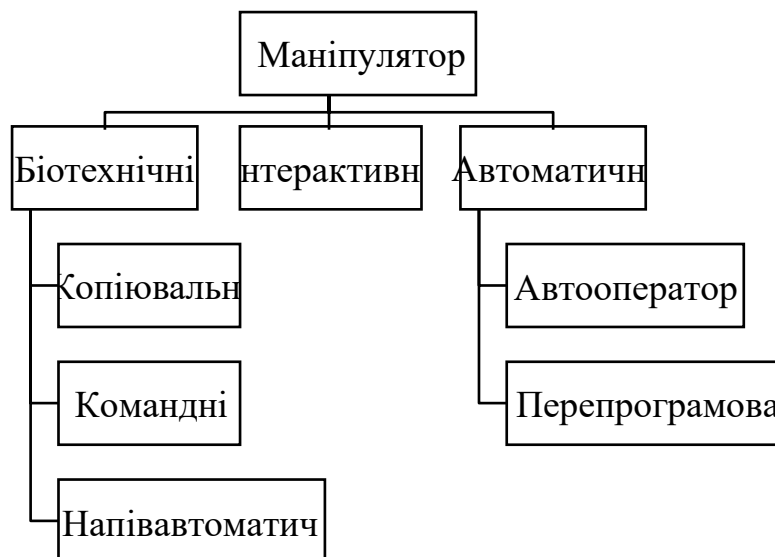


Рис.2.7. Класифікація маніпуляторів за методом управління

У біотехнічних маніпуляторах управління може проводитися дистанційно або безпосередньо за рахунок переміщення робочого органу. В копіюючому маніпуляторі рух робочого органу повторює рухи оператора, що є результатом намагань руки людини. У командному (некопіруючому) маніпуляторі рух робочого органу не пов'язаний кінематично з рукою оператора, і управління кожним ступенем рухливості здійснюється окремо за допомогою кнопок, рукояток тощо. У системі напівавтоматичного маніпулятора впроваджено комплексне рішення, яке об'єднує рукоятку з багатьма ступенями рухливості та спеціалізований обчислювач, відомий як мікроЕОМ. Цей обчислювач забезпечує конвертацію сигналів, надходячи з рукоятки, у сигнали, що ефективно керують рухами виконавчих органів з надзвичайною точністю та швидкістю. Усі біотехнічні маніпулятори відрізняються від автоматичних відсутністю пристроїв пам'яті, тому вони потребують постійної участі оператора в процесі управління.

У відміну від біотехнічних, інтерактивні маніпулятори оснащені пристроями пам'яті для автоматичного виконання окремих дій. Залежно від форми участі людини, інтерактивне управління може бути автоматизованим, коли відбувається чергування автоматичних режимів управління із біотехнічних, або супервізорним, коли маніпулятор виконує всі частини заданого циклу автоматично, але перехід від одного етапу до іншого може відбуватися тільки після отримання оператором цільової команди.

У автоматичних маніпуляторах виконання робочих функцій забезпечується без участі оператора. Деякі маніпулятори з інтерактивним управлінням можуть також відноситися до автоматичних в певних випадках.

2.2 Структура і кінематичні особливості роботів-маніпуляторів

Типовий робототехнічний пристрій (РТП) включає у себе різноманітні ключові компоненти: механічну систему, відому також як маніпулятор, технологічне обладнання, систему управління, інформаційну систему та пульт керування для введення програми [15] (рис. 2.8).

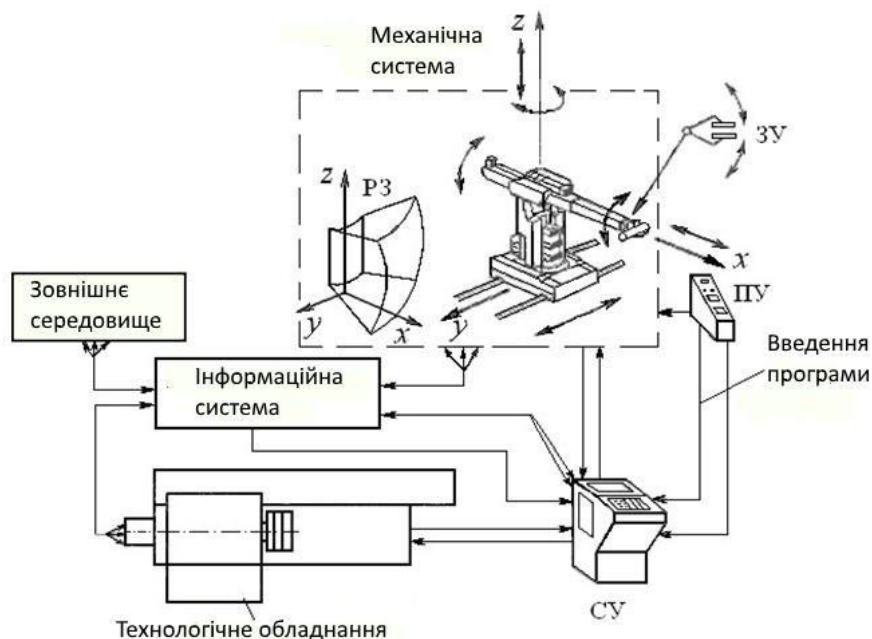


Рис. 2.8. Структура типового робототехнічного пристрою:

СУ – система управління; ПУ – пульт управління; ЗУ – пристрій захоплення;

РЗ – робоча зона і система координат основних рухів РМ

У такій структурі маніпулятор є основною механічною частиною, яка відповідає за виконання різноманітних завдань, технологічне обладнання забезпечує виконання конкретних функцій, система управління регулює рухи та дії пристрою, а інформаційна система забезпечує обмін та обробку даних для ефективного функціонування РТП. Керування пристроєм відбувається через спеціальний пульт, що дозволяє вводити програми та взаємодіяти з пристроєм у процесі роботи.

Система управління спрямована на відтворення та опрацювання програми функціонування РМ з урахуванням координації його дій із роботою технологічного обладнання. Управляюча програма містить послідовність простих інструкцій, виконання яких у певній послідовності приводить до розв'язання поставленої задачі.

Для бездоганного функціонування промислового робота є критично важливим мати повну та точну інформацію про послідовність кроків програми, точне просторове розташування рухомих елементів та бездоганне виконання кожного етапу за розкладом, а також жорсткий контроль за виконанням команд. Інформаційна система має розглядатися як важливий компонент, що відповідає за комплексне накопичення, обробку та передачу даних про функціонування всіх елементів та механізмів промислового робота, включаючи системи управління, а також звітність про зовнішнє середовище. Ця система вбудовується в програмне забезпечення й має пристрої зворотного зв'язку з різноманітними датчиками та засобами порівняння сигналів.

Механічна система, відома як маніпулятор, відіграє ключову роль у здійсненні рухів та реалізації технологічних завдань промислового робота. Маніпулятор – це вища форма механізму з відкритою кінематичною ланцюгом, що включає в себе несучі конструкції, приводи, передавальні механізми, виконавчі елементи та засоби захоплення.

Виконавчий механізм маніпулятора - це сукупність рухливо з'єднаних ланок, призначених для впливу на об'єкт маніпулювання чи оброблювану середу. Виконавчий механізм, який здійснює транспортовані та орієнтовані

рухи, визначається як рука ПР. У випадку, коли ланки виконавчого механізму з'єднані між собою обертовими кінематичними парами, вони утворюють шарнірну руку (рис. 2.9).

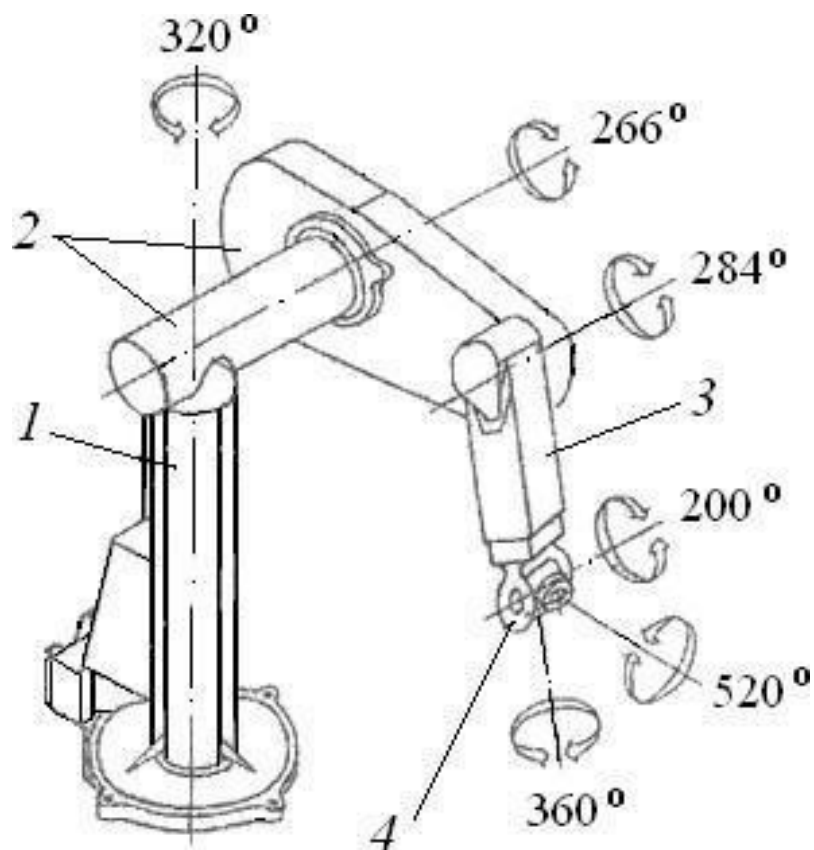


Рис 2.9. Кулькове з'єднання руки робота маніпулятора РМ - 01:

1 – колона (перший суглоб); 2 – плече (другий суглоб); 3 – лікоть (третій суглоб); 4 – кисть (четвертий суглоб); 360° – кут повороту кисті; 200° – хитання кисті (п'ятий суглоб); 520° – хитання кисті (шостий суглоб)

Захоплюючий пристрій (гріпер) - це складова частина механічної системи РМ, яка відповідає за утримання об'єкта маніпулювання в конкретному положенні. Об'єкти можуть варіювати за розміром, формою і масою, тому пристрої захоплення входять до числа змінних елементів РМ і

маніпуляторів. Зазвичай, РМ комплектуються стандартним набором пристроїв захоплення, які можна змінювати для вирішення визначеної технологічної задачі.

З'єднання ланок маніпулятора в кінематичну ланцюг здійснюється за допомогою кінематичних пар. Кінематична пара представляє собою з'єднання двох торцевих ланок, яке дозволяє їм рухатися одна відносно одної. Кінематичні пари класифікуються залежно від умов зв'язку, характеру дотику ланок і способу замикання. Обмеження, які обмежують вільний рух тіла, називають умовами зв'язку.

Класифікація кінематичних пар базується на числі умов зв'язку (кількості ступенів свободи). Таблиця 2.1 наводить найбільш поширені кінематичні пари. Під час підрахунку числа умов зв'язку, тобто визначення класу кінематичної пари, враховують тільки незалежні рухи. Наприклад, гвинтова кінематична пара одночасно включає обертання гайки і її переміщення вздовж гвинта. Оскільки ці рухи взаємопов'язані, гвинтову кінематичну пару відносять до п'ятого класу.








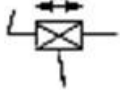

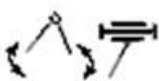

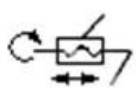
У більшості конструкцій РМ використовуються кінематичні пари п'ятого (V) класу - обертальні або поступальні. Вони забезпечують одну ступінь свободи в руху для кожної з двох рухомих ланок, коли рухається нерухома ланка. Число ступенів рухливості є важливою характеристикою механічної системи РМ і визначається як число ступенів свободи в кінематичній ланцюгу.

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

де $n = (m - 1)$ - число рухомих ланок; m - загальне число ланок; p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 - число кінематичних пар I, II, III, IV і V класу відповідно. Для плоских механізмів:

$$W_{пл} = 3n - 2p_5 - p_4. \quad (2.2)$$

Таблиця 2.1. Умовні позначення кінематичних пар

Клас пари	Число умов зв'язку	Число ступенів свободи	Найменування пари	Рисунок	Умовні позначення
III	3	3	Сферична		
IV	4	2	Циліндрична		
IV	4	2	Сферична з пальцем		
V	5	1	Поступальна		
V	5	1	Обертальна		
V	5	1	Гвинтова		

о

Для кінематичного ланцюга маніпулятора, утвореної тільки парами V класу, число ступенів рухливості робота визначається за формулою:

$$W = 6n - 5p_5 \quad \text{і} \quad W_{\text{пл}} = 3n - 2p_5. \quad (2.3)$$

У відкритих кінематичних ланцюгах, до яких відносять механічні системи РМ і маніпуляторів, число рухомих ланок завжди дорівнює числу пар:

$$n = p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5. \quad (2.4)$$

Як приклад визначимо число ступенів свободи маніпулятора, кінематична схема якого показана на рис. 2.10.

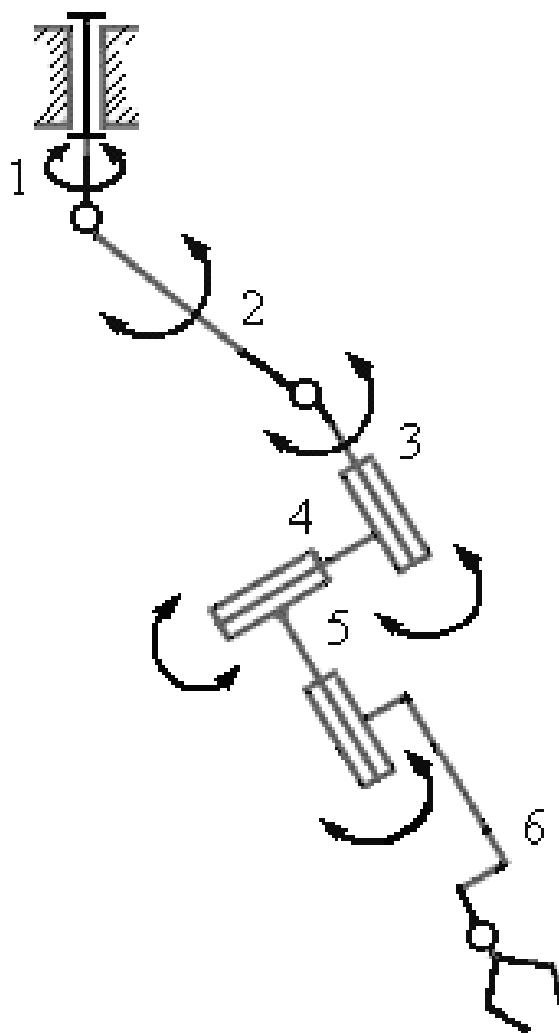


Рис. 2.10. Кінематична схема маніпулятора:

1 – 6 – рухливі ланки

Число ступенів свободи (W) маніпулятора можна визначити за допомогою структурної формули. У даному випадку, маніпулятор має 6 рухомих ланок, і кожна ланка включає обертальну кінематичну пару. Оскільки рух губок захоплення не враховується, то він не додає додаткових ступенів свободи.

$$W = 6n = 6 \times 6 - 5 \times 6 = 6 \quad (2.5)$$

Можливі ступені рухливості для зварювальних роботів типу IR-160/60 і IR-601/60 від німецької фірми «Кіка» показані стрілками на рис. 2.11. Рухомі

ланки механічної системи промислового робота (ПР) розподіляються за допомогою стрілок на три групи: орієнтуючі (локальні), транспортуючі (регіональні) і координатні (глобальні). Здійснення повного просторового маніпулювання об'єктом маніпулятор повинен мати шість ступенів рухливості: три орієнтуючі – для досягнення потрібної кутової орієнтації захоплення або інструменту і три транспортуючі – для переміщення об'єкта в зазначену точку простору.

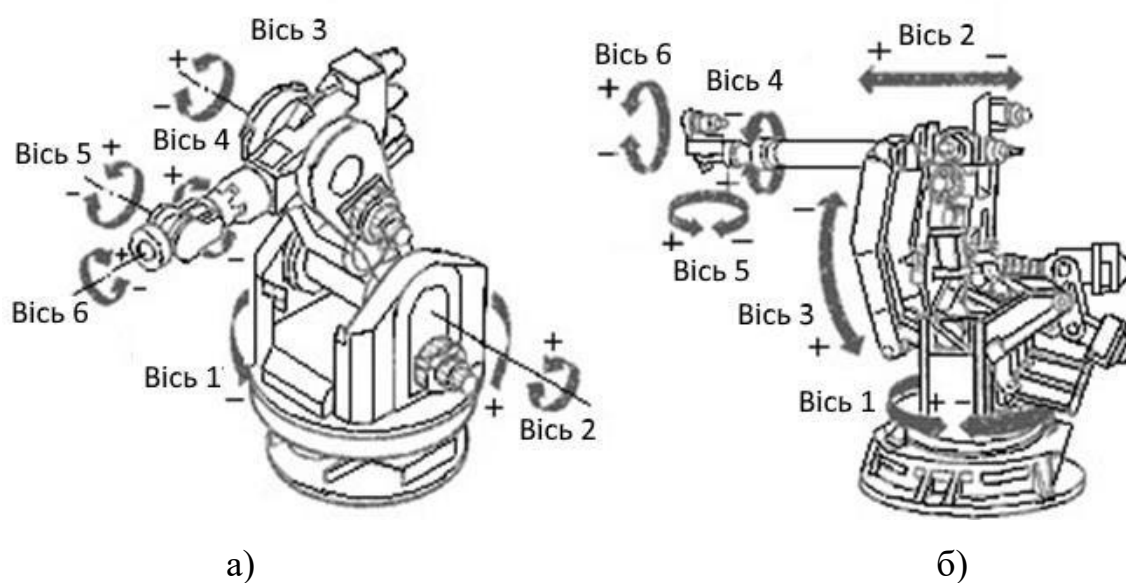


Рис. 2.11. Ступінь рухомості зварювального робота типу IR-160/60 (а) та IR-601/60 (б) німецької фірми "Kuka" [5]

Транспортування руху захоплення пристрою або інструменту в різних областях робочої зони визначається розміром посилення руки та пропорційно розміру водозабірної зони технологічного обладнання. Координати в таких портативних рухах можуть реалізовуватися на відстанях, що перевищують розміри та обслуговування обладнання або робочого місця.

Механічні системи можна розділити на чотири елементи конструкції, різного призначення і характеру рухів: база (фіксований зв'язок) - підтримка структури; корпус (стійка); механічні руки; захоплення. Кількість ступенів

мобільності: $W_0 = 0$; $W_k \geq 0$ (визначається мобільністю тощо); механічна рука $W_m \geq 1$ (визначається призначенням тощо); пристрій захоплення $W_z \geq 0$ (залежно від того, як утримується маніпуляційний об'єкт і його конструкція).

Основні координати рухів частин механічної системи маніпуляторів і промислових роботів та їх відповідні приклади структурних схем кінематики показані на рисунку 2.12.

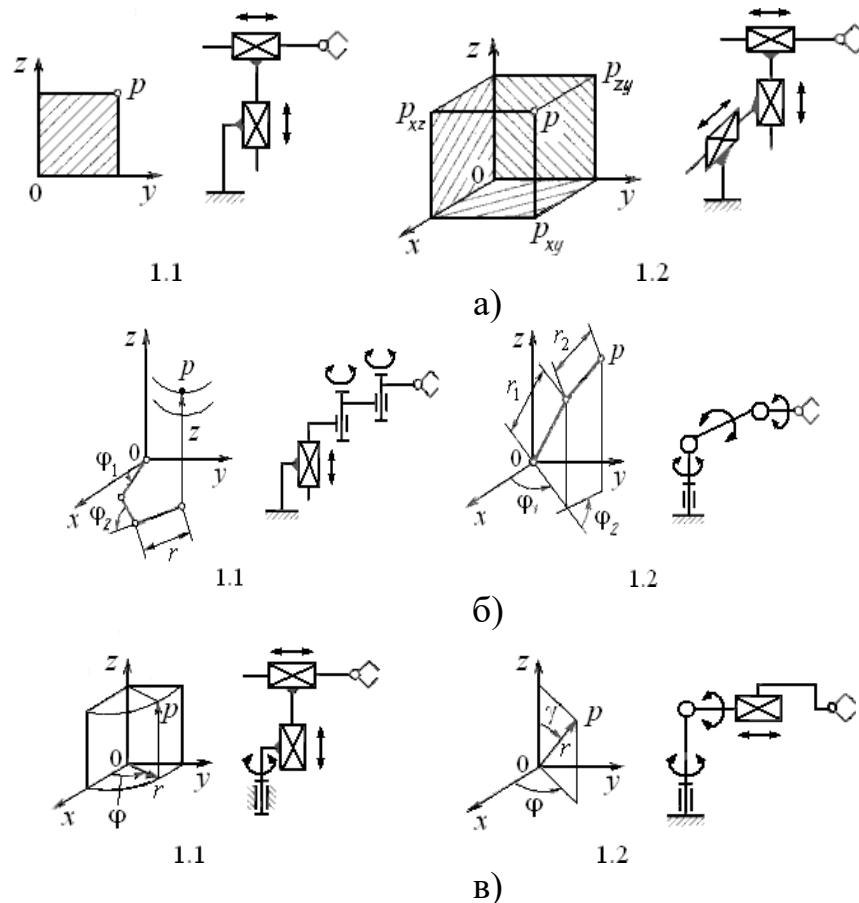


Рис. 2.12. Базова система координат рухів частин механічної системи маніпуляторами і промислових роботів і їх відповідні приклади структурних кінематичних схем:

- а – прямокутна система координат (1,1–1.2 плоскі, просторі);
- б – полярна система координат (1,1–1.2 циліндричні, сферичні);
- в – кутова система координат (1,1–1.2 циліндричні, сферичні).

Прямокутні системи координат (IC) дозволяють об'єкту переміщуватися в зазначених точках простору r по прямолінійному русі, паралельно осі маніпулятора: двома для плоскості і трьома для просторового руху (рис. 2.12). Полярні системи координат, представлені циліндричними і сферичними SC (рис. 2.12, б). Циліндрична SC характеризується рухом об'єкта в напрямку радіус-вектора r та кутів γ , θ , а також вздовж осі z . Сферична SC дозволяє об'єкту рухатися лінійно r і обертатися під кутами θ і γ в двох взаємно перпендикулярних площинах.

Циліндричні та сферичні системи координат – це потужні інструменти, які вимагають від користувача глибокого розуміння та високої експертності. Ці системи, в якості складових складних криволінійних систем координат, є серед найбільш високорівневих для освоєння. З іншого боку, ангулярна (кутова) система координат виявляється інструментом повної контрольної сили, необхідним для керування важкими шарнірними руками багатоланкових маніпуляторів (див. рис. 2.12, в). Відповідно до цієї ангулярної системи (яка не зображена на рис. 2.12, (в)), об'єкти рухаються в координатних площинах, забезпечуючи безперервну дію завдяки відносним обертанням ланок руки, що мають стійку довжину.

Ангулярно-циліндрична система, з її додатковим зміщенням уздовж осі z , надає більшу складність та гнучкість управління. Ангулярно-сферична система дозволяє переміщати об'єкти у просторі виключно через відносні кутові обертання ланок руки, що забезпечує максимальну ефективність та точність виконання завдань.

2.3. Моделювання динамічної взаємодії ПЗП з вантажем при його транспортуванні по прямолінійній траєкторії

Головне завдання моделювання полягає у визначенні оптимальної орієнтації пристрою захоплення, при якій енергетичні витрати на утримання вантажу будуть мінімальними. Вихідні дані включають технічні характеристики пристрою захоплення, параметри вантажу та траєкторії.

Моделювання буде проводитися для випадку, коли центр ваги вантажу зміщений відносно осі симетрії пристрою захоплення. Крім того, будуть враховані сили лобового опору повітря та інерційні сили, що виникають при переорієнтації.

Мінімізація витрат енергії під час стиснення повітря за допомогою струминного пристрою захоплення (див. рис. 2.13) передбачає зниження сили тяжіння. Це досягається за умови мінімізації реакцій в опорах пристрою захоплення під час транспортування вантажу без відшаровування. Забезпечення цього ефекту гарантує досягнення рівноваги всіх сил, що діють на вантаж. Розглянемо випадок переміщення вантажу вздовж прямої траєкторії (див. рис. 2.13). У цьому процесі пристрій захоплення тягне вантаж і стискає його до трьох фрикційних елементів. Така конфігурація забезпечує стабільність утримання габаритних вантажів, що відрізняється від розглянутої раніше схеми. Для моделювання руху використовується маніпулятор IRB 1200 від ABB, а дані для перевірки моделі отримані за допомогою програмного забезпечення RobotStudio від ABB [16]

Сила лобового опору в загальному вигляді обчислюється за формулою:

$$Q = k_{l0} \cdot S \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (2.6)$$

де k_{l0} – коефіцієнт лобового опору тіла, який залежить від форми поверхні вантажу, ρ – густина повітря, v – швидкість руху вантажу, S – площа вантажа, перпендикулярна до напрямку руху тіла. Для пластини сила лобового опору рівна :

$$Q = \rho \cdot S \cdot v^2 \frac{\pi \sin \alpha}{4 + \pi \sin \alpha}, \quad (2.7)$$

де α – кут між напрямком руху вантажу і нормаллю до площини пластини.

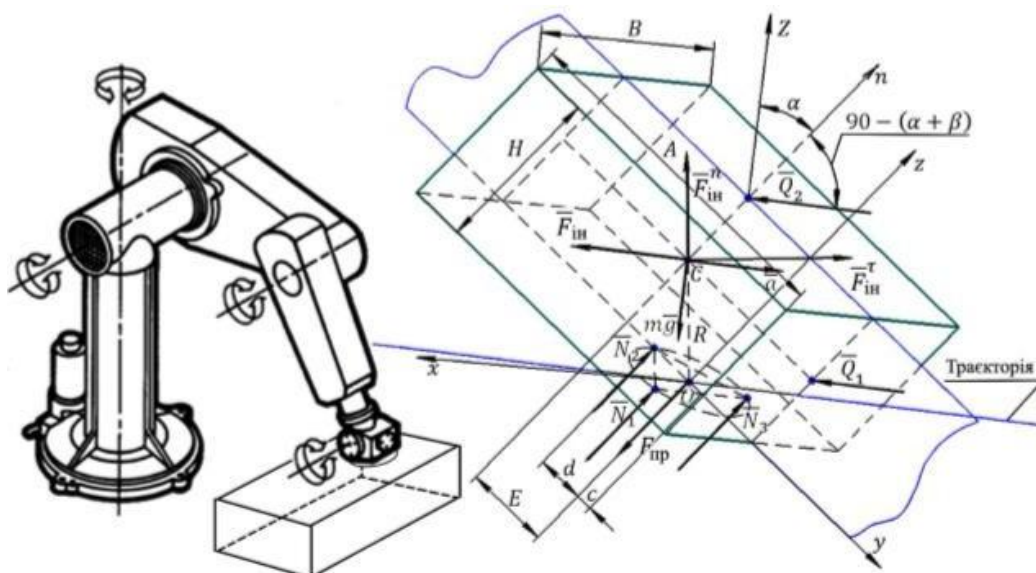


Рис. 2.13. Розрахункова схема сил, що діють на вантаж призматичної форми під час транспортування.[20]

В формулі (2.6), де коефіцієнт лобового опору позначений як k_{10} , залежить від форми вантажу. У випадку паралелепіпеда, який має дві складові сили лобового опору Q_1 на площину PGTF та Q_2 на площину LNGP, формула буде наступною:

$$Q_1 = \rho B H v^2 \frac{\pi \cos \alpha}{4 + \pi \cos \alpha};$$

$$Q_2 = \rho A B v^2 \frac{\pi \sin \alpha}{4 + \pi \sin \alpha}.$$
(2.8)

На рисунку 2.15 наведено дані про графік швидкостей та прискорень під час транспортування вантажу вагою 1 кг протягом 1,9 секунд, зафіксовані за допомогою програмного забезпечення RobotStudio від компанії ABB.

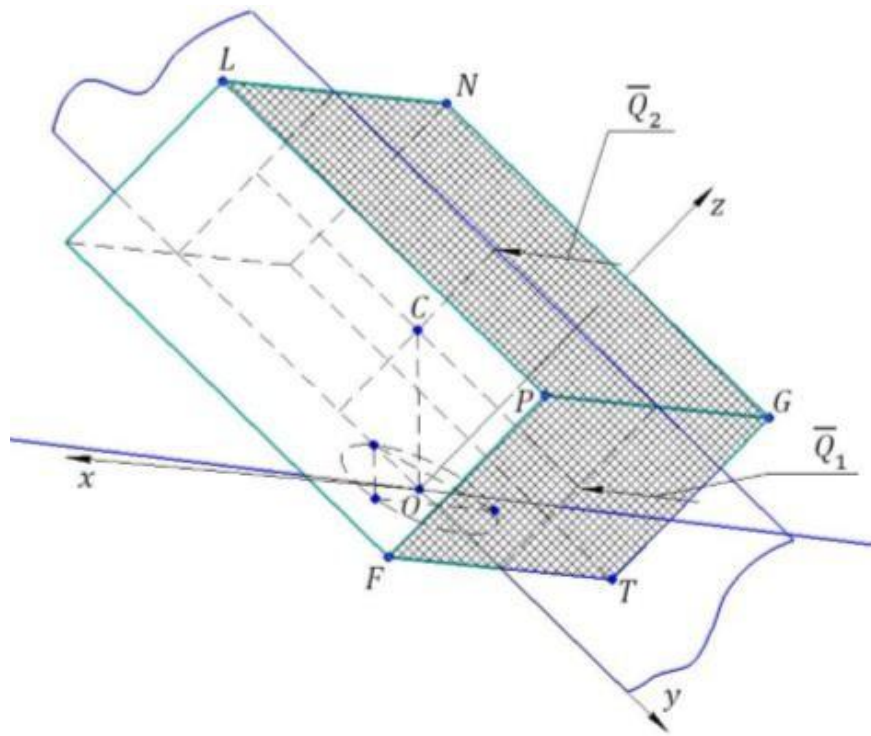


Рис. 2.14. Площини вантажу на які діють сили лобового опору.

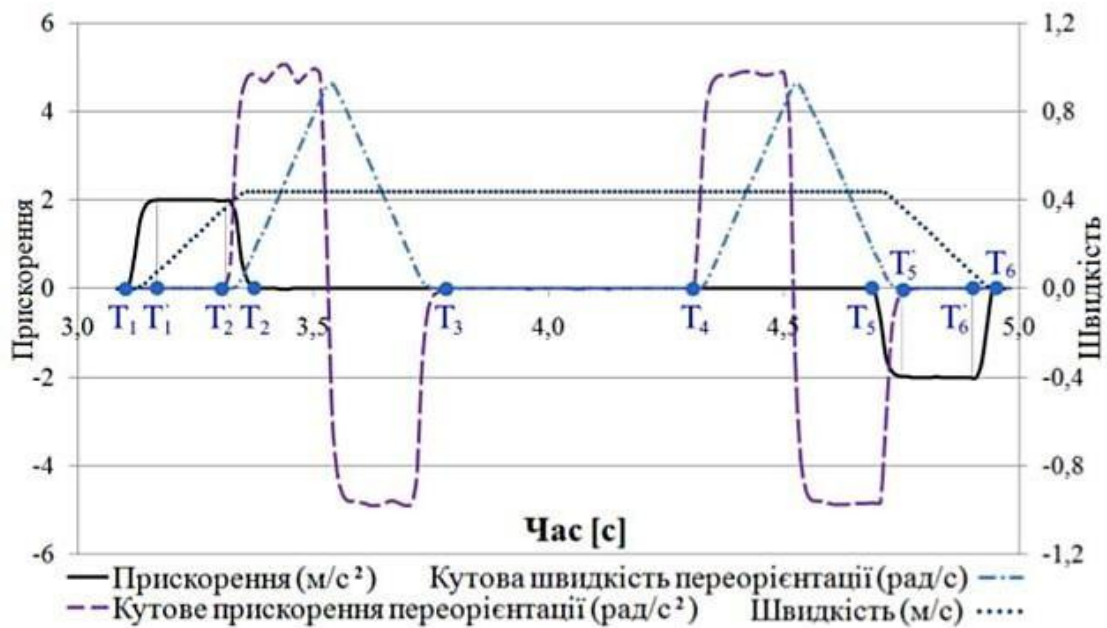


Рис. 2.15 Графік швидкостей і прискорень вантажу (T_1 -3,1 с, T_2 -3,3 с, T_3 -3,75 с, T_4 -4,3 с, T_5 -4,69 с, T_6 -4,95 с.)

Траєкторію T_1-T_6 розділено на окремі відрізки: T_1-T_2 – розгін; T_2-T_3 – переорієнтація з попередньої орієнтації, яка була на відрізку T_1-T_2 на орієнтацію, яка необхідна на відрізку T_3-T_4 ; T_3-T_4 – транспортування вантажу зі сталою швидкістю; T_4-T_5 – переорієнтація з попередньої орієнтації, яка була на відрізку T_3-T_4 , на орієнтацію необхідну на відрізку T_5-T_6 ; T_5-T_6 – уповільнення. Згідно запропонованої моделі безвідривне транспортування вантажу забезпечується на відрізках: T_1-T_1' , $T_2'-T_3-$, T_4-T_5' , $T_6'-T_6$ за рахунок сили тяжіння пристрою захоплення (ЗП), $T_1'-T_2'$, T_3-T_4 , $T_5'-T_6'$ за рахунок оптимальної орієнтації і сили тяжіння ЗП.

Для відрізків прямої T_1-T_1' , $T_2'-T_2'$, $T_2'-T_3$, T_3-T_4 , T_4-T_5' , $T_5'-T_6'$, $T_6'-T_6$ необхідно знайти максимально ефективну силу тяжіння для забезпечення безперешкодного переміщення вантажу. Для відрізків $T_1'-T_2'$, T_3-T_4 , $T_5'-T_6'$ необхідно знайти оптимальну орієнтацію, а саме кут α , при якому сила тяжіння, що забезпечує безвідривне транспортування вантажу, буде максимально знижена. Запишемо умови рівноваги сил, відносно координатної системи, що зв'язана з точкою закріплення ЗП.

$$\begin{aligned}
 \sum X &= 0 \Rightarrow 0 = 0, \\
 \sum Y &= 0 \Rightarrow mg \sin \alpha - (Q_1 + Q_2 + F_{in}) \cos(\alpha + \beta) - m\omega^2 E + \\
 &+ m\varepsilon \frac{H}{2} - f(N_1 + N_2 + N_3) = 0, \\
 \sum Z &= 0 \Rightarrow -mg \cos \alpha - (Q_1 + Q_2 + F_{in}) \sin(\alpha + \beta) - F_{np} + \\
 &+ N_1 + N_2 + N_3 + m\omega^2 \frac{H}{2} + m\varepsilon E = 0, \\
 \sum M_{ox} &= 0 \Rightarrow (N_1 + N_3)c - N_2d + mgE \cos \alpha - mg \frac{H}{2} \sin \alpha + \\
 &+ F_{in} E \sin(\alpha + \beta) + F_{in} \frac{H}{2} \cos(\alpha + \beta) + Q_1 \frac{A}{2} \cos(\alpha + \beta) - \\
 &- Q_1 \left(\frac{A}{2} - E \right) \sin(\alpha + \beta) + Q_2 H \cos(\alpha + \beta) + Q_2 E \sin(\alpha + \beta) - m\varepsilon R^2 = 0, \\
 \sum M_{oy} &= 0 \Rightarrow (N_1 - N_3)W = 0 \Rightarrow N_1 = N_3, \\
 \sum M_{oz} &= 0 \Rightarrow 0 = 0.
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

З умови $\Sigma \quad Y = 0, \Sigma \quad M_{\alpha x} = 0$ знаходимо N_1 і N_2

$$\begin{aligned}
 N_1 = & \left(\frac{d}{2(c+d)f} \right) \left[mg \sin(\alpha) - (Q_1 + Q_2 + F_{in}) \cos(\alpha + \beta) - \right. \\
 & \left. -m \left(\omega^2 E - \varepsilon \frac{H}{2} \right) \right] - \\
 & - \frac{1}{2(c+d)} mgE \cos(\alpha) + \frac{1}{2(c+d)} mg \frac{H}{2} \sin(\alpha) - \frac{1}{2(c+d)} maE \sin(\alpha + \beta) \cdot \\
 & - \frac{1}{2(c+d)} ma \frac{H}{2} \cos(\alpha + \beta) - \frac{1}{2(c+d)} Q_1 \frac{A}{2} \cos(\alpha + \beta) + \\
 & + \frac{1}{2(c+d)} Q_1 \left(\frac{A}{2} - E \right) \sin(\alpha + \beta) - \frac{1}{2(c+d)} Q_2 H \cos(\alpha + \beta) - \\
 & - \frac{1}{2(c+d)} Q_2 E \sin(\alpha + \beta) + \frac{1}{2} m \varepsilon R^2,
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

$$\begin{aligned}
 N_2 = & \frac{c}{(c+d)f} \left[mg \sin(\alpha) - (Q_1 + Q_2 + F_{in}) \cos(\alpha + \beta) - \right. \\
 & \left. -m \left(\omega^2 E - \varepsilon \frac{H}{2} \right) \right] + \\
 & + \frac{1}{(c+d)} mgE \cos(\alpha) - \frac{1}{(c+d)} mg \frac{H}{2} \sin(\alpha) + \frac{1}{(c+d)} maE \sin(\alpha + \beta) + \\
 & + \frac{1}{(c+d)} ma \frac{H}{2} \cos(\alpha + \beta) + \frac{1}{(c+d)} Q_1 \frac{A}{2} \cos(\alpha + \beta) - \\
 & - \frac{1}{(c+d)} Q_1 \left(\frac{A}{2} - E \right) \sin(\alpha + \beta) + \frac{1}{(c+d)} Q_2 H \cos(\alpha + \beta) + \\
 & + \frac{1}{(c+d)} Q_2 E \sin(\alpha + \beta) - m \varepsilon R^2.
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

З (2.9, 2.10, 2.11) випливає, що $N_2 > N_1$, оскільки центр мас вантажу зміщується в сторону N_2 і коли задовільняються передумови перекидання вантажу $N_1 = N_3 = 0$, у такому випадку сила тяжіння буде мінімальною значенням. З цих умов, на основі (2.9) отримаємо рівняння для знаходження кута α :

$$\begin{aligned}
& m \left[\varepsilon \left(R^2 + \frac{Hd}{2f} \right) - \frac{d}{f} \omega^2 E \right] + \\
& + m \left\{ \begin{aligned} & \frac{d}{f} (g \sin(\alpha) - a \cos(\alpha + \beta)) - g \left(E \cos(\alpha) - \frac{H}{2} \sin(\alpha) \right) - \\ & - a \left(E \sin(\alpha + \beta) + \frac{H}{2} \cos(\alpha + \beta) \right) \end{aligned} \right\} - \\
& - Q_1 \left[\left(\frac{d}{f} + \frac{A}{2} \right) \cos(\alpha + \beta) + \left(E - \frac{A}{2} \right) \sin(\alpha + \beta) \right] + \\
& + Q_2 \left[\left(\frac{d}{f} + H \right) \cos(\alpha + \beta) + E \sin(\alpha + \beta) \right] = 0.
\end{aligned} \tag{2.12}$$

Для прикладу підставимо дані для ділянки $T' - T'$:

1 2

$A = 0,25$ м, $B = 0,1$ м, $H = 0,1$ м, $E = 0,095$ м, $d = 0,03$ м, $c = 0,015$ м,
 $\rho = 31,25 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $I = 0$ рад, $a = 2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$, $m = 0,1$ м кг, $\omega = 0 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$, $\varepsilon = 0 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$, $f = 0,11$
при швидкості

$v = 0.44 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ оптимальний кут дорівнює $\alpha = 28.075$ град, а при швидкості

$v = 0.22 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ оптимальний кут дорівнює $\alpha = 27,96$ град .

З цього можна зробити висновок, що оптимальна орієнтація майже не буде змінювати своє значення при такій зміні швидкості, а буде змінювати значення лише при збільшенні прискорення (рис. 2.16), тому за найкращий кут будемо вважати α при максимальній швидкості. З третього рівняння (2.12) знайдемо мінімальну силу тяжіння F_{np} , яка необхідна при забезпеченні оптимальної орієнтації:

$$\begin{aligned}
F_{np} = m \left[g \left(\frac{\sin(\alpha)}{f} - \cos(\alpha) \right) - \omega^2 \left(\frac{E}{f} - \frac{H}{2} \right) + \varepsilon \left(\frac{H}{2f} + E \right) \right] - \\
- (Q_1 + Q_2 + F_{in}) \left(\frac{\cos(\alpha + \beta)}{f} + \sin(\alpha + \beta) \right).
\end{aligned} \tag{2.13}$$

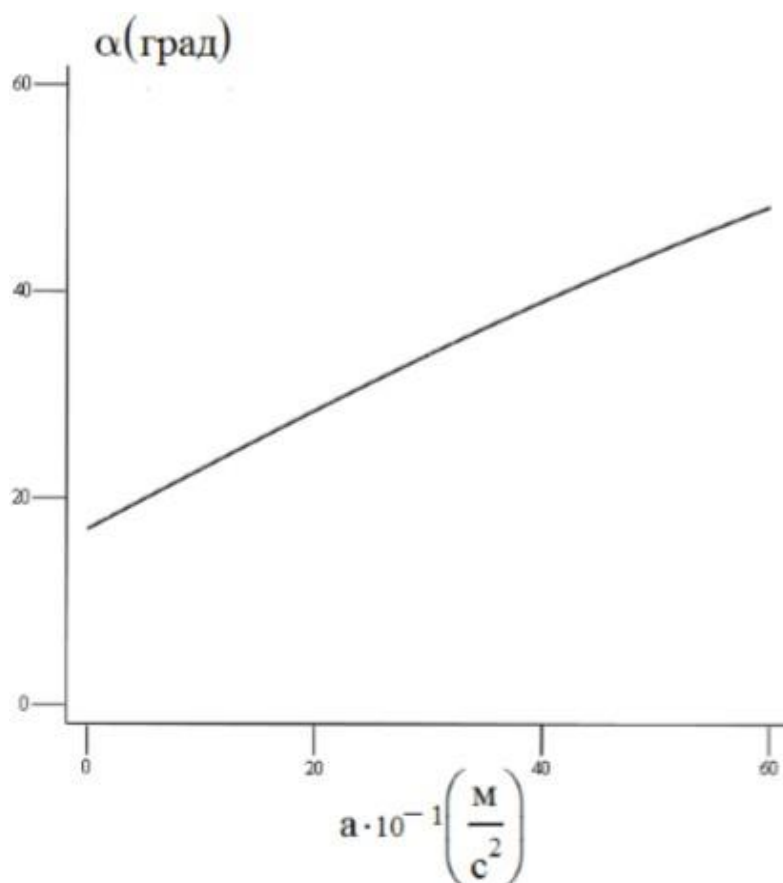


Рис. 2.16. Графік залежності кута оптимальної орієнтації від прискорення

В нашому випадку $\alpha = 28.075$ град , а мінімальна сила необхідна для $F_{\text{пр}} \geq 1.606$ Н безвідривного транспортування на цій ділянці

Аналогічно розраховуємо оптимальний кут орієнтації на ділянці $T_3 - T_4$ ($\alpha = 16.558$ град, $F_{\text{пр}} \geq 1.58$ Н), $T'_5 - T'_6$ ($\alpha = 4.985$ град, $F_{\text{пр}} \geq 1.613$ Н).

На відрізку $T_1 - T'_1$ Знайдемо мінімальну силу тяжіння. Вона відповідає найбільшому значенню сили тяжіння під час зміни швидкості на даному інтервалі $0 \leq v \leq 0.22 \frac{\text{M}}{\text{C}}$, та прискорення на цьому відрізку $0 \leq a \leq 2 \frac{\text{M}}{\text{C}^2}$, (рис. 2.17), а цьому відрізку та відповідає значенню, згідно з нашою інформацією $F_{\text{пр}} \geq 3.328$ Н.

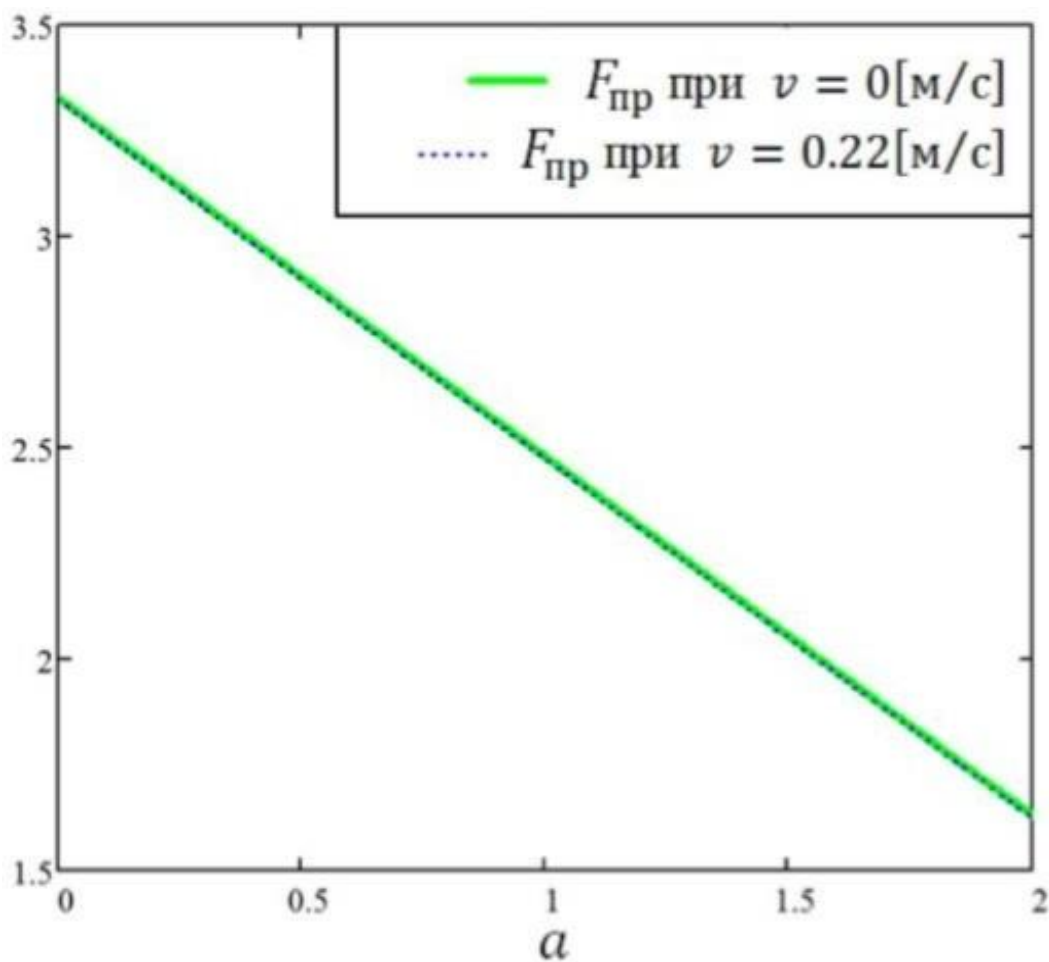


Рис. 2.17 Графік залежності мінімальної сили тяжіння від прискорення

Знайдемо необхідну силу тяжіння на цих інтервалах $T'_2-T_3, T_4-T'_5$ відносно зміни кута орієнтації $16.558 \leq a \leq 28.075$ град (рис. 2.18), $16.558 \leq a \leq 4.985$ град, прискорення переналаштування $-5 \leq \varepsilon \leq 5 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$ та швидкості переорієнтації $0 \leq \varepsilon \leq 1 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$.

Вона дорівнює максимальному значенню мінімальної сили тяжіння, необхідної для забезпечення безперервної переорієнтації вантажу на цих інтервалах. У нашому випадку для відрізка T'_2-T_3 сила тяжіння повинна відповідати умові $F_{пр} \geq 3.581 \text{ Н}$, а для інтервалу $T_4-T'_5$ $F_{пр} \geq 1.855 \text{ Н}$.

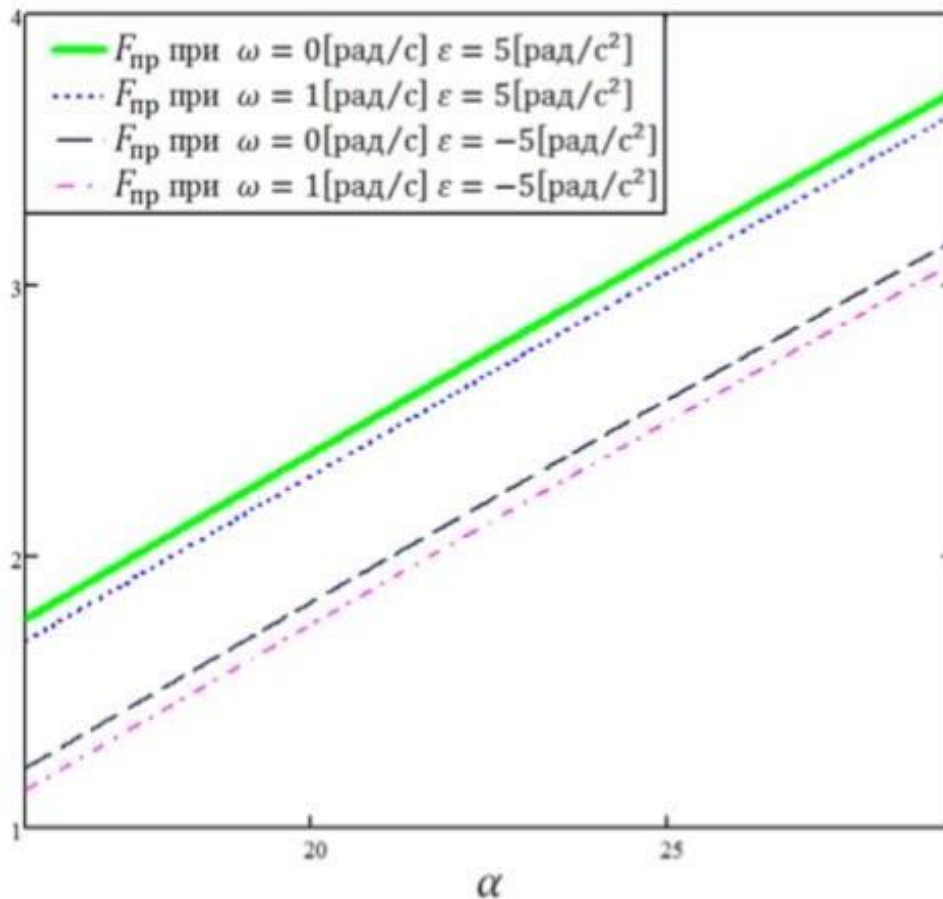


Рис. 2.18 Графік залежності мінімальної сили тяжіння від орієнтації
 $16.558 \leq \alpha \leq 28.075$ град

Мінімально необхідна сила тяжіння на цьому проміжку $T'_6 - T_6$ дорівнює максимальному значенню мінімальної сили тяжіння у відношенні до зміни швидкості $0 \leq v \leq 0.22 \frac{m}{c}$ та прискорення $0 \leq a \leq -2 \frac{m}{c^2}$ (рис. 2.18) за нашими даними $F_{пр} \geq 1.627$ Н.

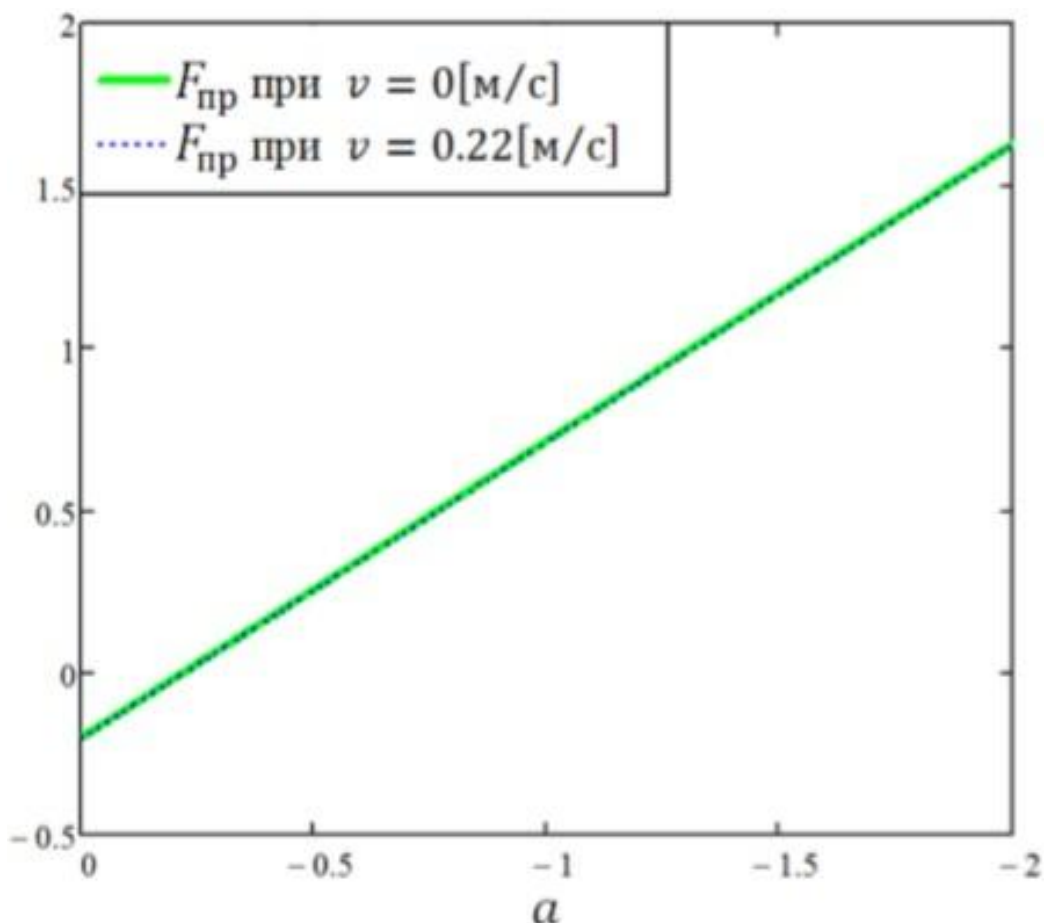


Рис. 2.19 Графік залежності мінімальної сили тяжіння від прискорення

Для оцінки впливу зміщення центру мас вантажу відносно осі симетрії ЗП буде створено графік, що відобразить залежність кута оптимальної орієнтації від цього зміщення центру мас вантажу (рис. 2.19). З рисунку 2.19 видно, що для $E = 0$ м, $F_{\text{пр}} \geq -0.978$ Н, це свідчить, що при таких параметрах реакції в опорах ЗП є позитивними, тому сила тяжіння не є необхідною для утримання вантажу. При $E=0.095$ м, сила тяжіння складе $F_{\text{пр}} = -1.58$ Н. Це безсумнівно, що мінімально необхідна сила тяжіння зростатиме зі збільшенням відстані центру мас вантажу від осі симетрії ЗП.

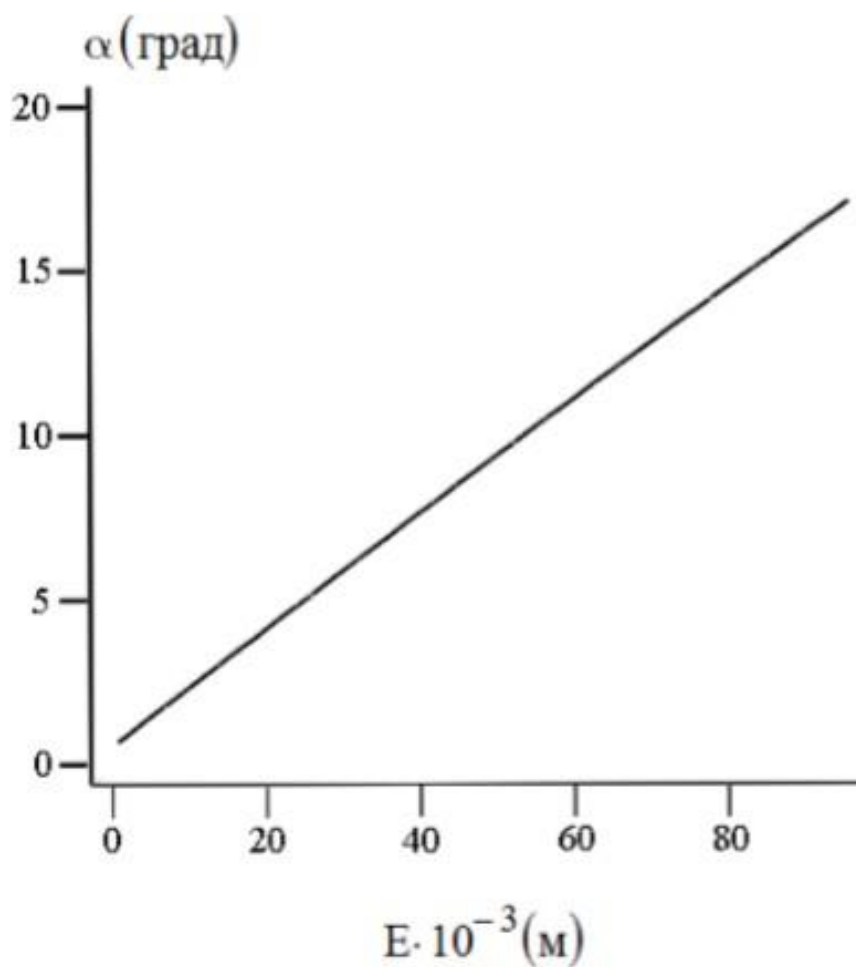


Рис. 2.20 Графік залежності кута оптимальної орієнтації від зміщення центра мас

Визначення впливу силового опору повітря на необхідну силу для транспортування вантажу проілюстровано у таблиці 2.1. Згідно із цими даними, урахування опору повітря є невід'ємною умовою для переміщення вантажів великих розмірів та при високих швидкостях.

Таблиця 2.1

Результати обчислень

	$v = 0.44 \text{ м/с}$		$v = 5 \text{ м/с}$	
	$A = 0.25 \text{ м}$ $B = 0.1 \text{ м}$ $H = 0.1 \text{ м}$	$A = 0.5 \text{ м}$ $B = 0.2 \text{ м}$ $H = 0.2 \text{ м}$	$A = 0.25 \text{ м}$ $B = 0.1 \text{ м}$ $H = 0.1 \text{ м}$	$A = 0.5 \text{ м}$ $B = 0.2 \text{ м}$ $H = 0.2 \text{ м}$
З врахування сил лобового опору	$\alpha = 16.558$ $F_{np} = 1.58 \text{ Н}$	$\alpha = 14.897$ $F_{np} = 1.269 \text{ Н}$	$\alpha = 38.617$ $F_{np} = 1.89 \text{ Н}$	$\alpha = 72.078$ $F_{np} = 2.259 \text{ Н}$
Без врахування сил лобового опору	$\alpha = 16.387$ $F_{np} = 1.573 \text{ Н}$	$\alpha = 14.324$ $F_{np} = 1.255 \text{ Н}$	$\alpha = 16.387$ $F_{np} = 1.577 \text{ Н}$	$\alpha = 14.324$ $F_{np} = 1.255 \text{ Н}$
Процент збільшення сили притягання при врахуванні сил лобового опору відносно без врахування	0.44 %	1.1 %	16.6 %	44.4 %

Висновки до розділу 2

Проведено аналіз структури, кінематики та компоновки маніпулятора. Також виконано моделювання динамічної взаємодії пристрою з програмованим засобом управління (ПЗП) під час переміщення вантажу вздовж прямолінійної траєкторії. Розроблено графік швидкостей і прискорень вантажу. Визначено відсоток збільшення сили тяжіння з урахуванням опору середовища та без такого урахування.

Розділ 3. МЕТОДИ ТА ІНСТРУМЕНТИ ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ ПРИСТРОЇВ ЗАХОПЛЕННЯ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА

3.1. Класифікація та функціональні особливості пристроїв захоплення

Пристрої захоплення (ЗП) або захватні належать до категорії компонентів, які використовуються в промислових роботах. За принципом їх дії всі пристрої захоплення зазвичай класифікують у три основні групи: механічні; вакуумні; магнітні (див. рис. 3.1) [17-37].



Рис. 3.1. Класифікація пристроїв захоплення ПР за принципом дії.

У даній класифікації додатково включено пристрої захоплення з еластичними камерами, які відносяться до категорії універсальних захоплень. Також розглядаються інші пристрої захоплення, такі як ті, що використовують безконтактну технологію, зокрема струменеві і електростатичні захоплення (детальніше про них буде розглянуто в подальших розділах). Розглянемо інші класифікації пристроїв захоплення за найважливішими ознаками.

Класифікація за способом утримання об'єкта (рис. 3.2.)



Рис. 3.2. Класифікація пристроїв захоплення ПР за способом утримання об'єкта

Пристрої захоплення (ЗП) здатні утримувати об'єкт за рахунок кінематичного впливу робочих елементів, таких як губки, пальці чи кліщі, використовуючи сили тертя або їх комбінацію з замикаючими зусиллями. Усі ці пристрої спроможні захоплювати об'єкти.

ЗУ активного типу поділяються на дві основні групи: механічні, такі як кліщі, лещата та шарнірні пальці, і ті, які використовують еластичні робочі камери, що деформуються під впливом стиснутого повітря або рідини.

У виробничому процесі для утримання предмета використовують нижню поверхню, виступаючі частини або отвори в корпусі. Серед таких пристроїв можуть бути кріпильні гачки, петлі, вилки, лопатки та захоплення, які не стискають заготовки.

ЗУ утримання забезпечують силовий вплив на об'єкт, використовуючи різні фізичні ефекти. Найпоширеніші серед них вакуумні та магнітні ЗП. Рідше зустрічаються пристрої, що використовують ефекти електростатичного тяжіння, адгезії тощо.

За способом дії ЗП поділяються на неприводні (наприклад, з використанням пружини) та приводні, обладнані приводом для активації захоплення.

Щодо поверхні об'єкта, захопленого пристроєм, вирізняють зовнішні (для захоплення валів, корпусів, пластин) та внутрішні (при захопленні втулок, кілець, шайб і т.п.).

Окрім того, класифікація ЗП може здійснюватися за видом управління, яке представлено на рисунку 3.3.

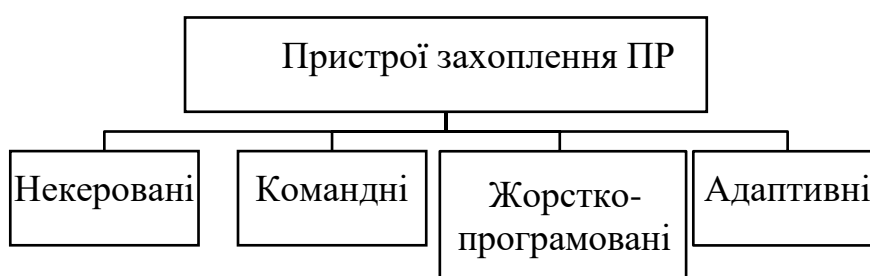


Рис. 3.3. Класифікація пристроїв захоплення ПР по виду управління

Некеровані – це пружинні механічні пристрої із постійними магнітами або вакуумними присосками без примусового розрідження. Для вилучення об'єкта із таких пристроїв потрібно зусилля, яке перевищує силу утримання об'єкта.

Командні пристрої захоплення керуються виключно командами на захоплення чи відпускання об'єкта. До цієї категорії входять пристрої із пружинним приводом, оснащені стопорними пристроями, і спрацьовують в такт. Губки пружинних пристроїв захоплення розходяться і затискаються завдяки взаємодії з об'єктом маніпулювання.

Жорсткопрограмовані пристрої захоплення керуються сигналами системи управління ПР. Розміщення робочих елементів, зусилля затиску в таких пристроях можуть змінюватися за програмою, яка може управляти такою дією технологічних адаптацій.

Адаптивні пристрої захоплення – це програмовані пристрої, які обладнані різноманітними датчиками зовнішньої інформації, такими як визначення форми поверхні, маси об'єкта, сили затиску, або виявлення ковзання об'єкта щодо робочих елементів пристрою захоплення.

За характером кріплення пристроїв захоплення до руки маніпулятора (див. рис. 3.4).



Рис. 3.4. Класифікація пристроїв захоплення ПР за характером кріплення ЗП до руки маніпулятора

Незмінні пристрої захоплення – це вузли, що не можуть бути від'єднані від конструкції руки маніпулятора і не передбачають можливості їх заміни.

Змінні пристрої захоплення – це самостійні вузли з базовими поверхнями для кріплення до руки маніпулятора, які можуть бути від'єднані та замінені.

Швидкозамінні пристрої захоплення – це змінні пристрої, у яких конструкція базових поверхонь для кріплення до маніпулятора забезпечує їх швидку зміну, наприклад, за допомогою байонетного замка.

Придатні для автоматичної зміни пристрої захоплення – це пристрої, у яких конструкція базових поверхонь дозволяє автоматичне закріплення на руці маніпулятора.

На рисунку 3.5 наведено приклади кінематичних схем одно-, дво- і трикоординатних пристроїв захоплення.

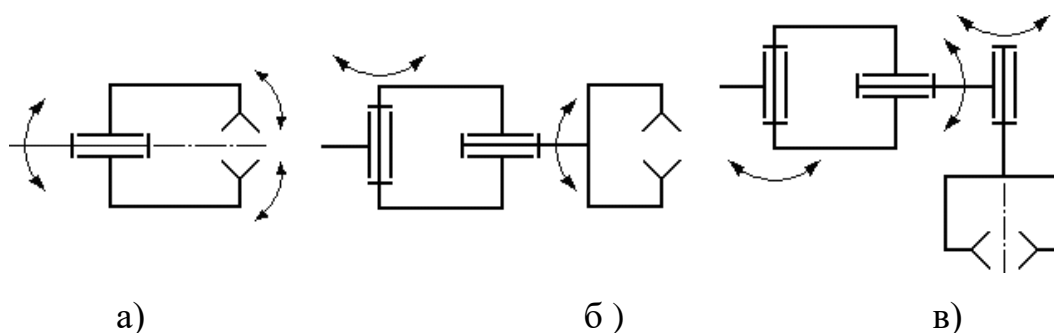


Рис. 3.5. Приклади кінематичних схем пристроїв захоплення:

а – однокоординатне ЗП; б – двокоординатне ЗП; в – трикоординатне ЗП.

Оскільки в машинобудуванні широкого поширення набули пристрої ручного управління з механічними захопленнями, наведемо класифікацію механічних пристроїв захоплення за наявністю та типом приводу і передавального механізму (див. рис. 3.6). В цій класифікації виділено дві основні групи пристроїв захоплення: приводні та не приводні. За типом механізму, який передає зусилля від приводу до затискного органу, пристрої поділені на чотири групи.

У реальних умовах найбільш поширеними для захоплення є схеми плоских механізмів з одним двигуном та одним ступенем свободи. Ці механізми призначені для захоплення об'єктів з різними перетинами і формами на основі призм та плоских об'єктів (див. рис. 3.7).



Рис. 3.6. Класифікація механічних пристроїв захоплення ПР

У випадку довгомірних об'єктів такі схеми забезпечують захоплення лише одного перетину. Схеми з прямою передачею є найпростішими, де єдиний рухливий робочий елемент жорстко пов'язаний з штоком пневмоциліндра і, отже, переміщується по його осі. Об'єкт вводиться в зону між робочими елементами вздовж вертикальної осі.

З механізмів з декількома ступенями рухливості найпоширеніші механізми з двома вихідними ланками, симетрично розташованими і симетрично рухаються відносно середньої площини. У вказаній схемі, за допомогою простого шарнірно-важільного механізму, горизонтальний прямолінійний рух штока пневмоциліндра перетворюється на обертальний рух верхнього робочого елемента. Введення об'єкта між робочими елементами відбувається з максимальною силою вздовж горизонтальної осі, використовуючи висувну руку.

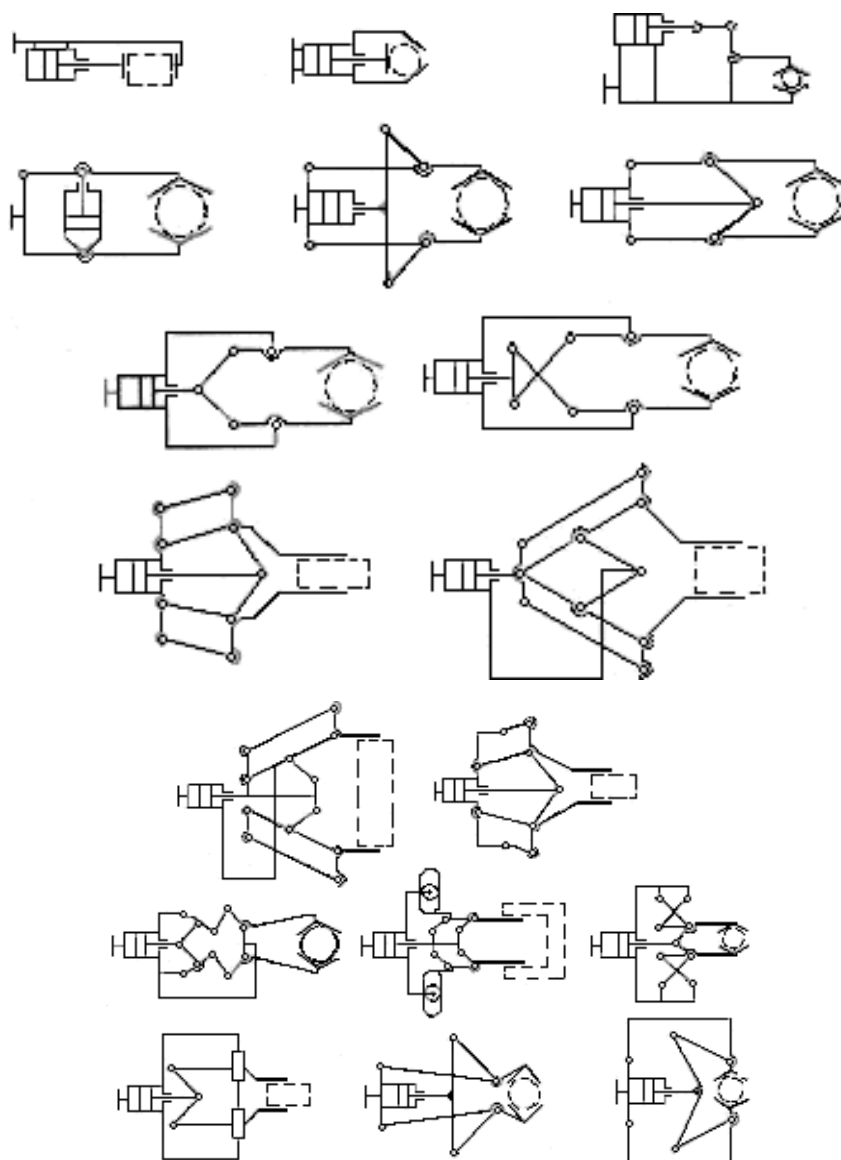


Рис. 3.7. Принципові схеми механічних пристроїв захоплення ПР

Більшість схем пристроїв захоплення мають нерухомі пневмоциліндри. Однак існують і схеми, в яких пневмоциліндр вбудований в механізм захоплення і виконаний як хиткий (див. рис. 3.7). Розташування пневмоциліндра всередині механізму дозволяє скоротити розмір повздожньої осі при заданій довжині крутного важеля.

Використання ковзаючого циліндра робить схему більш простою, але обмежує можливості внесення змін у параметри під час конструювання і зазвичай призводить до зниження надійності через використання гнучких трубопроводів.

Дуже популярні кліщові захоплення використовують схеми, де вихідні ланки обертаються симетрично відносно горизонтальної осі в протилежних напрямках. Усі ці схеми виготовлені так, щоб стиск губок захоплення відбувався при подачі тиску в порожнину пневмоциліндра без штоку. Недоліком кліщових захоплень є можливість обертання важелів. При фіксації робочих елементів на них не можна забезпечити захоплення плоских предметів різної товщини, тому кліщі частіше використовуються для захоплення циліндричних об'єктів. У групі шарнірних механізмів особливий інтерес викликає конфігурація, де один механізм налаштований до взаємодії з іншим. Таке з'єднання може забезпечити широке розкриття робочих елементів при відповідному виборі параметрів.

Всі розглянуті шарнірні механізми мають лише обертальні пари, що робить їх простими у виготовленні і важливими при доведенні та модернізації захоплень у процесі експлуатації роботів. Розширеність проміжків та недосконалість взаємних поверхонь мають значний вплив на стабільність положення об'єкта. Під час захоплення ці проміжки вирівнюються в одному напрямку, що може призвести до небажаних наслідків. Однак при правильному підборі параметрів та обмеженні рухів та кутів повороту виключається можливість ущільнення та застрягання об'єкта, забезпечуючи безперервну роботу механізму.

Паралелограмні механізми забезпечують паралельність вихідних ланок, що дозволяє робочим елементам захоплення переміщуватися прямолінійно вздовж вертикальної осі при затискуванні об'єкта. Використовуються інші шарнірні чотиризвенніки, наприклад, схема з механізмом, який дозволяє отримати більше широке розкриття захоплення (див. рис. 3.7). Проте переваги використання схем з шарнірними чотиризвенниками порівняно з найпростішими схемами можуть бути неочевидними. Переміщення осей шарнірів дозволяє не лише оптимізувати розташування, змінювати передавальні співвідношення, але й розширювати або звужувати межі діапазону захоплення при однакових довжинах плечей важелів.

3.2. Розрахунок параметрів захоплення для різних видів упаковок

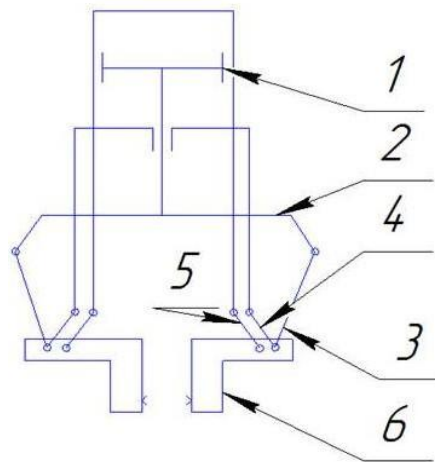


Рис.3.8. Пристрій захоплення

Опис захвату

Під час подачі повітря в верхню порожнину пневмоциліндра, поршень 1 різко опускається вниз разом із важелем 2, що жорстко закріплений із штоком пневмоциліндра. Важелі 4 і 5 ефективно передають зусилля від важеля 2 через важелі 3, обертаючись навколо нерухомих опор. Це інтенсивне обертання ефективно передається з пропорційним зусиллям на губки, які тепер стискаються з великою силою. При введенні повітря в нижню порожнину пневмоциліндра, губки захоплення розпрямляються.

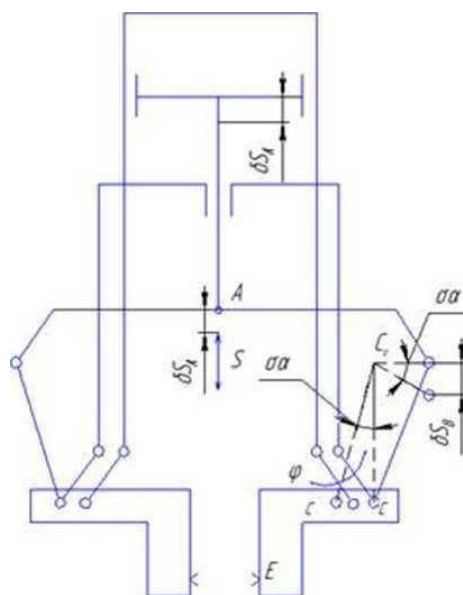


Рис.3.9. Кінематика пристрою захоплення[2]

Обчислимо силу стиску, необхідну для того, щоб забезпечити надійне утримання деталі в захваті, уникаючи її викидання або виривання.

$$N * f = k \left(\sigma + \frac{\sigma}{g} * \frac{V^2}{2 * S} \right), \text{ де } k = 1.5; f = 0.13$$

$$F_{\tau}^{\text{ш}} = \frac{G}{g} * W_{\tau} = m * W_{\tau}$$

Для забезпечення умови надійного утримання заготовки розрахуємо необхідний діаметр поршня пневмоциліндра.

$$\sum \delta A_j^e = 0$$

$$F_{\text{пц}} * \delta S + N \delta S_e = 0$$

$$\delta S = \delta S_a = \delta S_b$$

$$\delta S_b = \delta S_a * C_v * B$$

$$\delta \alpha = \frac{\delta S_b}{C_v B}$$

$$\delta S_c = C_v C * S \alpha = C_v C * \frac{\delta S_b}{C_v B} = DC * \delta \varphi$$

$$\delta S_e = \delta \varphi * D' E = \frac{C_v C * \delta S_b}{C_v B * DC} * D' E$$

$$[p] * \frac{\pi * D_{\text{п}}^2}{4} * \delta S + \frac{k}{f} \left(\sigma + \frac{\sigma}{g} * \frac{V^2}{2 * S} \right) * \frac{C_v C * \delta S}{C_v B * DC} * D' E = 0$$

$$D_{\text{п}} = \sqrt{\frac{\frac{k}{f} * \left(\sigma + \frac{\sigma}{g} * \frac{V^2}{2 * S} \right) * \frac{C_v C * \delta S}{C_v B * DC} * 4}{[p] * \pi}} =$$

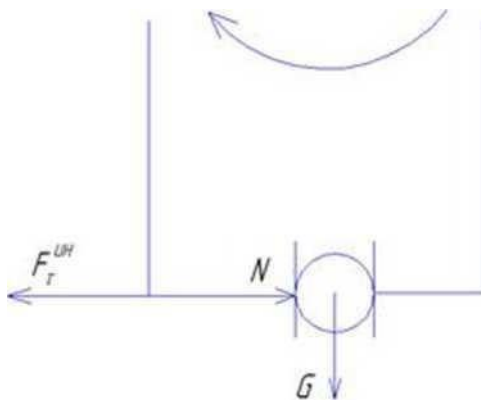
$$= \sqrt{\frac{1.5 * 4 \left(5.5 + \frac{5.5}{9.8} * \frac{0.5^2}{2 * 0.26} \right) * 0.0015 * 0.026}{0.13 * 0.5 * 10^5 * 3.14 * 0.005 * 0.02}} = 0,0793 \text{ м} = 79,3 \text{ мм}$$

Вибираємо за довідником $D_{\text{п}} = 80 \text{ мм}$

Нехай рука робота з захватом здійснює обертання навколо осі стійки.

Розглянемо два випадки:

1. Вплив відцентрової сили інерції на губку охоплення.



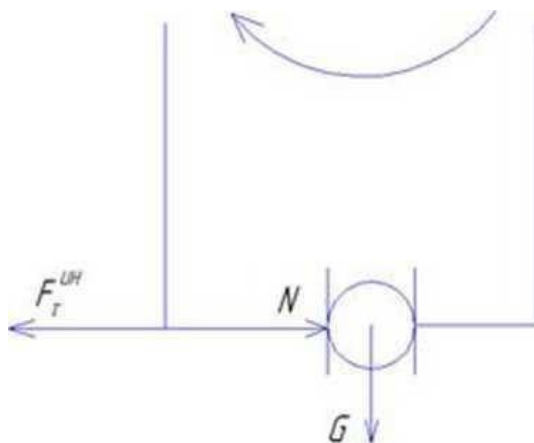
$$N > F_n^{iH}$$

$$F_n^{iH} = \omega^2 * R * \frac{G}{g}$$

R – відстань від центру мас заготовки до осі обертання стійки.

$$F_n^{iH} = 0,87^2 * 1 * \frac{5,5}{9,8} = 4,3 \rightarrow N = F_n^{iH}$$

2. В момент гальмування



$$N > F_{\tau}^{iH}$$

$$F_{\tau}^{iH} = \frac{G}{g} * \varepsilon * r$$

$$\text{Где } \varepsilon = \frac{\omega^2}{2\varphi} = \frac{50^2}{2 * 15} = 83,3 \text{ рад/с}^2$$

$$F_{\tau}^{iH} = \frac{5,5}{9,8} * 83,3 * 1 = 46,75 \text{ Н}$$

$$N > F_{\tau}^{iH}$$

Розрахунок параметрів елементів охоплення.

За довідником знаходимо шток пневмоциліндра і співвідношення розмірів поршня.

Діаметр штоку дорівнює $d = 25\text{мм}$.

Тепер виявляємо відгуки в точках з'єднання компонентів.

Перевіряємо закріплення поршня і штока на витягання. , :

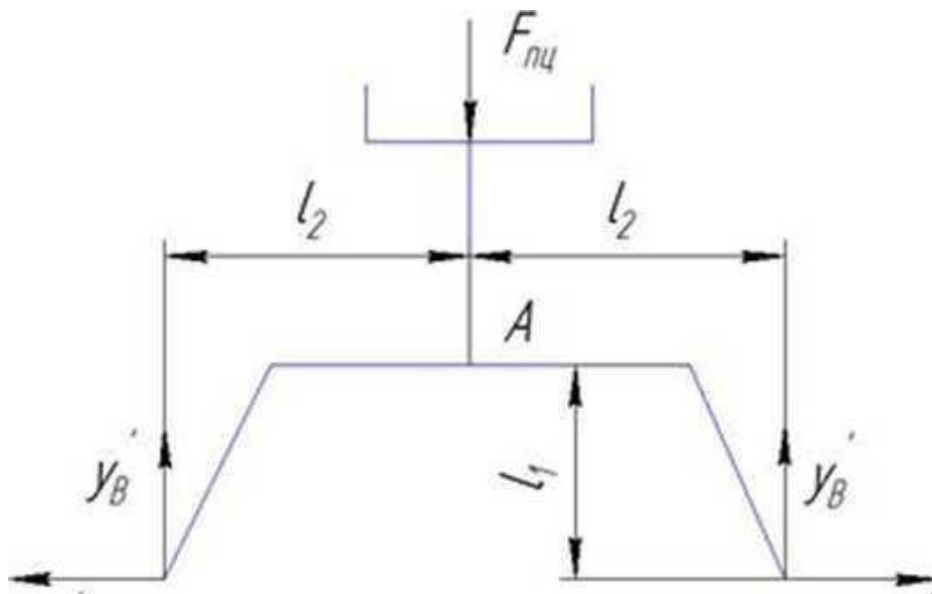
$$\frac{\pi d^2}{4} [\sigma_p] = P$$

де P – сила, що діє вздовж осі штока.

$$d = \sqrt{\frac{4P}{\pi[\sigma_p]}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5000}{3.14 \cdot 1250}} = 2.2 \text{ см} = 22\text{мм}$$

Знайденого за довідником перетину штока досить.

Знайдемо реакції в опорах охоплення



$$\sum_{j=1}^n x_j = x_B - x'_B = 0 \rightarrow x_B = x'_B$$

$$\sum_{j=1}^n y_j = y_B + y'_B - F_{\text{пц}} = 0$$

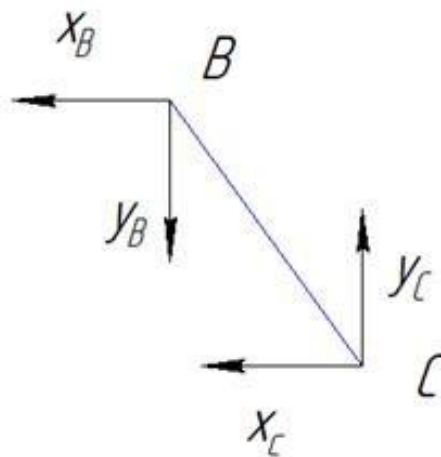
$$\sum_{j=1}^n M_{(A)j} = y'_B * l_2 - y_B * l_2 + x'_B * l_1 - x_B * l_1 = 0$$

$$y_B = y'_B = \frac{F_{\text{пц}}}{2} * \frac{[P]\pi D_{\text{п}}^2}{2} = \frac{0,5 * 10^5 * 3,14 * 0,08^2}{8} = 125\text{H}$$

$$x_B = x'_B = 45\text{H}$$

$$R_B = \sqrt{x_B^2 + y_B^2} = \sqrt{125^2 + 45^2} = 133\text{H}$$

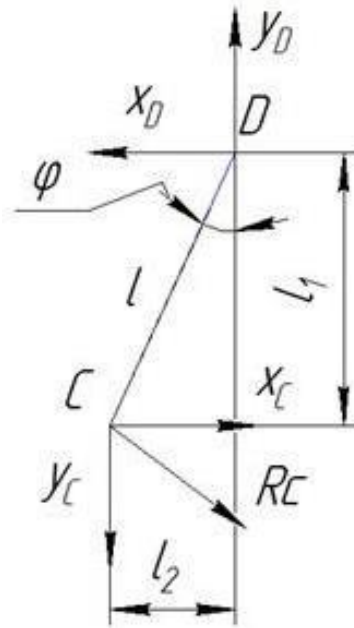
Розрахункова схема рівноваги наступного об'єкту



$$\sum_{j=1}^n x_j = x_B + x_C = 0 \rightarrow x_B = -x_C = -45\text{H}$$

$$\sum_{j=1}^n y_j = y_B - y_C = 0 \rightarrow y_B = y_C = 125\text{H}$$

Розрахункова схема рівноваги другого об'єкту:



$$\sum_{j=1}^n x_j = x_D - x_C = 0 \rightarrow x_D = x_C = 45H$$

$$\sum_{j=1}^n y_j = y_C - y_D = 0 \rightarrow x_D = x_C = 125H$$

$$\sum_{j=1}^n M_{(D)j} = x_C * l_1 + y_C * l_2 = 0$$

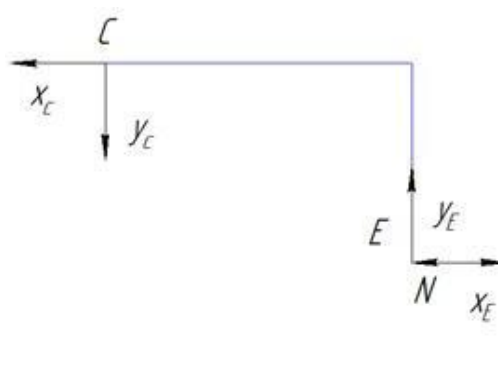
$$x_C = -\frac{y_C * l_2}{l_1} = -\frac{125 * 68}{18.8} = -45H$$

$$l_2 = l * \sin\varphi = 20 * \sin 20 = 6.8\text{mm}$$

$$l_1 = l * \cos 20 = 20 * \cos 20 = 18.8\text{mm}$$

$$R_C = \sqrt{45^2 + 125^2} = 133H$$

Розрахункова схема рівноваги останнього об'єкту:



$$\sum_{j=1}^n x_j = x_C + N + x_E = 0$$

$$\sum_{j=1}^n y_j = y_C - y_E = 0 \rightarrow y_C = y_E = 125H$$

$$x_E = N + x_C = 45 + 67 = 112H$$

$$Re = \sqrt{112^2 + 125^2} = 167H$$

Тепер необхідно знайти діаметр осей, за допомогою яких кріпляться між собою важелі, з умови міцності на зріз та зім'яття.

$$\frac{\pi d^2}{4} [\tau_{cp}] \geq P$$

де P – сила, яка діє перпендикулярно осі.

$$d = \sqrt{\frac{4P}{\pi[\tau_p]}} = \sqrt{\frac{4 * 1334}{3.14 * 212^5}} = 3,5\text{мм}$$

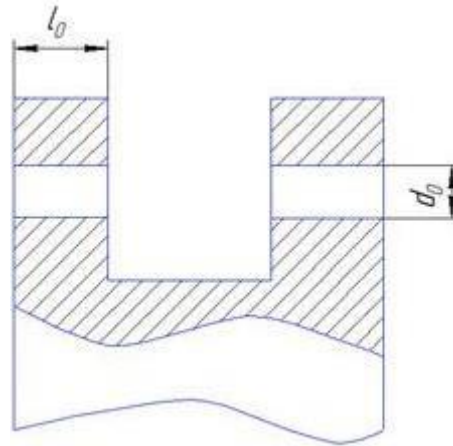
Умова міцності на зім'яття.

$$\sigma_{cm} = \frac{F_{cm}}{S_{cm}} = \frac{F_{cm}}{2 * l_0 * d_0} \leq [\sigma_{cm}]$$

$$\sigma_{cm} = \frac{133}{2 * 3 * 10^{-3} * 3.5 * 10^{-3}} = 6.3 * 10^6 \text{Н/м}^2 \leq [52 * 10^6] \text{Н/м}^2$$

За результатами перевірки на зріз і зім'яття обираємо осі $\varnothing 3,5$ мм.

Перевіримо на напругу розтягнення перетин важелів.



$$\sigma_{\text{раст}} = \frac{F_{\text{раст}}}{S_{\text{раст}}} \leq [\sigma_{\text{раст}}]$$

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{133}{28 * 15 * 10^5} = 11 * 10^6 \text{ Н/м}^2 \leq [125 * 10^6] \text{ Н/м}^2$$

Тепер необхідно знайти похибку сили притиснення, в залежності від зміни тиску і точності виготовлення захвату в полості пневмоциліндра від: $(0,3 \dots 0,5 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2})$

$$N = f(P, d, l, v)$$

Скористаємося методом лінійних помилок

$$\Delta N = \frac{\partial f}{\partial p} \Delta P + \frac{\partial f}{\partial D} \Delta D + \frac{\partial f}{\partial l_1} \Delta l_1 + \frac{\partial f}{\partial l_2} \Delta l_2$$

Δp — допустима зміна тиску в пневмоциліндрі

$$\Delta N = \frac{\pi [P] D_{\text{п}}^2 * C_v B * DC}{4 * C_v C * D' E}$$

$$\frac{\partial N}{\partial P} = \frac{\pi D_{\text{п}}^2 * C_v B * DC}{4 * C_v C * D' E} = \frac{3.14 * 0.08^2 * 0.005 * 0.02}{4 * 0.015 * 0.026} = 0.00129$$

$$\frac{\partial N}{\partial D} = \frac{2\pi D_{\text{п}}^2 * C_v B * DC [P]}{4 * C_v C * D' E} = \frac{3.14 * 0.5 * 0.08^2 * 0.005 * 0.02 * 0.5 * 10^5}{4 * 0.015 * 0.026} = 1610$$

$$\frac{\partial N}{\partial l_1} = \frac{\pi [P] D_{II}^2 * C_V B}{4 * C_V C * D' E} = \frac{3.14 * 0.5 * 10^5 * 0.08^2 * 0.005}{4 * 0.015 * 0.026} = 3220$$

$$\frac{\partial N}{\partial l_2} = - \frac{\pi [P] D_{II}^2 * C_V B * DC}{4 * C_V C * D' E} = - \frac{3.14 * [0.5 * 10^5] * 0.08^2 * 0.005 * 0.02}{4 * 0.015 * 0.026^2} = 2477.3$$

$$\Delta N = 0,00129 + 0,2 * 10^5 + 1610 * 0,07 * 10^{-3} + 3220 * 0,052 * 10^{-3} +$$

$$+ 2477,3 * 0,062 * 10^{-3} = 19,9H$$

$$N' = \frac{(\sigma + \frac{\sigma}{g} * \frac{V^2}{2S})}{f} = \frac{1}{0.13} * \left(5.5 + \frac{5.5}{9.8} * \frac{0.5^2}{2 * 0.26} \right) = 44.6H$$

$$N - \Delta N > N' \rightarrow 67 - 19.9 = 47.1 > 44.6$$

Розробка схеми керування пневмопристроєм захоплення серії CGPT

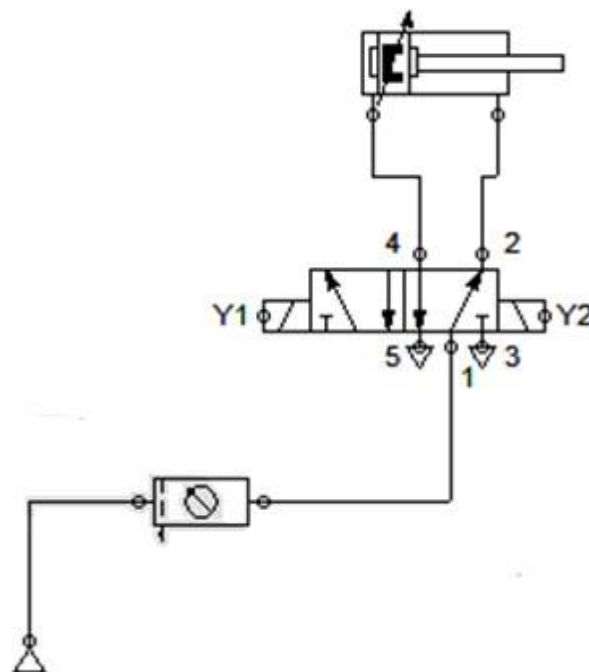


Рис.3.17. Принципова пневматична схема

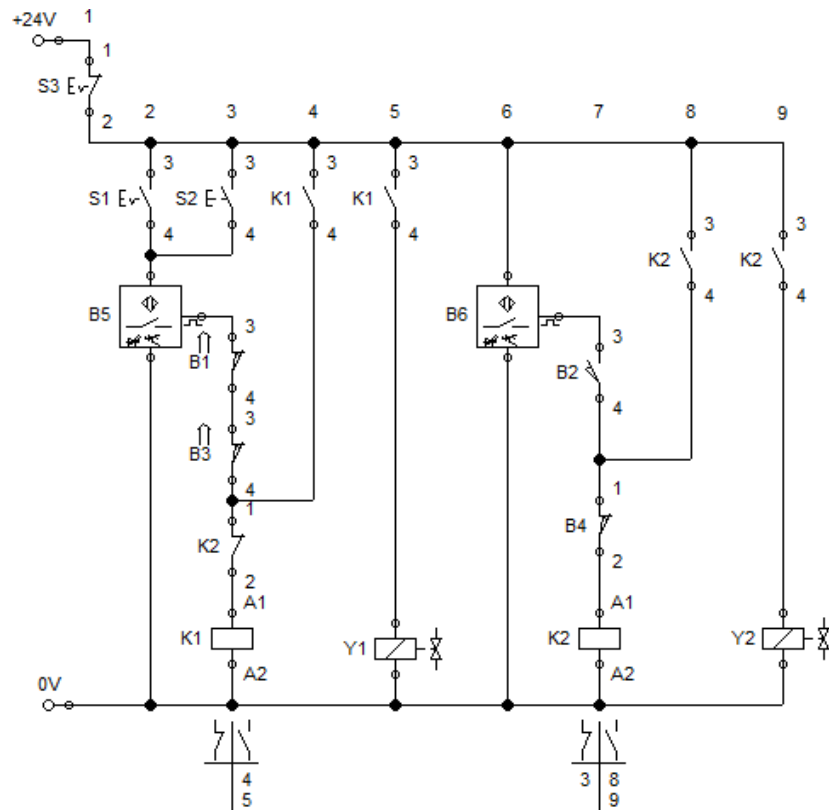


Рис.3.18. Електрична схема, автоматичний та напівавтоматичний режим,
 пряме управління

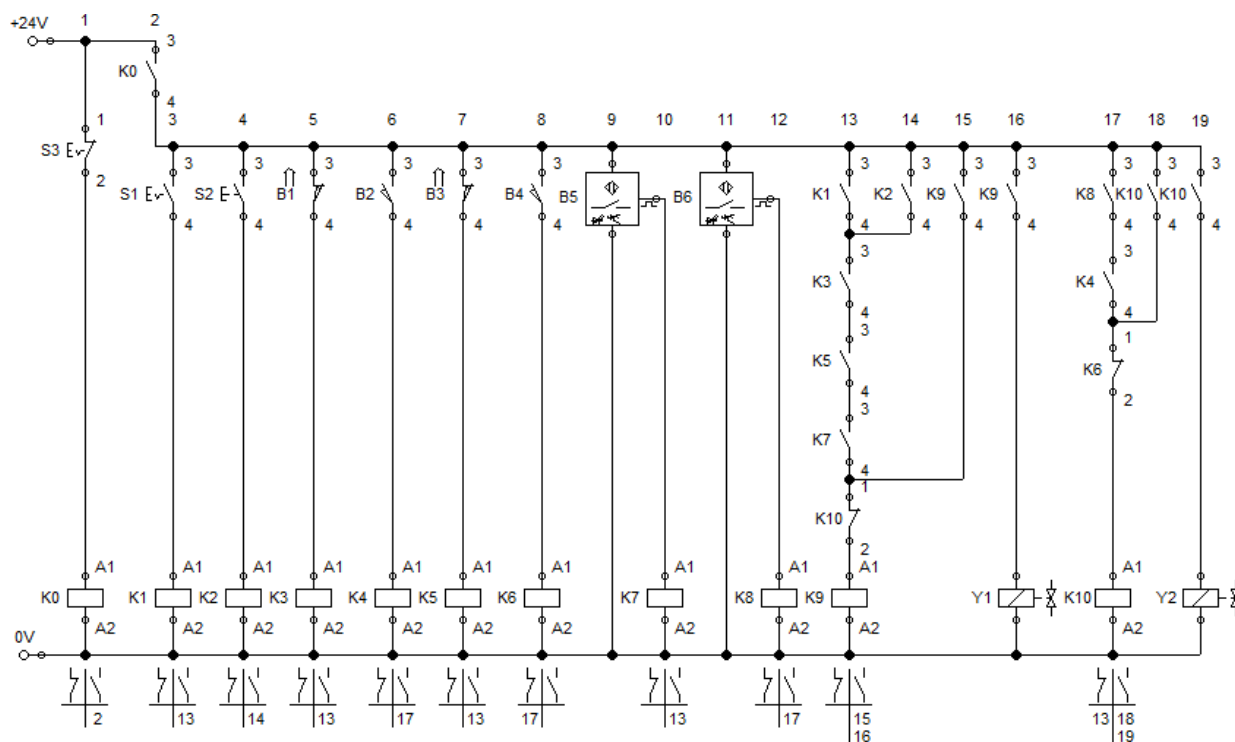


Рис.3.19. Електрична схема, автоматичний та напіваавтоматичний режим, непряме управління

При проведенні інженерного розрахунку для вибору елементів пневмоприводу важливо врахувати кілька ключових аспектів:

1. Аналіз технологічної задачі та побудова розрахункової схеми:

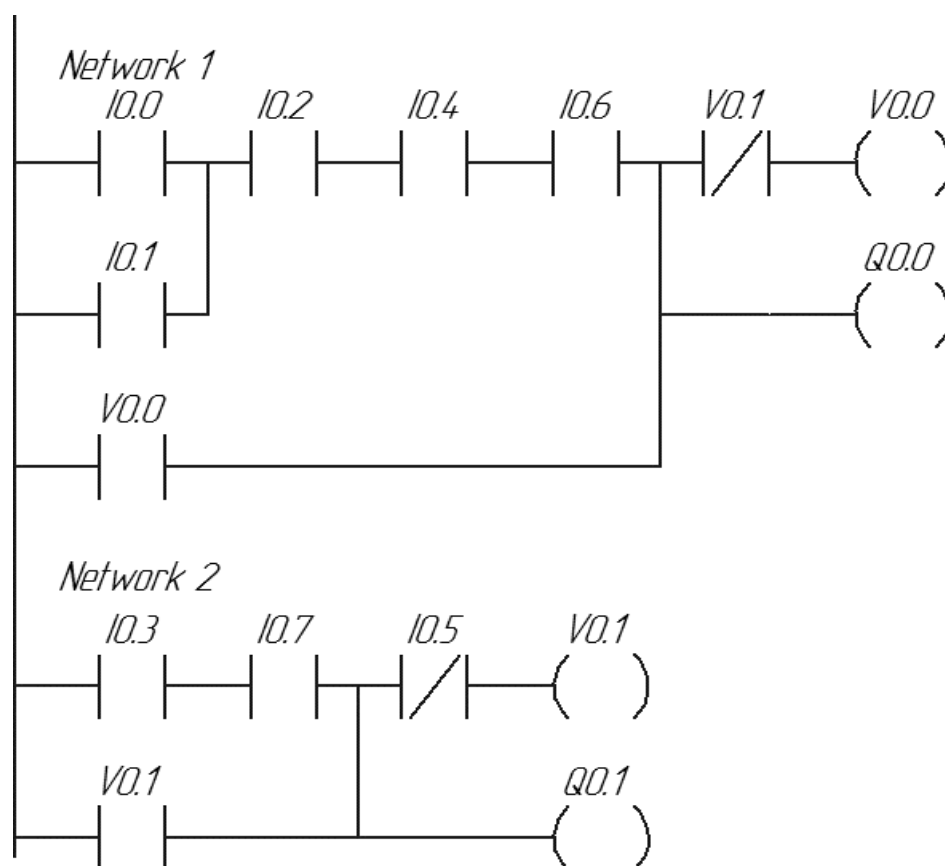
- ретельний аналіз технологічного завдання і побудова циклограми роботи приводу;
- визначення принципової схеми приводу та встановлення вихідних даних.

2. Вибір пневмоциліндра (ПЦ):

- з урахуванням статичних та динамічних навантажень обираємо відповідний пц;
- розглядаємо можливості та вибираємо засоби гальмування, які відповідають технічним вимогам.

Розробка програми ПЛК модуля S7-200 у ПП SIEMENS SIMATIC MANAGER STEP 7

Підключені до контролера зовнішні пристрої			
Входи		Виходи	
I0.0	Кнопка пуск/стоп (з фіксацією)	Q0.0	Котушка ПЦ1 (Y1)
I0.1	Кнопка пуск/стоп (без фіксації)	Q0.1	Котушка ПЦ1 (Y2)
I0.2	ПЦ1 в початковому положенні		
I0.3	ПЦ1 в робочому положенні		
I0.4	ПЦ1 в початковому положенні		
I0.5	ПЦ1 в робочому положенні		
I0.6	Датчик картонної коробки		
I0.7	Датчик штучних виробів		



Розробка програми ПЛК модуля у ПП FluidSim

Підключені до контролера зовнішні пристрої			
Входи		Виходи	
I1	Кнопка пуск/стоп (з фіксацією)	Q1	Котушка ПЦ1 (Y1)
I2	Кнопка пуск/стоп (без фіксації)	Q2	Котушка ПЦ1 (Y2)
I3	ПЦ1 в початковому положенні		
I4	ПЦ1 в робочому положенні		
I5	ПЦ1 в початковому положенні		
I6	ПЦ1 в робочому положенні		
I7	Датчик картонної коробки (імітується кнопкою)		
I8	Датчик штучних виробів (імітується кнопкою)		

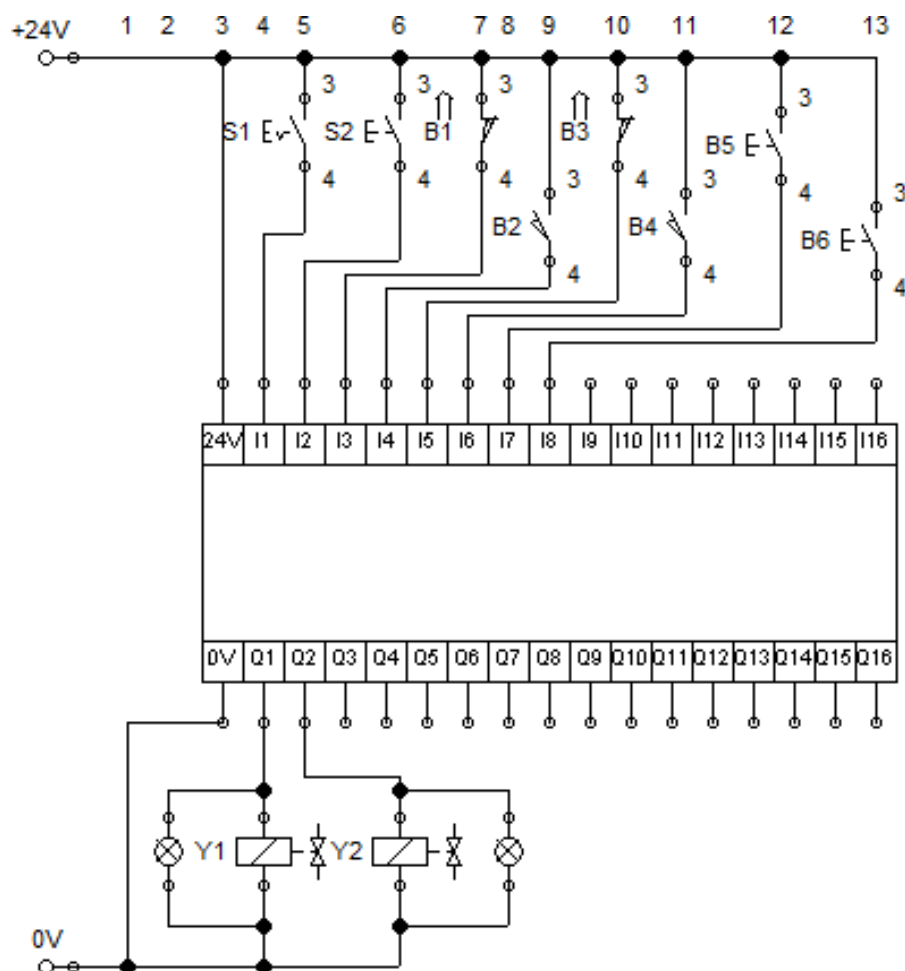


Рис.3.21. Зовнішні підключення до ПЛК модуля

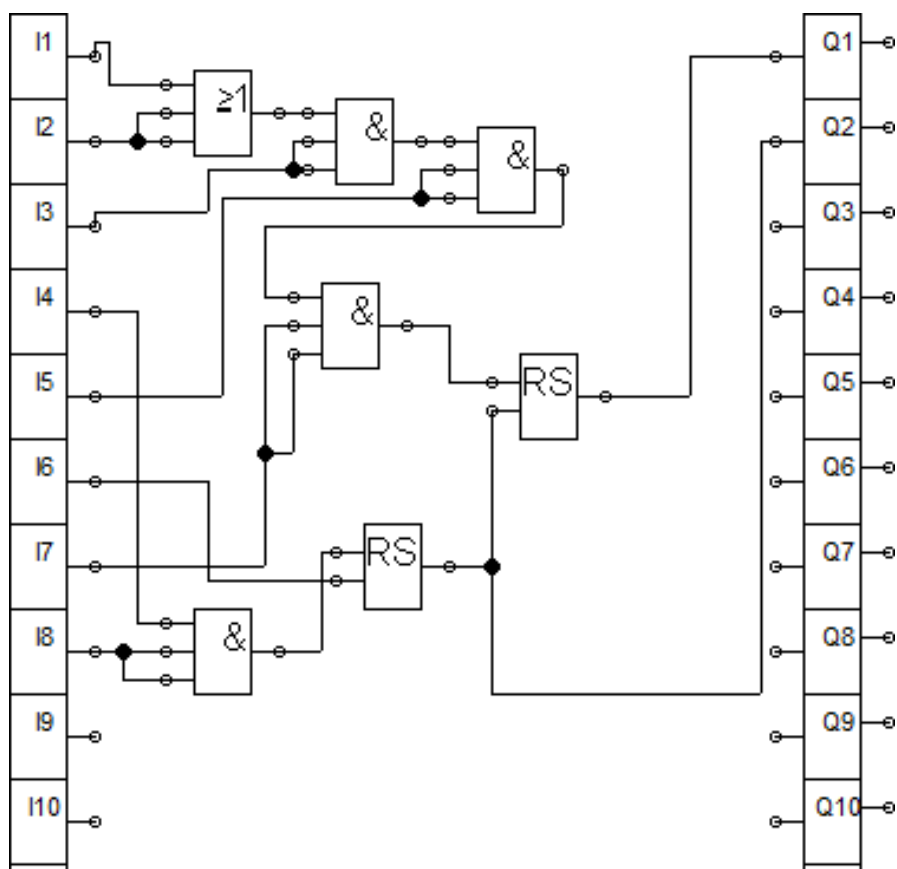


Рис.3.22. Програма ПЛК модуля

Висновки до розділу 3

В розділі 3 було успішно розроблено та апробовано пневматичний захват з накладними елементами, включаючи роздрукування та тестування 3D елементів за допомогою 3D принтера з використанням матеріалів ABS PLA. Також були розроблені 2D моделі накладних елементів у трьох проекціях для більш детального аналізу та використання.

Для забезпечення ефективності та надійності захвату були проведені розрахунки, включаючи силу затиску та діаметр поршня пневмоциліндра. Ці параметри були розраховані таким чином, щоб забезпечити надійне утримання заготовки під час роботи пристрою.

Отримана 3D модель вважається адекватною та придатною для подібних розрахунків і досліджень. Крім того, була розроблена схема керування пневмопристроєм захоплення, використовуючи програмований логічний контролер в системі «FluidSIM», що дозволяє точне та програмоване управління захватом для вирішення різних завдань.

Результати даного розділу підтверджують готовність та ефективність розробленого пневматичного захвату для використання в практичних застосуваннях та робочих умовах.

Розділ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ ПАКУВАЛЬНОЇ ЛІНІЇ

4.1. Аналіз існуючих конструкцій пневматичних пристроїв захоплення



Рис.4.1. Електронні реле вакууму / тиску серія SWCN

Опис:

Малі розміри та легка вага роблять це електронне реле вакууму/тиску ідеальним вибором для широкого спектру застосувань. За допомогою цифрового індикатора, оснащеного високоточною електронною схемою та двома незалежними дискретними виходами, ви можете легко налаштувати тиск спрацьовування і гістерезис з клавіатури.

З двома програмованими виходами PNP для установки верхнього і нижнього граничних значень, це реле ідеально підходить для систем безпеки, оптимізації часу циклу або в енергозберігаючих пристроях. Може бути встановлене безпосередньо на захопленнях маніпуляторів, де важливий постійний контроль за встановленим значенням вакууму.

Це електронне реле постачається з кабелем довжиною 2 метри або роз'ємом M8. Воно має маленькі розміри і вагу, а також високоточний цифровий індикатор, що робить його оптимальним для вимог багатьох застосувань.

Основні характеристики включають в себе можливість налаштування тиску спрацьовування і гістерезису, два програмовані виходи PNP, а також функцію датчика тиску вакууму з аналоговим виходом. Загальна надійність та оптимальні параметри роблять це електронне реле відмінним вибором для різних сценаріїв використання.

Таблиця 4.1. Технічні характеристики SWCN

Модель	SWCN-V01-...	SWCN-P10-...
Діапазон вимірювання тиску	-1 ÷ 1 бар	0 ÷ 10 бар
Максимальний тиск	3 бар	15 бар
Робоче середовище	повітря, некородуючі газу, негорючі газу	повітря, некородуючі газу, негорючі газу
Напруга живлення	12-24 V DC ± 10%, пульсація (P-P) 10% або менше	12-24 V DC ± 10%, пульсація (P-P) 10% або менше
Споживаний струм	≤ 55 мА	≤ 55 мА
PNP-вихід датчика	2 виходи з відкритим колектором максимальний струм навантаження 80 мА максимальна напруга живлення 24 V DC залишкову напругу ≤ 1 V (при струмі навантаження 80 мА)	2 виходи з відкритим колектором максимальний струм навантаження 80 мА максимальна напруга живлення 24 V DC залишкову напругу ≤ 1 V (при струмі навантаження 80 мА)
Точність індикатора	≤ ± 2% від повного діапазону ± 1 знак (Температура навколишнього середовища: 25 ± 3 ° C)	≤ ± 2% від повного діапазону ± 1 знак (Температура навколишнього середовища: 25 ± 3 ° C)



Рис.4.2. Цифровий динамометр стиснення ДН-1.С (5 кН)

Опис:

Система контролю та реєстрації навантажень силового обладнання надає широкий спектр можливостей для вимірювання статичних та динамічних сил стиснення у різних застосуваннях. Метрологічне забезпечення охоплює перевірку та калібрування, які проводяться метрологічними службами та калібрувальними лабораторіями підприємств, а також центрами стандартизації та метрології. Основні переваги цієї системи включають:

1. Високоточний вимірювальний тракт: Забезпечує точні та достовірні вимірювання сил.
2. Реєстрація динамічних процесів: Здатність реєструвати динамічні навантаження з високою частотою оцифровки до 46 кГц.
3. Програмна настройка діапазону вимірювань: Дозволяє користувачеві налаштувати систему під будь-який тип датчика сили.
4. Підтримка різних діапазонів вимірювання: Забезпечує гнучкість в залежності від конкретних вимог вимірювань.
5. Сервісна комп'ютерна програма: Дозволяє зручне управління та аналіз результатів вимірювань.

6. Можливість моніторингу динамічних і статичних навантажень: Система підходить для використання в різних умовах навантаження.

7. USB інтерфейс, вбудований зарядний пристрій, акумуляторне харчування: Забезпечує зручність використання та підтримку електроживлення.

8. Силовідтворювальні датчики від світових виробників: Можливість замовлення датчиків відповідно до специфікацій користувача.

Основні функції системи включають реєстрацію статичних і динамічних процесів, вимірювання сили стиснення, визначення екстремальних навантажень, а також зручне управління та налаштування через систему меню. Це ідеальне рішення для вимірювань силових параметрів в різноманітних областях застосування.

Таблиця 4.2. Технічні характеристики динамометра стиснення ДН-1С

Межі вимірювань, кН	Значення
верхні межі шкали	1,0 ... 2000 *
нижні межі шкали	0,1 ... 200 *
Межі похибки вимірювання сили, %	± 0,3
Кількість каналів вимірювання	1 ... 16
Ресурс пам'яті	до 8 Г
Споживання, Вт	0,05
Габаритні розміри електронного блоку, мм	150×76×27
Маса електронного блоку, кг	0,15
Максимальна частота реєстрації, Гц	10

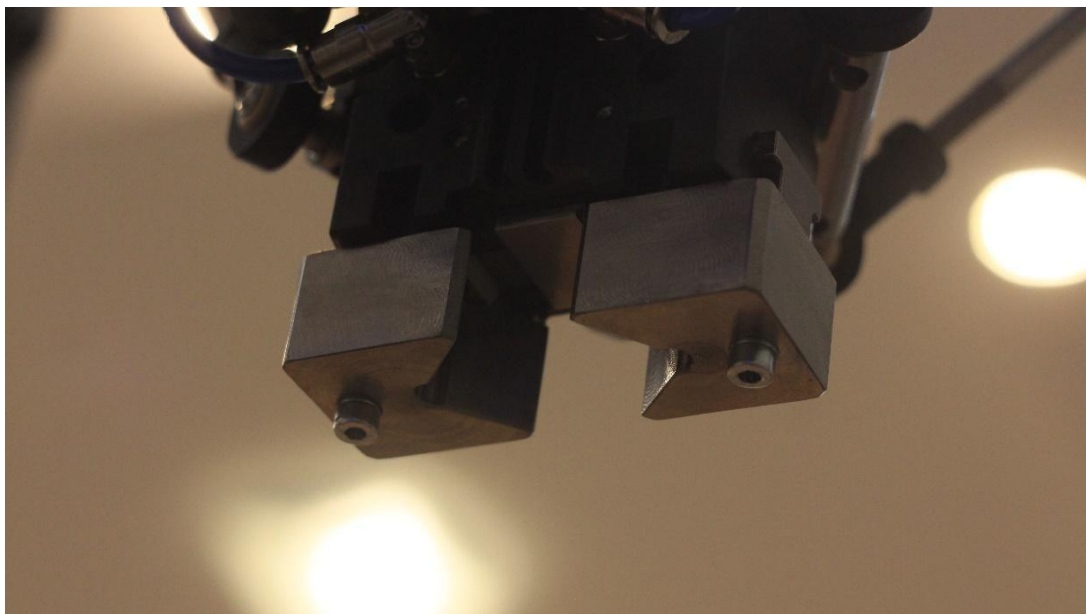


Рис.4.3. Губки типу клин на установці пристрою захоплення

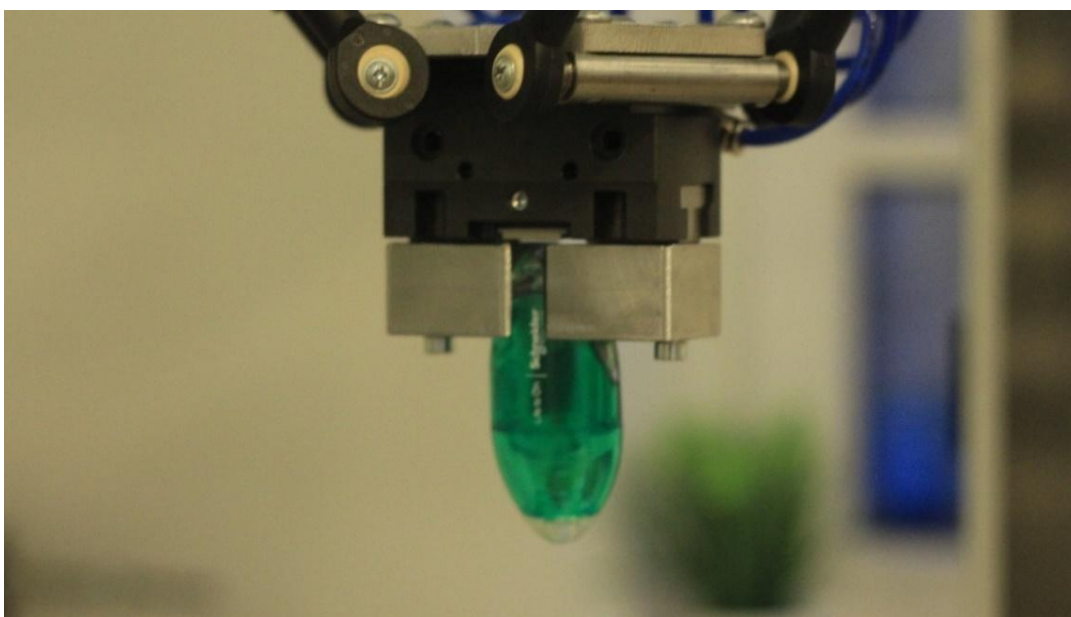


Рис.4.4. Захоплення овального об'єкта

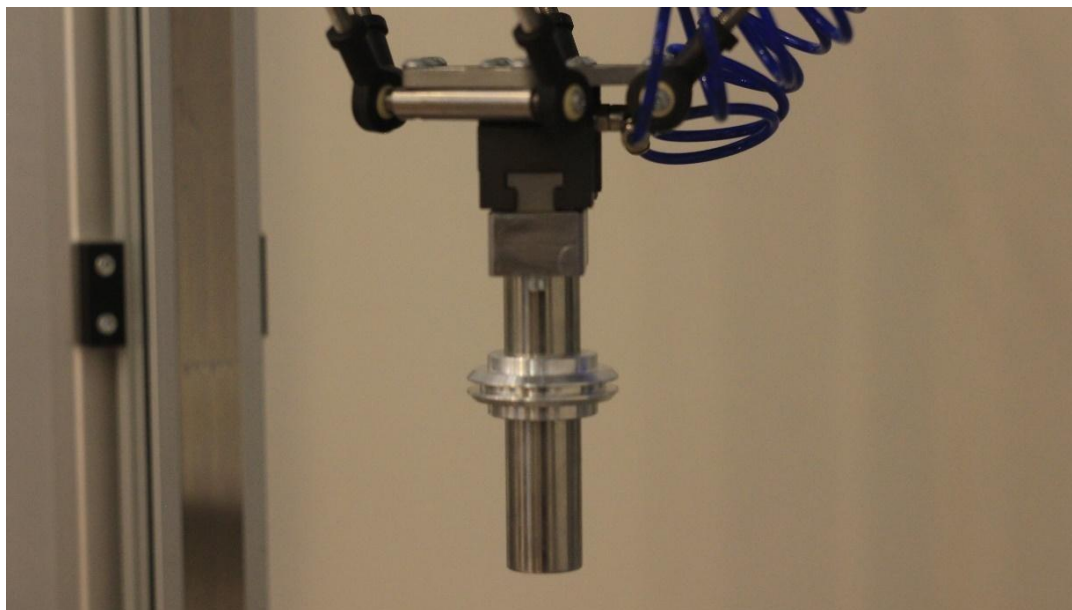


Рис.4.5. Захоплення циліндричного об'єкта

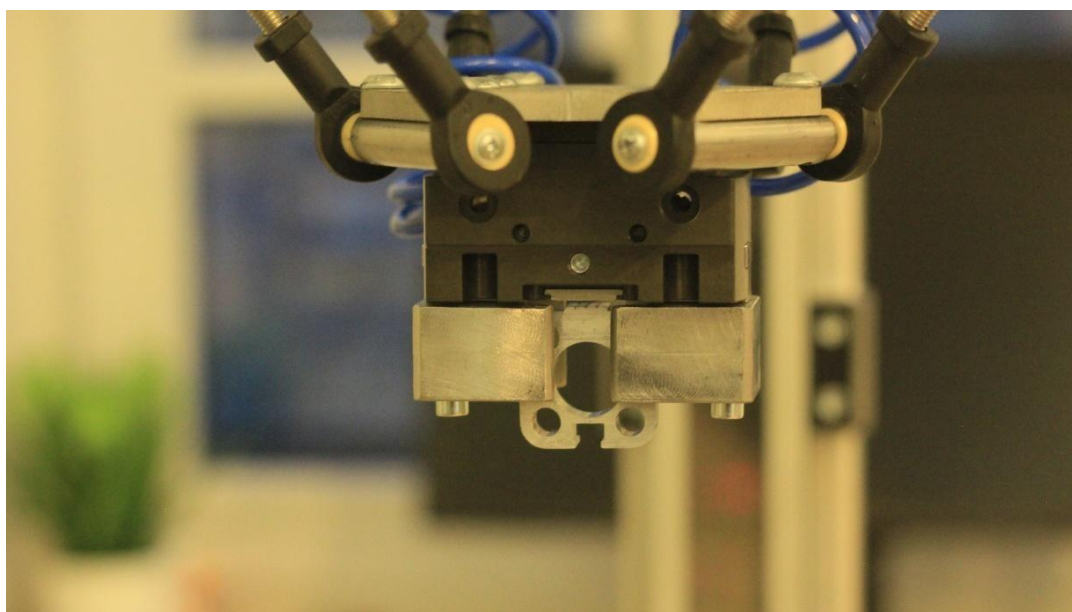


Рис.4.6. Захоплення квадратного об'єкта

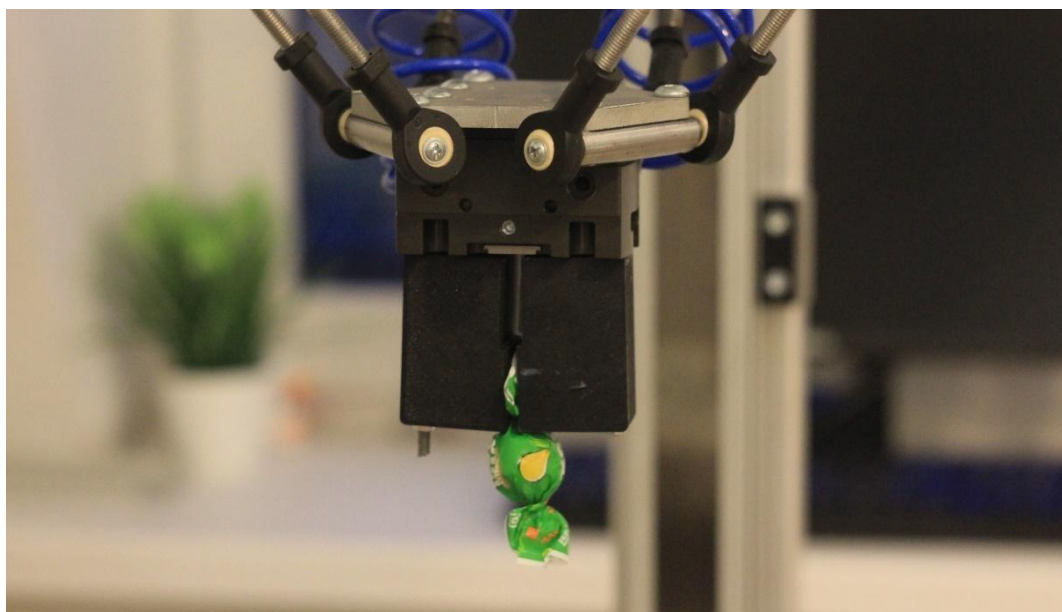


Рис.4.7. Захоплення цукерки

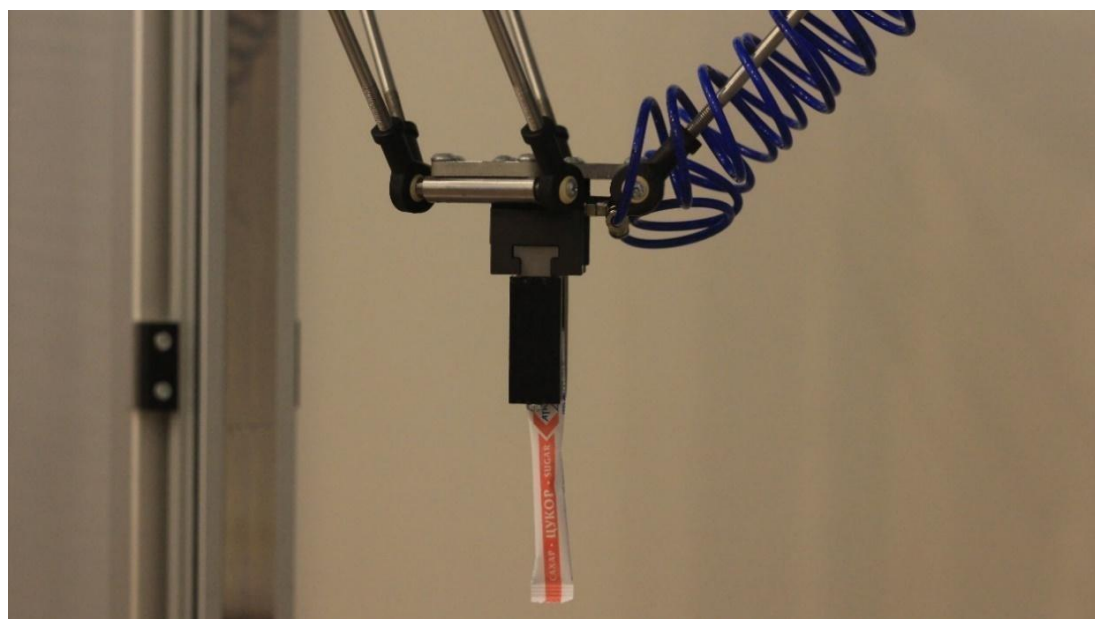


Рис.4.8. Захоплення упаковки вертикально

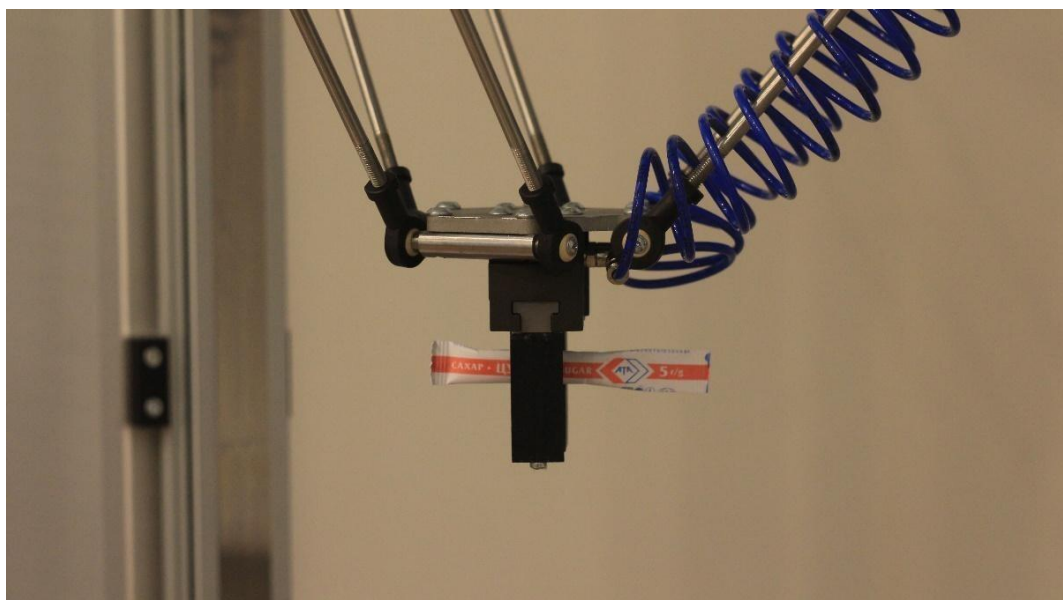


Рис.4.9. Захоплення упаковки горизонтально

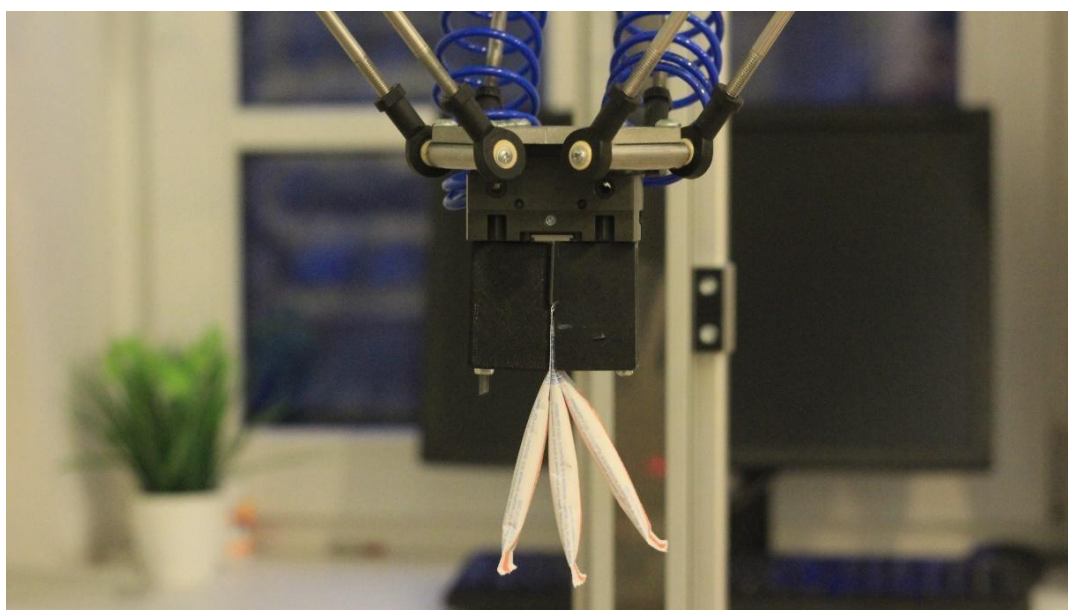


Рис.4.10. Обробка групових упаковок

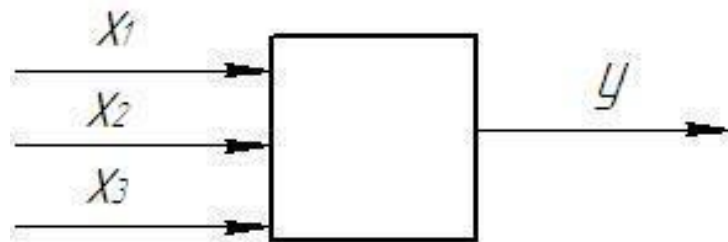
4.2. Розробка математичної моделі для оцінки ефективності роботи маніпулятора

Основні вхідні параметри впливу на досліджуваний процес:

x_1 – вага одиниці вантажу, г ;

x_2 – час, с;

x_3 – характерний розмір, м.



Вид поліноміальної функції:

$$y = f(x_1, x_2, x_3) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1x_2x_3; \quad (4.1)$$

1. Визначення кількості активних ПФ експериментів:

$$N = 2^n = 2^3 = 8,$$

де 2 – два рівні варіювання, n – кількість незалежних вхідних факторів.

2. Нормалізуємо вихідне рівняння регресії, тобто перетворюємо незалежні змінні x_i у безрозмірні змінні z_i , а b_i на статичні оцінки β_i :

$$z_i = \frac{x_i - x_{i(0)}}{\Delta x_i}$$

$$y = \beta_0 + \beta_1z_1 + \beta_2z_2 + \beta_3z_3 + \beta_4z_1z_2 + \beta_5z_1z_3 + \beta_6z_2z_3 + \beta_7z_1z_2z_3 \quad (4.2)$$

3. Складаємо матрицю плану та план проведення дослідів:

Таблиця 4.3. Фактори і інтервали їх варіювання

	Нижній рівень (-1)	Основний рівень (0)	Верхній рівень (+1)	Інтервал варіювання	Найменування фактору
x_1 :	40,1	42,3	44,5	2,2	вага
x_2 :	1	1,2	1,4	0,2	час
x_3 :	0,01	0,02	0,03	0,1	розмір

Таблиця 4.4. План експерименту і вихідні параметри дослідження

Номер досліджу(у)	Матриця планування			Натуральне значення змінних			Вихідні параметри (Вихід 1)		
	x_1	x_2	x_3	вага	час	розмір	$y(u, 1)$		
1	-1	-1	-1	40,1	1	0,01	50		
2	+1	-1	-1	44,3	1	0,012	52		
3	-1	+1	-1	40,3	1,4	0,011	48		
4	-1	-1	+1	40,5	1	0,027	51		
5	-1	0,19	0,19	40,2	1,238	0,028	49		
6	0,19	-1	0,19	41,2	1	0,034	50		
7	0,19	0,19	-1	41,8	1,238	0,013	51		
8	-0,29	+1	+1	41,5	1,4	0,018	52		
9	+1	-0,29	+1	43,9	1,142	0,022	48		
10	+1	+1	-0,29	44,3	1,4	0,025	47		

Таблиця 4.5. Коефіцієнти рівняння математичної моделі

b_0	b_1	b_2	b_3	b_{11}	b_{12}	b_{12}	b_{22}	b_{23}	b_{33}
49,629	-0,648	-0,645	-0,057	-1,568	-0,37	-1,278	-0,043	0,725	1,505

Рівняння математичної моделі:

$$y = (49,629) + (-0,648) \times x_1 + (-0,645) \times x_2 + (-0,057) \times x_3 + (-1,568) \times x_1^2 + (-0,043) \times x_2^2 + (1,505) \times x_3^2 + (-0,37) \times x_1 \times x_2 + (-1,278) \times x_1 \times x_3 + (0,725) \times x_2 \times x_3 \quad (4.3)$$

Висновки до розділу 4

Виконаний аналіз існуючих конструкцій, які використовувалися в проведенні експерименту, дозволив здійснити вивчення різних підходів і пневматичних рішень, що застосовувались на різних етапах захоплення упаковки. Зроблені фотографії пневматичного захвату під час захоплення упаковки важливі для визначення динаміки та конструктивних особливостей захвату.

Розроблена математично-статистична модель, отримана на основі експериментальних досліджень, дозволяє кількісно оцінювати та передбачати параметри захоплення упаковки. Ця модель враховує різноманітні фактори, які впливають на ефективність захоплення.

Розділ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ У ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА

Охорона праці в контексті оптимізації роботи мехатронної системи робота-маніпулятора пакувальної лінії

Основним напрямком державної стратегії у сфері охорони праці є створення безпечних і комфортних робочих умов шляхом впровадження сучасних технологій і технічних інновацій. Використання мехатронних систем, зокрема роботів-маніпуляторів, у пакувальних лініях сприяє елімінації виснажливої фізичної праці, зменшенню виробничого травматизму та підвищенню продуктивності праці. Це є важливим кроком у поліпшенні умов роботи працівників і забезпеченні їхньої безпеки.

Інструктажі з охорони праці при роботі з мехатронними системами.

Відповідно до статті 18 Закону України "Про охорону праці", всі працівники, які залучені до роботи з мехатронними системами, зобов'язані проходити інструктажі та навчання з питань безпеки праці за рахунок роботодавця. Інструктажі проводяться у таких формах:

- Вступний інструктаж: проводиться при прийомі на роботу;
- Початковий інструктаж: перед початком роботи на конкретному обладнанні;
- Періодичний інструктаж: проводиться з певною регулярністю для підтримання знань;
- Неплановий інструктаж: проводиться у разі змін у технологічних процесах або після аварій;
- Спеціалізований інструктаж: для роботи зі складним обладнанням, таким як роботизовані системи.

У разі виявлення недостатніх знань у працівників щодо роботи з мехатронними системами, вони мають пройти повторне навчання і перевірку

знань.

Аналіз умов праці при використанні роботів-маніпуляторів

Застосування мехатронних систем, таких як роботи-маніпулятори, дозволяє значно покращити умови праці, знижуючи фізичне навантаження на працівників і зменшуючи ризик травматизму. Проте рівень безпеки залежить від кількох факторів:

- Організація охорони праці;
- Рівень технічної справності мехатронних систем;
- Трудова дисципліна працівників;
- Якість проведення інструктажів і навчань.

Дослідження нещасних випадків, пов'язаних із використанням роботизованих систем, проводиться відповідно до "Положення про розслідування та облік нещасних випадків, професійних захворювань і аварій на підприємстві в установах і організаціях" (ДНАОП 0-00-4.03-98). Виявлені порушення часто пов'язані з недотриманням правил експлуатації або недостатньою підготовкою працівників.

Напрямки оптимізації безпеки роботи з мехатронними системами

Для зменшення ризику травматизму та підвищення ефективності роботи мехатронних систем на пакувальних лініях необхідно:

Підвищувати рівень підготовки спеціалістів із роботи з роботизованими системами та охорони праці.

Забезпечувати відповідність усіх систем і обладнання чинним нормативам безпеки.

Проводити регулярне технічне обслуговування та перевірки роботів-маніпуляторів, щоб уникнути експлуатації несправного обладнання.

Здійснювати якісне навчання персоналу та виключати можливість роботи без належного інструктажу.

Оснащувати працівників сучасними засобами індивідуального захисту, враховуючи особливості виробничого процесу.

Отже, впровадження мехатронних систем у пакувальні лінії потребує не лише технічної модернізації, а й удосконалення підходів до охорони праці, що сприяє безпечній, ефективній і безперебійній роботі таких систем

Організація робіт з охорони праці

На підприємстві, де кількість працівників не перевищує 50 осіб, функції служби охорони праці можуть виконуватися працівниками з відповідною підготовкою у порядку сумісництва. Така служба підпорядковується безпосередньо роботодавцеві. Спеціалісти з охорони праці мають низку важливих повноважень. Вони можуть видавати обов'язкові для виконання приписи керівникам підрозділів щодо усунення виявлених недоліків, отримувати від них необхідну документацію з питань охорони праці, вимагати відсторонення від роботи осіб, які не пройшли медичний огляд, навчання чи інструктаж, або не мають відповідного допуску. Також вони мають право зупиняти роботу обладнання у випадку порушень, що створюють загрозу життю чи здоров'ю працівників, та подавати роботодавцеві подання про притягнення до відповідальності порушників вимог охорони праці. Припис служби охорони праці може бути скасований лише роботодавцем, а ліквідація такої служби можлива виключно у разі ліквідації підприємства або припинення використання найманої праці фізичною особою.

Фінансування заходів з охорони праці покладається на роботодавця. Воно охоплює витрати на профілактичні заходи, виконання державних, галузевих і регіональних програм, спрямованих на покращення безпеки, гігієни праці та виробничого середовища. Підприємства, що утримуються за рахунок бюджету, зобов'язані передбачати витрати на охорону праці, які становлять не менше 0,2% від фонду оплати праці.

Санітарно-гігієнічне обслуговування на підприємстві включає контроль умов праці, стану здоров'я працівників, створення умов для запобігання втомі, підвищення опору організму шкідливим факторам та надання першої

допомоги. Виробничі приміщення повинні відповідати санітарним нормам. Оптимальні параметри метеорологічних умов у приміщеннях включають температуру 22–24°C, відносну вологість 40–60% і швидкість руху повітря менше 0,1 м/с. У приміщенні, де розташоване пакувальне обладнання, відсутні шкідливі виділення, а метеорологічні умови відповідають нормальним стандартам.

Освітлення є важливим компонентом безпечних умов праці. Рационально організоване природне освітлення та комбіноване штучне освітлення сприяють збереженню здоров'я працівників і зниженню виробничого травматизму. Штучне освітлення включає робоче, аварійне, евакуаційне та охоронне освітлення. Рекомендується використовувати люмінесцентні лампи, які забезпечують рівномірний напрямок світлового потоку та захищають очі від засліплення. У нашому випадку застосовується комбіноване освітлення, що включає місцеве освітлення для концентрації світла на робочій поверхні, при цьому освітлення загального типу становить не менше 10% від нормативу для комбінованого освітлення.

Таким чином, забезпечення безпечних умов праці через ефективну організацію охорони праці, дотримання санітарно-гігієнічних норм та раціональне освітлення є важливим аспектом для підвищення продуктивності роботи пакувальної лінії з мехатронними системами.

Протипожежна безпека

Протипожежна, електрична та технічна безпека при експлуатації мехатронних систем пакувальної лінії

Протипожежна безпека мехатронного обладнання безпосередньо залежить від дотримання технологічних регламентів та характеристик

процесів. При правильному виборі конструкційних матеріалів і належній експлуатації обладнання не повинно створювати пожежної чи вибухонебезпеки. Основними заходами забезпечення пожежної безпеки є: дотримання режиму роботи, відповідного паспортним даним і регламенту; теплоізоляція нагрітих поверхонь; запобігання накопиченню статичної електрики; дотримання правил безпеки під час огляду і ремонту обладнання; контроль ступеня натягу приводних пасів для виключення пробуксовування; застосування автоматизованих систем блокування та контролю, а також своєчасне технічне обслуговування та навчання персоналу. Ці заходи значно знижують ризик виникнення пожеж та аварій.

Електробезпека

Електробезпека є важливим аспектом роботи мехатронних систем, оскільки електроустановки можуть створювати потенційну загрозу через відсутність реакції людських органів відчуття на електричну напругу на відстані. Забезпечення електробезпеки включає встановлення захисних оболонок і огорож, безпечне розташування струмопровідних частин обладнання, ізоляцію робочих місць, використання систем захисного відключення та заземлення. У випадку мехатронного обладнання застосовуються такі заходи, як покриття струмопровідних частин діелектриком, розташування відкритих струмопровідних елементів у недоступних для дотику місцях, використання захисних кожухів і шаф, а також заземлення всіх струмоприймачів. Системи управління обладнанням живляться від зниженої напруги (36 В), що додатково підвищує безпеку.

Технічна безпека роботи мехатронних систем забезпечується суворим дотриманням правил експлуатації. До роботи з обладнанням допускаються лише працівники, які пройшли відповідне навчання, інструктажі та вивчили технічну документацію. Усе обладнання має бути заземлене відповідно до нормативних вимог, а ремонтні роботи можуть виконуватися лише у непрацюючому стані машини. Під час роботи заборонено торкатися рухомих

частин, проводити наладку, змазку чи очищення. Ремонт електрообладнання здійснюється виключно кваліфікованими електриками. Машина оснащена аварійними кнопками СТОП, які дозволяють швидко зупинити її з будь-якої точки зони обслуговування, що є важливим для запобігання аварійним ситуаціям.

Висновок до розділу

Розглянуті заходи безпеки, включаючи протипожежну, електричну та технічну безпеку, є критично важливими для забезпечення ефективної та безпечної роботи мехатронних систем пакувальної лінії. Дотримання технічних стандартів, організаційних процедур, своєчасне навчання персоналу та профілактичні заходи дозволяють знизити ризики нещасних випадків, запобігти пошкодженням обладнання та створити безпечні умови праці.

ВИСНОВКИ

Дипломна робота присвячена аналізу та дослідженню мехатронної системи робота- маніпулятора, з метою оцінки їх ефективності та можливостей у реалізації сучасних виробничих завдань. На основі проведеного аналізу зроблено такі висновки:

- Аналіз існуючих робототехнічних комплексів і систем маніпуляторів у складі пакувального обладнання підтверджує їхню актуальність для розвитку харчової та пакувальної промисловості. Використання таких систем сприяє підвищенню рівня автоматизації та оптимізації виробничих процесів.
- Проведено структурно-кінематичний аналіз маніпулятора, виконано моделювання динамічної взаємодії пристрою з програмованими засобами управління. Побудовано графіки швидкостей і прискорень вантажу під час його переміщення. Урахування опору повітря виявилось критично важливим для точного переміщення великогабаритних вантажів на високих швидкостях.
- Розроблено схему керування пневматичним захватом на базі програмованого логічного контролера із застосуванням програмного забезпечення «FluidSIM» та STEP 7, що дозволяє підвищити точність і надійність роботи пристрою.
- На основі експериментальних досліджень створено математично-статистичну модель, яка дозволяє кількісно оцінювати параметри захоплення продукції та прогнозувати їх залежно від змінних умов експлуатації.
- Ідентифіковано потенційні ризики та небезпеки, пов'язані з експлуатацією мехатронної системи та робота-маніпулятора, і розроблено рекомендації щодо мінімізації цих ризиків, включаючи технічні та організаційні заходи безпеки.

Таким чином, результати дослідження підтверджують високий практичний потенціал використання мехатронних модулів у виробничих

процесах харчової промисловості. Застосування запропонованих рішень сприятиме підвищенню технологічної гнучкості, енергоефективності та економічної доцільності виробничих операцій, що робить такі системи перспективними для інтеграції у сучасне промислове виробництво.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 Основи робототехніки: конспект лекцій для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форми навч., спец.: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, / Державний біотехнологічний університет; упоряд. М.С. Сорокін, – Харків: [б. в.], 2024. –94с.
- 2 Роботизоване палетування. Режим доступу: <https://www.motoman.com/en-us>
- 3 Мала гірнича енциклопедія : у 3 т. / за ред. В. С. Білецького. — Д. : Донбас, 2007. — Т. 2 : Л — Р. — 670 с. — ISBN 57740-0828-2.
- 4 Кіницький Я. Т. Теорія механізмів і машин [Текст]: підручник / Я. Т. Кіницький. — К. : Наукова думка, 2002. — 662 с. — ISBN 966-00-0740-X
- 5 Проць Я. І. Захоплювальні пристрої промислових роботів: Навчальний посібник. [Архівовано 4 березня 2016 у Wayback Machine.]/ Я. І. Проць — Т: Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя, 2008. — 232с.
- 6 Робототехніка. Підручник / В. І. Костюк, Г. О. Спишу, Л. С. Ямпольський, М. М. Ткач. — К.: Вища школа. — 1994. — 447 с.
- 7 Бучинський М.Я., Горик О.В., Чернявський А.М., Яхін С.В. ОСНОВИ ТВОРЕННЯ МАШИН / [За редакцією О.В. Горика, доктора технічних наук, професора, заслуженого працівника народної освіти України]. – Харків : Вид-во «НТМТ», 2017. — 448 с. : 52 іл. ISBN 978-966-2989-39-7
- 8 Урок№4. Поняття про автоматизоване робоче місце. Режим доступу: https://hpsl.in.ua/images/stories/2020_Inf_tehnologii_distan_nav/OK_Gr_191_1603_1604/%D0%A3%D1%80%D0%BE%D0%BA%204.pdf
- 9 Робототехнічні системи: проектування і моделювання [Електронний ресурс]: навч. Посіб. для студ. спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології» / М. М. Поліщук, М.М. Ткач; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові дані (1 файл: 41,6 Мбайт). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 112 с.
10. Класифікація промислових роботів. <https://kaf-av.tntu.edu.ua/index.php/mn->

abiturient/mn-articles/676-art-industrial-robots

11 Четверта промислова революція. Режим доступу:

https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A7%D0%B5%D1%82%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%B0_%D1%80%D0%B5%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D1%8E%D1%86%D1%96%D1%8F

12 Коваленко І.В. К – Пакувальне обладнання. Конспект лекцій: Навч. посіб. з курсу для студ. спец. 7.090223 –

«Машини і технології пакування»/І.В. Коваленко. – К.: 2014.

13. Гавва, О. М. Пакувальне обладнання в 3 кн. Кн. 1. Обладнання для пакування продукції в споживчу тару / О. М. Гавва, А. П. Беспалько, А. І. Волчко. - К. : "Упаковка", 2008. – 436 с.

14 Гавва, О. М. Пакувальне обладнання в 3 кн. Кн. 2. Обладнання для групового пакування / О. М. Гавва, А. П. Беспалько, А. І. Волчко. - К. : "Упаковка", 2007. – 136 с.

15 Захоплювальні пристрої промислових роботів: Навчальний посібник . – Тернопіль: Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя, 2008. – 232с. ISBN 966-305-021-7

16 Михайлишин Р.І. Обґрунтування параметрів та орієнтації струминного захоплювача маніпулятора для автоматизації вантажно-розвантажувальних операцій: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.05 “Піднімально-транспортні машини” / Р.І. Михайлишин. – Тернопіль, 2018. – 21 с.

17 Омаров М., Коробський В., Невлюдова В. (2023). "Особливості кінематики та управління багатоланкових роботів-маніпуляторів". Системи управління, навігації та зв'язку, вип. 1, с. 127–133.

18. Хоцянівський В. П., Синеглазов В. М. (2023). "Розробка методу планування руху роботів-маніпуляторів з використанням інтелектуальної системи,

заснованої на нейронних мережах". *Technical Science*, т. 14, № 4, с. 131–145.

19. Вітюк О. А. (2019). "Практичні аспекти динамічного аналізу роботи маніпулятора". *Наукові праці НУХТ*, вип. 25, № 2, с. 198–204.

20. Костючко С. В. (2022). "Система керування роботом-маніпулятором". *Вісник Національного технічного університету України "КПІ"*, серія "Адаптивні системи автоматичного управління", № 1, с. 45–52.

21. Синєглазов В. М., Хоцянівський В. П. (2023). "Машинне навчання в задачі автокалібрування рухомих елементів роботизованих систем на прикладі керування кроковим двигуном". *Міжнародна науково-технічна конференція "АВІА"*, с. 9.37–9.41.

22. Коруняк П., Ніщенко І., Шеремета Р. (2023). "Вібраційні мобільні пристрої в роботизованих системах". *Вісник Львівського національного аграрного університету. Серія: Агроінженерні дослідження*, вип. 26, с. 22–29.

23. Реалізація комплексної системи управління промисловим роботом-маніпулятором. (2014). *СОРА-DATA Україна*.

24. Розробка автоматизованої системи промисловим роботом-маніпулятором. (2019). *Київський національний університет технологій та дизайну*.

25. Удосконалення методу позиціонування маніпулятора робота за допомогою ПД-регулятора. (2020). *Харківський національний університет радіоелектроніки*.

26. Побудова математичної моделі робота-маніпулятора як об'єкта управління. (2019). *Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*.

27. Узгоджене керування роботом-маніпулятором. (2006). *Адаптивні системи автоматичного управління*, № 1, с. 45–52.

28. Розробка мікропроцесорної системи управління рухом ланок робота-маніпулятора. (2019). *Київський національний університет технологій та*

дизайну.

29. Практичні аспекти динамічного аналізу роботи маніпулятора. (2019). Наукові праці НУХТ, вип. 25, № 2, с. 198–204.

30. Система керування роботом-маніпулятором. (2022). Вісник Національного технічного університету України "КПІ", серія "Адаптивні системи автоматичного управління", № 1, с. 45–52.

31. Розробка методу планування руху роботів-маніпуляторів з використанням інтелектуальної системи, заснованої на нейронних мережах. (2023). Technical Science, т. 14, № 4, с. 131–145.

32. Особливості кінематики та управління багатоланкових роботів-маніпуляторів. (2023). Системи управління, навігації та зв'язку, вип. 1, с. 127–133.

33. Удосконалення методу позиціонування маніпулятора робота за допомогою ПД-регулятора. (2020). Харківський національний університет радіоелектроніки.

34. Побудова математичної моделі робота-маніпулятора як об'єкта управління. (2019). Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка.

35. Узгоджене керування роботом-маніпулятором. (2006). Адаптивні системи автоматичного управління, № 1, с. 45–52.

36. Розробка мікропроцесорної системи управління рухом ланок робота-маніпулятора. (2019). *К

37. Томчук М. В. "Мехатронні системи у виробничих процесах". Київ: Наукова думка, 2020. С. 45.