

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»

Директор інституту(декан факультету)


(підпис)

Сергій БЛАЖЕНКО
(ім'я та прізвище)

« 06 » 12 20__ р.

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри


(підпис)

Любмила КРИВОПЛЯС-ВОЛОДИНА
(ім'я та прізвище)

« 06 » 12 20__ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

зі спеціальності 131 Прикладна Механіка
(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми Прикладна Механіка

на тему: Комплексний аналіз та модернізація захоплювальних модулів роботів

Виконав: здобувач 2 курсу, групи 1М

ГАЛИЧ Арсен Сергійович

(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

Сергій Бланк
(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 - 20__ р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) ІНІТІ 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 » _____ 10 _____ 20__ року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Галич Арсен Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Комплексний аналіз та модернізація захоплювальних модулів роботів.

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 № 859-кк

2. Строк подання здобувачем роботи 05.12.2024

3. Вихідні дані до роботи:

Характерні параметри роботи механічної та об'єктується для моделі вантажів вран вимог

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Реферат; Вступ; 1. Розділ 1. Аналіз сучасних мехатронних систем пакувальних

ліній, 2. Розділ 2. Розробка оптимізованої конструкції системи захвату, 3.

Розділ 3. Експериментальне дослідження мехатронної системи, 4. Розділ 4.

Охорона праці, Висновки; Список використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу

13 аркушів
(Презентація)

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

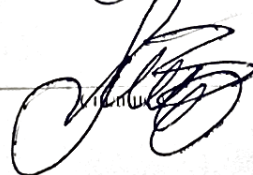
№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Реферат	06.09.24	<i>Виконав</i>
2	Вступ	15.09.24	<i>Виконав</i>
3	<u>Розділ 1. Аналіз сучасних мехатронних систем пакувальних ліній</u>	21.04.24	<i>Виконав</i>
4	Висновок до розділу 1	24.09.24	<i>Виконав</i>
5	<u>Розділ 2. Розробка оптимізованої конструкції системи захвату</u>	27.09.24	<i>Виконав</i>
6	Висновок до розділу 2	30.09.24	<i>Виконав</i>
7	<u>Розділ 3. Експериментальне дослідження мехатронної системи</u>	07.10.24	<i>Виконав</i>
8	Висновок до розділу 3	13.10.24	<i>Виконав</i>
9	Охорона праці	16.10.24	<i>Виконав</i>
10	Висновок до розділу 4	20.11.24	<i>Виконав</i>
11	Висновки	22.11.24	<i>Виконав</i>
12	Список використаних джерел	26.11.24	<i>Виконав</i>

Здобувач



Арсен ГАЛИЧ
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи



Анастасія ДЕРЕНІВСЬКА
(ім'я та прізвище)

Анотація

Комплексний аналіз та модернізація захоплювальних модулів роботів

Предметом магістерської роботи є аналіз та вдосконалення захоплювальних модулів, що є невід'ємною складовою роботизованих систем у пакувальних лініях. Використання автоматизованих рішень у пакувальних процесах дозволяє суттєво підвищити продуктивність виробництва, стабільність якості продукції та ефективність використання ресурсів.

Основна увага приділена розробці та дослідженню вакуумних захоплювальних пристроїв для роботизованих маніпуляторів. Проведено комплексний аналіз сучасних конструкцій захоплювачів та їхніх характеристик, які забезпечують ефективне утворення розрідження. Здійснено детальне дослідження різних типів вакуумних ежекторів, що застосовуються в пакувальних системах, зокрема їхньої ефективності та енергоощадності.

На основі аналізу існуючих рішень було запропоновано вдосконалені конструкції захоплювальних модулів. Досліджено вакуумні ежектори, що дозволило отримати оптимальні конструктивні параметри, які забезпечують високу продуктивність і мінімізують енергетичні витрати.

Запропоновані технічні рішення можуть бути впроваджені у виробничі процеси харчової, фармацевтичної та інших галузей промисловості, забезпечуючи модернізацію автоматизованих систем захоплення у роботах-маніпуляторах.

Ключові слова: захоплювальний модуль, робот-маніпулятор, вакуумний захват, автоматизація.

Abstract

Comprehensive Analysis and Modernization of Robotic Gripper Modules

The subject of this master's thesis is the analysis and improvement of gripper modules, which are essential components of robotic systems in packaging lines. The implementation of automated solutions in packaging processes significantly enhances production efficiency, ensures consistent product quality, and optimizes resource utilization.

The main focus is on the development and study of vacuum gripper devices for robotic manipulators. A comprehensive analysis of modern gripper designs and their characteristics, which ensure effective vacuum generation, was conducted. Various types of vacuum ejectors commonly used in packaging systems were studied in detail, with an emphasis on their efficiency and energy-saving potential.

The proposed technical solutions can be implemented in the production processes of the food, pharmaceutical, and other industries, facilitating the modernization of automated gripper systems in robotic manipulators.

Keywords: gripper module, robotic manipulator, vacuum gripper, automation.

Зміст

Анотація	3
Вступ.....	6
Розділ 1. Аналіз сучасних мехатронних систем пакувальних ліній.....	8
1.1. Типи та класифікація роботів-маніпуляторів.....	8
1.2. Основні поняття в галузі захватних пристроїв	20
1.3. Класифікація захватних пристроїв для роботизованих систем пакувальних ліній	25
1.4. Базове поняття про « ежектор».....	33
Висновок до розділу 1.	34
Розділ 2. Дослідження характерних параметрів захватних пристроїв для промислових маніпуляторів і приладів.....	35
2.1. Вакуумні захвати.....	35
2.2.Струменеві захоплюючі пристрої.....	45
2.3. Струменеві захоплювачі з вертикальним і горизонтальним напрямками газових потоків.	46
2.4. Пневматичні та гідравлічні захоплювальні пристрої.....	53
2.5.Магнітні захоплювальні пристрої.....	55
2.5. Захоплювальні пристрої з еластичними елементами.....	57
Висновок до розділу 2	64
Розділ 3. Методика розробки оптимізованої конструкції системи захвату з ежектором.....	65
Висновок до розділу 3	66
Розділ 4. Експериментальне дослідження мехатронної системи.....	67
4.1. Опис експериментальної установки.....	67
4.2. Проведення дослідів	68
Висновок до розділу 4	72
Розділ 5. Охорона праці.....	73
5.1. Регламент технічного обслуговування	73
5.2. Усунення несправностей у роботизованих системах.....	74
5.3. Забезпечення стабільної роботи вакуумних систем.	75
Загальні висновки.....	79
Використана література.....	81

Вступ

Сучасне виробництво важко уявити без впровадження автоматизованого обладнання, яке забезпечує виконання типових завдань із максимальною ефективністю. У пакувальних лініях автоматизація дозволяє значно підвищити продуктивність, покращити якість продукції та зменшити витрати на ручну працю. Для підвищення рівня автоматизації необхідно модернізувати існуюче обладнання та впроваджувати новітні технології. Одним із ключових напрямів є розробка і вдосконалення захоплювальних модулів роботів, які є невід'ємною частиною роботизованих систем та здатні автоматизувати складні технологічні процеси.

Модернізація захоплювальних пристроїв, орієнтована на економічну ефективність і підвищення продуктивності, є невід'ємною частиною розвитку сучасних технологічних систем. Завдяки використанню сучасного програмного забезпечення та методів комп'ютерного моделювання забезпечується швидкий перехід від концепції до готового продукту, що значно скорочує час і витрати на впровадження нових рішень.

Особливу роль у функціонуванні пакувальних ліній відіграють захоплювальні модулі, які забезпечують надійне утримання, точне переміщення та орієнтацію продукції різної форми. До таких пристроїв висуваються жорсткі вимоги щодо сили утримання, швидкості роботи та точності позиціонування в просторі. Одним із перспективних рішень є використання вакуумних захватів, які демонструють високу ефективність у різних виробничих умовах.

Аналіз і вдосконалення вакуумних систем, зокрема вакуумних захоплювачів та їхніх ключових компонентів, таких як ежектори, є важливим етапом у підвищенні ефективності роботів-маніпуляторів.

Мета роботи

Розробка та оптимізація захоплювальних модулів як складової мехатронної системи робота-маніпулятора для автоматизації пакувальних ліній. Це сприятиме підвищенню продуктивності обладнання, ефективності виробничих процесів та забезпеченню стабільної якості продукції.

Завдання роботи:

Провести аналіз існуючих типів захоплювальних модулів, що використовуються в роботизованих системах.

Виконати порівняльну оцінку конструктивних характеристик вакуумних захоплювачів.

Розробити оптимізовану конструкцію вакуумного захоплювального модуля із застосуванням сучасних засобів автоматизованого проектування.

Провести комп'ютерне моделювання потоків у вакуумній системі для визначення сил, що створюються розрідженням.

Надати рекомендації щодо впровадження розробленого модуля у виробничий процес.

Предмет дослідження:

Геометричні параметри вакуумного захоплювального модуля, конструктивні особливості вакуумного ежектора, а також сили, що утворюються під час створення вакуумного розрідження.

Практичне значення результатів дослідження:

Розроблені конструктивні рішення можуть бути використані для автоматизації операцій на пакувальних лініях у різних галузях промисловості, таких як харчова, фармацевтична, текстильна та легка промисловість. Впровадження цих рішень дозволить підвищити швидкість і точність виробничих процесів, знизити витрати на ручну працю, а також підвищити загальну ефективність роботи пакувальних ліній.

Розділ 1. Аналіз сучасних мехатронних систем пакувальних ліній

1.1. Типи та класифікація роботів-маніпуляторів

Класифікація роботів за призначенням та сферою застосування

Роботи поділяються на декілька категорій залежно від їх функціональних можливостей і умов експлуатації [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]:

Універсальні роботи

Ці роботи здатні виконувати широкий спектр операцій і можуть використовуватись у різних сферах виробництва. Вони адаптуються до багатьох завдань, завдяки чому є надзвичайно гнучкими у використанні.

Спеціальні роботи. Призначені для роботи в несприятливих умовах або виконання специфічних завдань. Ці роботи мають спеціальні конструктивні особливості, що забезпечують їх функціонування в екстремальних середовищах, наприклад, при високих температурах, підвищеній вологості або низьких температурах.

Спеціалізовані роботи. Дані роботи розроблені для виконання конкретних виробничих завдань, таких як монтаж, різання, зварювання, фарбування, палетування. Ось декілька прикладів таких роботів:

Роботи-палетувальники. Призначені для вантажно-розвантажувальних робіт і укладання продукції на піддони за визначеною схемою. Наприклад, машини серії Fanuc M410 ефективно працюють при середніх і великих навантаженнях. Інший приклад — візок KUKA KR QUANTEC PA Arctic, який здатний

працювати за температури до -30°C .

Кожна з цих категорій роботів має свої переваги, залежно від конкретних виробничих потреб, і сприяє підвищенню продуктивності, якості та економічності процесів.



Рис.1.1 Різновиди роботів-маніпуляторів

Роботи-маніпулятори поділяються на кілька типів залежно від їх конструктивних особливостей і функціонального призначення.

Звичайні роботи-маніпулятори працюють за допомогою сервоприводів і мають обмеження в рухах, які визначаються розмірами їх маніпуляторної руки та прикріпленого інструменту. Вони здатні виконувати складні рухи завдяки різним конструктивним рішенням.

Дельта-роботи відзначаються високою швидкістю та точністю виконання завдань. Їх унікальна конструкція дозволяє ефективно виконувати пакувальні й монтажні операції. Завдяки цим характеристикам дельта-роботи активно застосовуються у фармацевтичній, електронній та харчовій промисловості. Вони є

оптимальним вибором для завдань, що потребують високої точності та швидкості, особливо у швидкоплинних виробничих процесах.



Рис. 1.1. Робот типу SCARA

Роботи типу SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) мають високу точність, повторюваність дій та обмежену робочу зону зі зменшеною кількістю ступенів свободи. Ці роботи призначені для виконання вузькоспеціалізованих задач, де ключовою є точність, наприклад, у процесах складання продукції. Їх конструкція забезпечує стабільність і надійність, навіть за умов обмеженого робочого простору.

Кожен із цих типів роботів-маніпуляторів має свої переваги, які роблять їх оптимальним рішенням для конкретних виробничих завдань і галузей, забезпечуючи ефективність, точність та продуктивність технологічних процесів..

З розвитком технологій роботи стають доступнішими, що

пояснюється низкою переваг. Один робот може замінити працю кількох людей, суттєво підвищуючи продуктивність. Крім того, такі інвестиції окуповуються протягом 12–15 років, що робить роботизацію економічно вигідною. Подальший розвиток цієї галузі значною мірою пов'язаний із прогресом у сфері штучного інтелекту.

Їх ефективність уже підтверджена в багатьох виробничих процесах, і вони мають низку суттєвих переваг.

Використання роботів дозволяє значно знизити витрати, включаючи витрати на оплату праці, підвищити точність виробничих операцій і зменшити кількість дефектів. Роботизація прискорює процеси виробництва, сприяє економії ресурсів та енергії, знижує експлуатаційні витрати, а також забезпечує швидке переключення виробничих ліній на нові проєкти.

Отже, роботи-коллаборанти є важливим інструментом для оптимізації виробничих процесів, забезпечуючи високу ефективність, гнучкість і економічну вигідність у різних галузях промисловості. [1].

Серед провідних компаній, які пропонують технології робототехніки, ось на що варто звернути увагу: FANUC Японська компанія FANUC є світовим лідером у виробництві промислових роботів. За даними 2018 року, у всьому світі встановлено 400 000 роботів FANUC. Виробничий центр включає кілька частин обладнання, таких як зварювальні роботи, фарбування та пакування [11]



Рис 1.3. Загальний вигляд FANUC M-1iA

Модель FANUC M-1iA є ідеальним рішенням для компаній, які працюють із дрібним електронним обладнанням. Основними перевагами цього робота є висока точність виконання операцій, низька вантажопідйомність, висока продуктивність і швидкість складання деталей. Ця модель забезпечує ефективність роботи навіть у найбільш деталізованих процесах, що робить її популярною у сфері виробництва електроніки.

Одним із лідерів у виробництві роботів для співпраці є компанія Hanwha [12] продукція якої широко використовується в Азії, Європі та Америці. Колаборативні роботи Hanwha, зокрема модель HCR-5, стають дедалі популярнішими завдяки своїй доступності, простоті в управлінні та низьким витратам на обслуговування. Hanwha HCR-5 знаходить застосування у виробництві електронних пристроїв, переробці пластмас, харчовій, автомобільній і фармацевтичній промисловості.

Hanwha



Рис.1.4 Корейська компанія Hanwha

Популярність цих рішень зумовлена їхньою гнучкістю, можливістю ефективно працювати в різних галузях і здатністю до безпечної взаємодії з людьми, що робить їх універсальними і перспективними в умовах сучасного виробництва.

Kuka

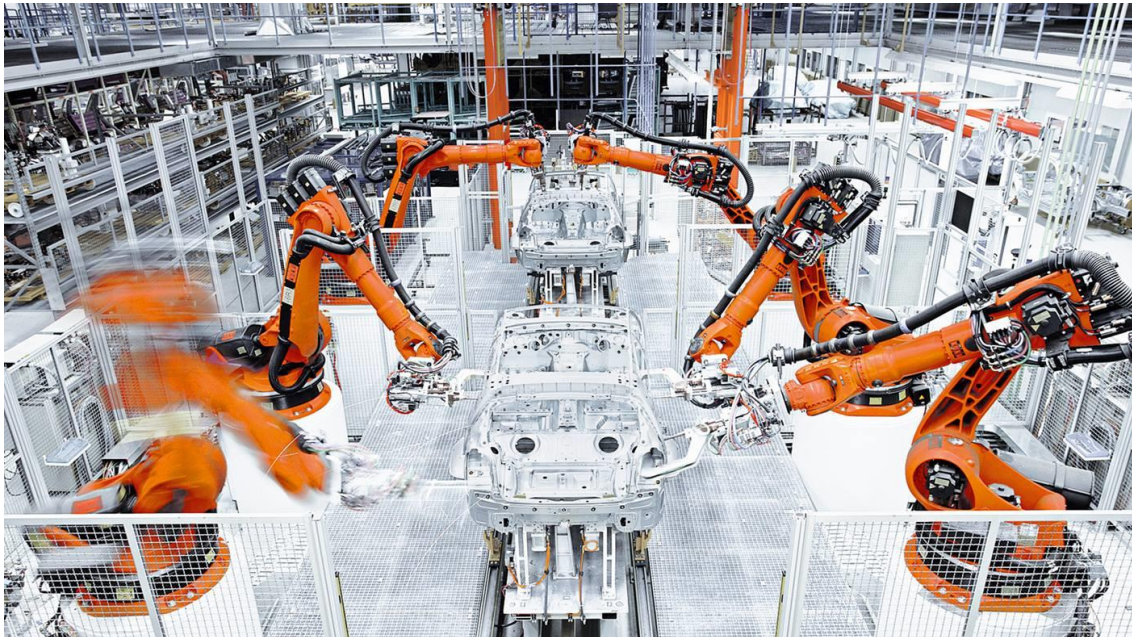


Рис.1.5 Компанія Kuka

Компанія KUKA є провідним виробником промислових роботів, які виконують широкий спектр завдань, включаючи пакування [13], завантаження, пакування, зварювання, складання та виготовлення. Завдяки своїй надійності та ефективності, роботи KUKA встановлені більш ніж у 80 000 точок по всьому світу. Зокрема, роботи KUKA з автоматичним дуговим зварюванням демонструють високий рівень продуктивності та точності. Вони активно використовуються на виробничих лініях, таких як завод Gestamp у Бельфельді, де роботи залучені до виготовлення ступінчастих рам для автомобілів Volkswagen. Ці рішення забезпечують стабільність роботи та високий рівень автоматизації, що сприяє підвищенню ефективності та якості продукції. Роботи KUKA є прикладом інноваційного підходу до автоматизації, що дозволяє оптимізувати виробничі процеси та відповідати високим стандартам сучасної промисловості.

Universal Robots



Рис.1.6 Компанія Universal Robots

Universal Robots: лідери у виробництві колаборативних роботів [14]

Компанія Universal Robots, заснована у 2005 році, спеціалізується на виробництві невеликих, гнучких роботів для спільної роботи. У 2008 році було випущено першу модель — UR5, яка стала популярною завдяки своїй універсальності та простоті інтеграції у виробничі процеси.

Колаборативні роботи Universal Robots широко використовуються для виконання завдань, таких як складання, палетування, пакування, фарбування, лиття та зварювання. Завдяки їхній гнучкості, ці роботи можуть адаптуватися до різних виробничих середовищ і легко навчатися новим завданням.

Однією з популярних моделей є UR10, яка має середню вантажопідйомність і використовується для виконання зварювальних операцій, монтажу деталей та інтеграції з фармацевтичним і технічним обладнанням. Завдяки компактності UR10 можна встановити навіть на стіл, що робить його зручним для обмежених робочих просторів.

Роботи Universal Robots забезпечують ефективність, безпечну співпрацю з людьми та легку інтеграцію у виробничі процеси, що робить їх ідеальним вибором для сучасної автоматизації.

uFactory



Рис.1.7 Китайський виробник uFactory

Компанія uFactory, що базується в Китаї, спеціалізується на розробці роботів, орієнтованих на потреби малого бізнесу та освітніх програм. Її рішення поєднують доступність, функціональність і простоту використання, що робить їх популярними серед широкої аудиторії [15].

Найбільш відомою розробкою компанії є uArm Swift Pro — роботизована рука, створена для домашнього використання та невеликих проєктів, зокрема для 3D-друку. Цей робот може бути оснащений лазерним гравіювальним верстатом, друкуючою головкою, різноманітними маніпуляторами та іншими інструментами.

Одна з ключових переваг uArm Swift Pro — можливість легко переходити в режим навчання, що дозволяє користувачам швидко освоювати управління пристроєм і програмувати його для виконання

різноманітних завдань.

Ця розробка стала популярною завдяки своїй універсальності, що дозволяє застосовувати її в різних сферах — від освіти та навчальних проєктів до домашнього використання і невеликих бізнес-рішень.

ABB

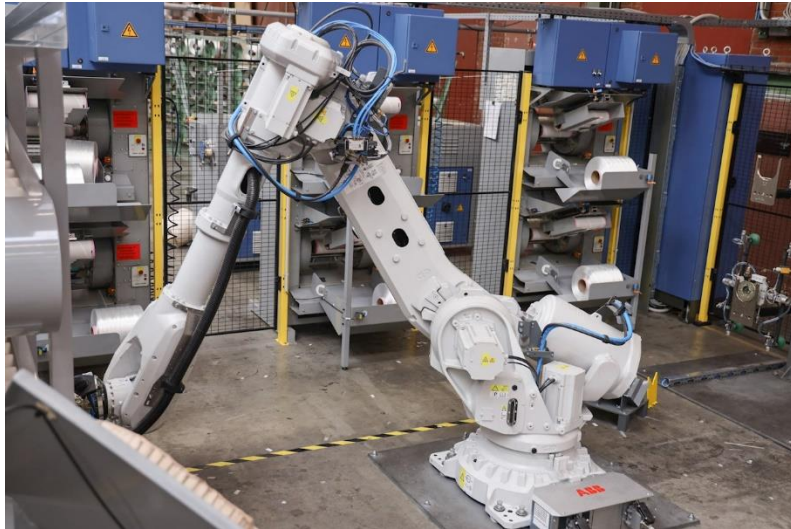


Рис.1.8 Швейцарська компанія ABB

ABB — провідна європейська компанія, заснована в Берні, яка до 2024 року виготовила понад 160 000 роботів. Роботи ABB активно застосовуються в різних галузях промисловості, зокрема харчовій, меблевій, фармацевтичній, електронній та багатьох інших^[16].

Компанія є визнаним піонером у сфері робототехніки. Ще 40 років тому ABB створила першого у світі електричного промислового робота, що стало революційним проривом у галузі автоматизації.

Також ABB була першою серед інших компаній, хто розробив робота, спеціалізованого на фарбувальних операціях.

Завдяки інноваційним підходам, багаторічному досвіду та широкому спектру застосувань, ABB залишається одним із лідерів у сфері

промислової автоматизації, забезпечуючи надійність, ефективність і передові рішення для сучасного виробництва.

Yaskawa



Рис.1.9 Японська компанія Yaskawa Electric

Yaskawa Electric [17], заснована у 1915 році, є найстарішою японською компанією у сфері робототехніки. У 1977 році компанія випустила першу партію своїх промислових роботів серії MOTOMAN-L10, які призначені для виконання таких завдань, як складання, зварювання, різання, пакування та фарбування.

У 2007 році Yaskawa Electric досягла нового рівня інновацій, створивши найшвидшого зварювального робота MOTOMAN SSA2000, який демонструє високу продуктивність і точність у роботі.

Yaskawa Electric продовжує залишатися одним із провідних гравців у сфері промислової автоматизації, пропонуючи передові рішення для різних галузей і забезпечуючи високу якість та ефективність виробничих процесів.

Kawasaki



Рис.1.10 Роботи- маніпулятори компанії Kawasaki.

Компанія працює на ринку робототехніки [18] з 1969 року і спеціалізується на створенні роботів для фарбування, палетування та зварювання. Її продукція здобула високу репутацію завдяки надійності та ефективності, особливо серед роботів, призначених для виконання складних і специфічних завдань.

Серед найпопулярніших рішень — дворучні шарнірні роботи, які активно використовуються для прибирання і високо цінуються клієнтами за свою продуктивність і універсальність. Ці роботи також підходять для роботи в складних умовах, таких як суворі середовища або високотемпературні виробничі лінії.

Компанія продовжує розробляти інноваційні рішення, які відповідають найвищим стандартам якості, забезпечуючи стабільність і продуктивність у різних галузях промисловості.

1.2. Основні поняття в галузі захватних пристроїв

Захоплювальні пристрої є ключовими робочими органами мехатронних систем, призначеними для захоплення та утримання об'єктів виробництва або предметів. Відповідно пакувальне обладнання з програмованими роботами (ПР) може включати різні типи захоплювачів: механічні, вакуумні, магнітні тощо [10, ¹⁹, ²⁰, ²¹, ²², ²³, ²⁴, ²⁵, ²⁶, ²⁷, ²⁸].

Робочі елементи захоплювального пристрою безпосередньо контактують із предметами, забезпечуючи їх утримання. Наприклад, у магнітних утримувачах робочими елементами є частини магнітної системи, які забезпечують притягування предметів. У вакуумних системах утримання об'єктів здійснюється за рахунок створення розрідження: присоска притискається до поверхні об'єкта, перешкоджаючи потоку повітря. У літературі для опису виконавчих елементів часто використовуються антропоморфні терміни, такі як «губка», «палець» або «цифра».

Механічні тягові пристрої працюють за принципом утримання об'єкта в зоні контакту за рахунок реакції сили, ваги чи руху робочих органів двигуна. Ці пристрої поділяються на:

Рукоятки та з'єднувальні пристрої, які затискають і утримують об'єкт під час його переміщення.

Допоміжні елементи — статичні утримувачі, що працюють під дією сили тяжіння. До таких належать гаки, штирі, призматичні опорні елементи, колодки тощо.

Вакуумні захвати забезпечують утримання предметів за

рахунок розрідження повітря, створюваного всередині присоски, що забезпечує щільний контакт із поверхнею об'єкта.

Магнітні захвати використовуються для утримання об'єктів із феромагнітних матеріалів. Робочі елементи магнітної системи забезпечують надійне притягування і утримання предметів навіть під час переміщення.

Захоплювальні пристрої, такі як вакуумні та магнітні, широко застосовуються в мехатронних системах пакувальних ліній. Вони забезпечують високу ефективність роботи, дозволяють автоматизувати процеси захоплення, утримання й транспортування об'єктів, що сприяє підвищенню продуктивності виробництва та якості продукції.

Вакуумні захватні пристрої є ключовим елементом мехатронних систем пакувальних ліній. Вони утримують розріджене повітря в закритій порожнині робочого елемента (присоски), що забезпечує надійне захоплення продукції різної форми. Вакуумні пристрої поділяються на два типи:

Активні вакуумні пристрої – генерують розрідження за допомогою вакуумного насоса або спеціальних відкачувальних механізмів.

Пасивні вакуумні пристрої – створюють розрідження в результаті деформації робочого органу, наприклад, за допомогою еластичних присосок.

Магнітні захватні пристрої використовуються для утримання металевих об'єктів під дією постійної магнітної сили. Вони є ефективними у застосуванні для роботи з об'єктами з феромагнітних

матеріалів.

Вимоги до захватних пристроїв

Сучасні пакувальні лінії вимагають від захватних пристроїв:

- надійного утримування предметів, незалежно від їхньої форми та ваги;
- запобігання падінню об'єктів під час переміщення;
- компактних розмірів і малої ваги для зниження навантаження на маніпулятор;
- стійкості конструкції та високої надійності з'єднань між захватним пристроєм і робочим органом робота-маніпулятора.

Тягові пристрої в мехатронних системах

Тягові пристрої промислових роботів є функціональними елементами, призначеними для переміщення, захоплення та утримання продуктів або предметів під час роботи пакувальної лінії.

Класифікація захватних пристроїв

Відповідно захватні пристрої класифікуються за принципом дії:

- Механічні – для захоплення об'єктів за допомогою затискних механізмів.
- Вакуумні – для роботи з легкими або плоскими об'єктами, використовуючи розрідження повітря.
- Магнітні – для захоплення феромагнітних об'єктів.

- Комбіновані – які поєднують у собі декілька типів дії.

Значення в пакувальних лініях

Оптимізація захватних пристроїв дозволяє підвищити продуктивність та адаптивність мехатронної системи до роботи з різноманітною продукцією. Використання сучасних засобів автоматизованого проектування, таких як SolidWorks, дозволяє створювати інноваційні конструкції, які відповідають високим вимогам сучасної автоматизації.

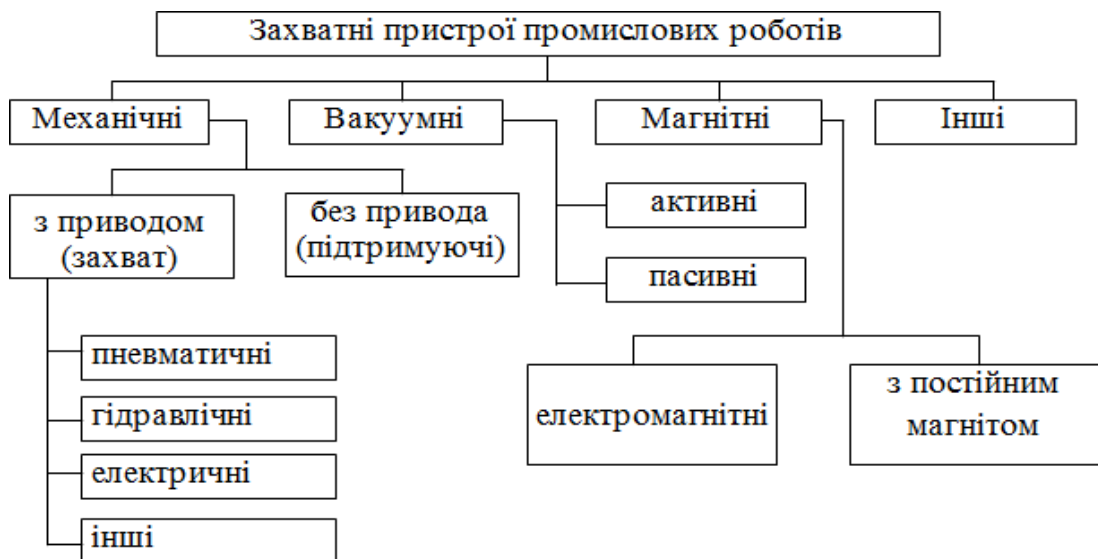


Рис.1.11. Захватні пристрої маніпулятора

Вакуумні та магнітні захватні пристрої в роботі мехатронних систем пакувальних ліній

Вакуумні захватні пристрої є основними елементами автоматизованих пакувальних ліній, що утримують предмети за допомогою розрідження повітря в закритій порожнині робочого елемента (присоски). Існують два основні типи вакуумних захватних

пристроїв:

Активні вакуумні пристрої, де розрідження створюється примусово за допомогою вакуумного насоса або спеціального відкачувального механізму.

Пасивні вакуумні пристрої, у яких розрідження виникає внаслідок зміщення або деформації робочого елемента.

Магнітні захватні пристрої використовують магнітні сили, створювані постійними або електромагнітами, для надійного утримання предметів. Вони ефективні при роботі з феромагнітними матеріалами, особливо у виробництвах, де обробляються металеві компоненти.

Класифікація захватних пристроїв

Захватні пристрої поділяються за способом роботи на:

Ручні – вимагають участі оператора для виконання операцій із захоплення або заміни.

Автоматичні – працюють без участі людини, що забезпечує безперервність та швидкість роботи на пакувальних лініях.

Кріплення захватного пристрою до маніпулятора виконується через механічний інтерфейс, який є важливим елементом конструкції, що впливає на стабільність і точність роботи системи.

Основні технічні характеристики захватних пристроїв:

- Номінальна вантажопідйомність.
- Сила утримання.
- Максимально допустимі значення зусиль.
- Час утримання об'єкта.
- Маса та габаритні розміри пристрою.

- **Різноманітність захватних пристроїв**

Сучасні захватні пристрої значно відрізняються за конструкцією, принципами дії та технічними характеристиками. Це ускладнює класифікацію виключно на основі ієрархічних принципів. Однак, в окремих класифікаційних групах можна виділити пристрої, що орієнтовані на виконання схожих завдань. У таблиці 1.1 представлено приклади різних типів захватних пристроїв відповідно до класифікаційних груп.

Оптимізація вибору та використання захватних пристроїв є важливим завданням при розробці ефективної мехатронної системи для автоматизації пакувальних процесів.

1.3. Класифікація захватних пристроїв для роботизованих систем пакувальних ліній

Захватні пристрої (ЗП) відіграють ключову роль у роботі мехатронних систем, забезпечуючи надійне утримання та переміщення продукції.

Залежно від конструктивних особливостей і принципу дії, вони поділяються на кілька типів.

Механічні захватні пристрої

Ці пристрої мають різні форми робочих елементів, що взаємодіють із предметом за допомогою сили затиску. Приклади:

Кліщові захвати – працюють за принципом затиску предмета між двома або більше поверхнями.

Камери з деформованими елементами – використовують гнучкі або пальцеві елементи, які деформуються під дією стисненого повітря чи рідини, що вприскується всередину.

Підтримуючі захватні пристрої

Призначені для утримання об'єктів знизу або за допомогою

виступів, отворів чи інших елементів форми. Вони забезпечують мінімальне втручання у робочий простір і не перешкоджають доступу до інших елементів системи. До таких пристроїв належать:

- Гачки.
- Петлі.
- Ручки для захоплення та подачі предметів.

Ці ЗП забезпечують додаткову підтримку і використовуються у випадках, коли об'єкт має нестандартну форму.

Притяжні захватні пристрої

Даний тип пристроїв застосовує різні фізичні явища для утримання об'єктів. Основні варіанти:

- Вакуумні пристрої – створюють розрідження для утримання предмета.
- Магнітні пристрої – використовують магнітну силу для роботи з феромагнітними матеріалами.
- Електростатичні захвати – застосовують сили електростатичного притягання.
- Адгезійні пристрої – працюють за рахунок молекулярного прилипання.

Захвати з клейовими накладками – тимчасово утримують об'єкт за допомогою спеціального клею.

Значення притягуючих пристроїв

Притяжні захватні пристрої особливо ефективні у роботі з гладкими, легкими або нестандартними за формою об'єктами. Їхнє впровадження дозволяє розширити функціональні можливості мехатронної системи, забезпечуючи високу точність і надійність роботи на пакувальних лініях.

Ці типи захватних пристроїв дозволяють адаптувати

мехатронні системи до широкого спектра виробничих завдань, підвищуючи ефективність та універсальність пакувального обладнання.

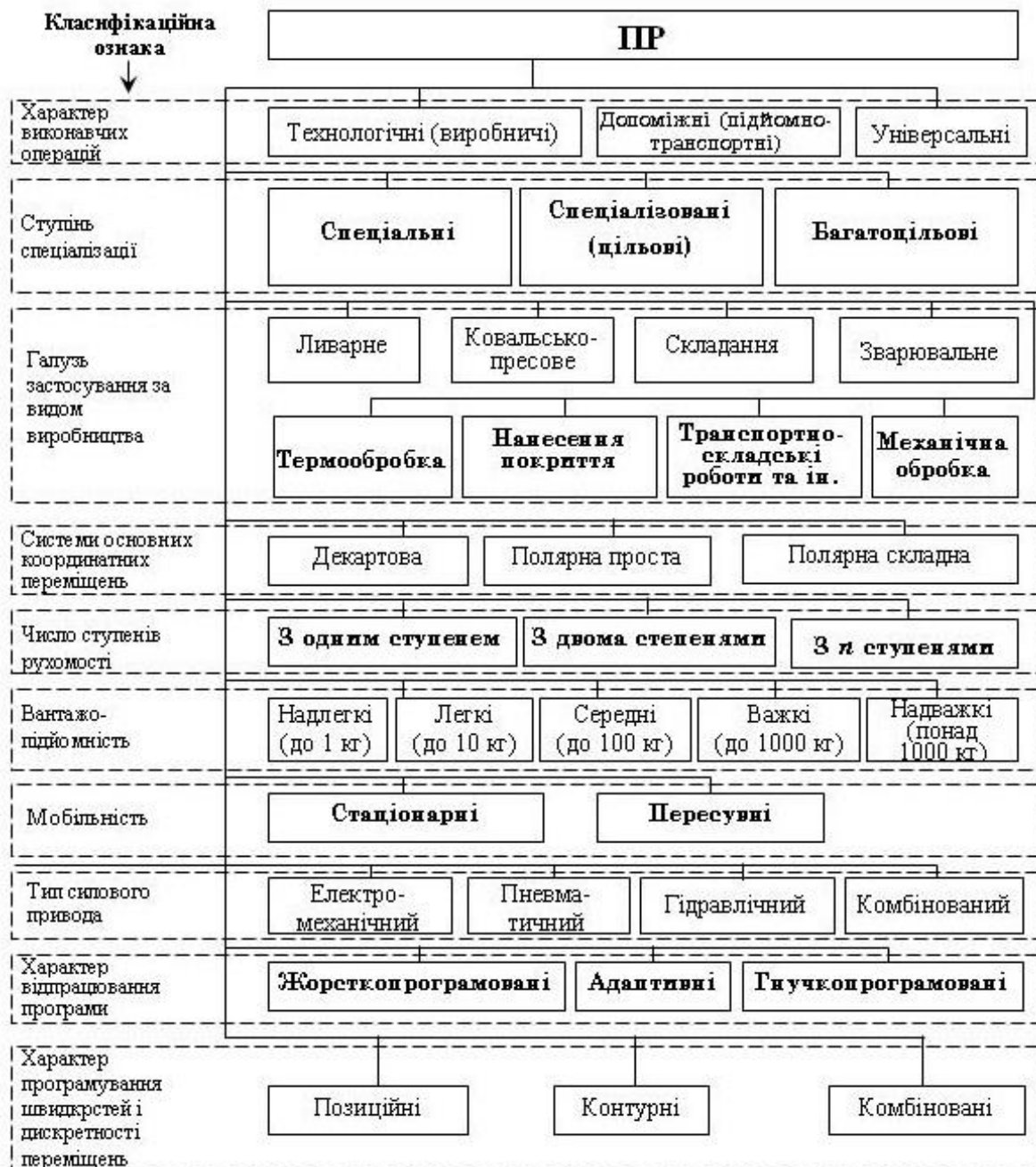


Рисунок 1.12. Систематизація етапів роботи за ступенем механізації



Рисунок 1.13. Систематизація фрикційних захватних пристроїв за конструктивними характеристиками

Самозатискні захватні пристрої використовуються для надійного утримання об'єктів за рахунок конструктивних особливостей, які забезпечують автоматичне затискання предмета під впливом сил гравітації або зовнішнього навантаження. Вони характеризуються простотою конструкції, високою надійністю та економічністю.

Конструкції самозатискних захватів

Затискач із сережкою та гвинтом

Конструкція включає:

- Рухомий упор 2 – забезпечує примусове затискання.
- Рухомий упор 3 – переміщується по похилій напрямній для регулювання сили затискання.

Такий тип захвату поєднує у собі примусове затискання вантажу з ефектом самозатискання, що значно покращує надійність утримання. Ця конструкція має низький рівень механізації, але забезпечує стабільність процесу захоплення.

Самозатискний захват без передавального механізму

Найпростіший тип цієї підгрупи представлений у вигляді вигнутого кулачка або силового корпусу, який забезпечує самостійне затискання предмета.

Напівавтоматичні варіанти – використовують затискну шайбу і стопорний механізм. У цьому випадку затискний елемент рухається по похилій напрямній та підвішується на тязі до важеля.

Важільна конструкція – важіль (1) оснащений фіксатором (2), який забезпечує фіксацію затискного корпусу у відкритому положенні.

Особливості використання

Примусове затискання вантажу забезпечує надійність захоплення, навіть у випадках нерівностей або нестандартних форм об'єкта.

Самозатискний ефект дозволяє зменшити навантаження на мехатронну систему, виключаючи потребу в додаткових приводах.

Простота конструкції робить ці захвати економічно вигідними для використання в автоматизованих пакувальних лініях.

Переваги самозатискних захватів

- Низька вартість виробництва та експлуатації.
- Простота конструкції з мінімальною кількістю рухомих елементів.
- Надійність у роботі навіть при високих навантаженнях.
- Можливість адаптації до об'єктів різної форми та розмірів.

Самозатискні захватні пристрої [29] є важливими елементами у мехатронних системах пакувальних ліній завдяки своїй ефективності, універсальності та простоті інтеграції в

автоматизовані процеси.

Кривизна кулачка в самозатискних захватах дозволяє ефективно працювати з аркушами товщиною понад 50 мм, забезпечуючи стабільний кут затиску (10-15°). Це запобігає зсуву матеріалу та надмірному навантаженню, зберігаючи цілісність об'єкта. Конструкція передбачає використання пружинного механізму, оснащеного важелем для створення початкової сили тертя, що дозволяє стабільно утримувати об'єкт. Важіль підвіски може переміщатися у відкриті або закриті положення, спрощуючи управління захватним пристроєм. Пружинний механізм також виконує роль запірного елемента, що підвищує надійність конструкції.

Особливу увагу в цих пристроях приділено вирішенню проблеми розділення м'яких і плоских деталей, таких як аркуші або пластини. Для цього розроблено значну кількість варіантів захватних пристроїв, які базуються на різних принципах взаємодії між корпусом і об'єктом захоплення. Взаємодія між захватним пристроєм та об'єктом стала ключовою ознакою класифікації таких конструкцій. Використання цих принципів дозволяє підвищити ефективність роботи пакувальних ліній, забезпечуючи надійне утримання, швидкість виконання операцій і мінімальне пошкодження матеріалів [9]

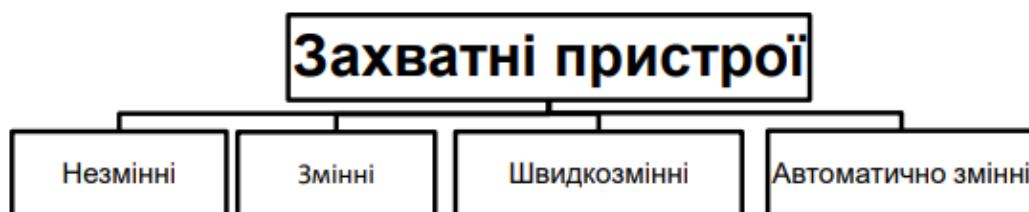


Рисунок 1.14. Класифікація захватних пристроїв

Захватні пристрої можна класифікувати на кілька груп залежно від принципу їхньої дії та взаємодії з об'єктами. До першої групи належать пристрої, які впливають на об'єкти за допомогою активних повітряних потоків або електростатичних зарядів. Цей підхід забезпечує безконтактний метод утримання, що підходить для роботи з легкими або чутливими матеріалами, зменшуючи ризик пошкоджень. Друга група захватів поділяється на три підтипи залежно від методу взаємодії з об'єктами. Перший підтип базується на фрикційній взаємодії між робочим органом і заготовкою, що забезпечує надійне утримання за рахунок сили тертя. Другий підтип використовує невеликі отвори в корпусі захватного пристрою, які активуються під впливом діючої речовини, наприклад, повітря або рідини, забезпечуючи стабільність захоплення. Третій підтип використовує передові матеріали, здатні взаємодіяти з компонентами на молекулярному рівні завдяки силам Ван-дер-Ваальса. Цей підхід забезпечує високий рівень точності та ефективності роботи з різними об'єктами.

Додатково, ці групи можуть бути розділені на інструменти, що викликають незворотні зміни в об'єктах. Наприклад, матеріали першої групи можуть змінювати площу поверхні об'єкта, тоді як пристрої другої групи здатні викликати зміни товщини матеріалу. Система управління обладнанням першої групи може впливати на компоненти, які містять прикріплений матеріал, забезпечуючи інтеграцію з іншими частинами механізму. Такі рішення дозволяють створювати ефективні, адаптивні захватні системи, що відповідають вимогам сучасних пакувальних ліній..



Рисунок 1.15. Приклади використання вакуумних захватів в автоматизації процесів у різних галузях промисловості

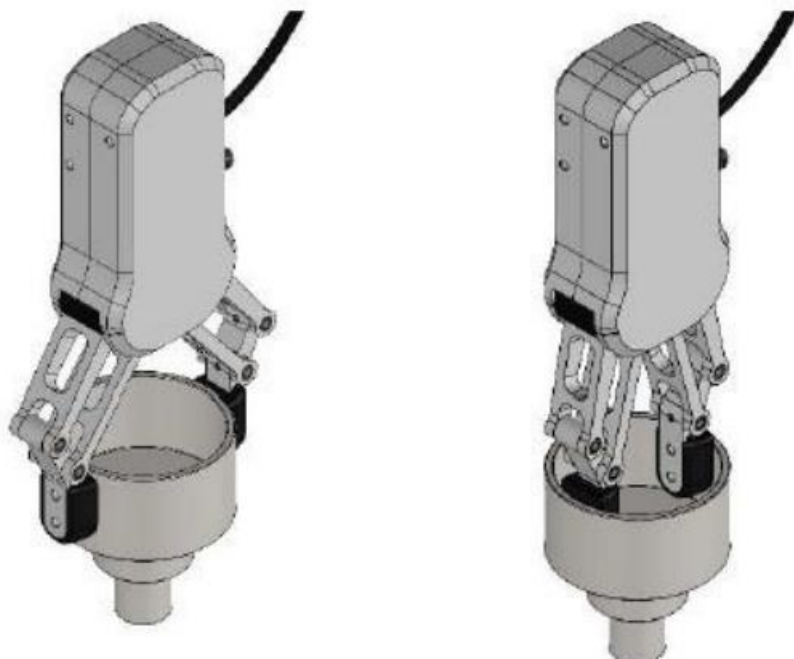


Рисунок 1.16 Варіанти захватних пристроїв фірми Schmalz

1.4. Базове поняття про «ежектор»

Ежектори — це прості та ефективні пристрої для створення вакууму, які широко використовуються у промислових системах. Вони забезпечують розрідження повітря за рахунок енергії стисненого повітря, що надходить із заводської пневматичної мережі. Основною перевагою ежекторів є відсутність потреби в окремому насосному агрегаті, що значно спрощує конструкцію системи та зменшує витрати на її обслуговування.

Конструкція ежектора зазвичай включає корпус, у якому проходить повітряний потік, створюючи зону низького тиску. Однією з популярних моделей є конструкція, де основа екстрактора виготовлена з матеріалу, до якого прикріплена пробка з невеликим отвором. Такий підхід дозволяє ефективно генерувати вакуум навіть у компактних системах.

Ежектори широко застосовуються в пакувальних лініях завдяки їхній простоті, надійності та економічності. Вони ідеально підходять для використання у вакуумних захватах роботизованих маніпуляторів, забезпечуючи швидку і точну роботу без значних витрат на енергію чи складне технічне обслуговування.

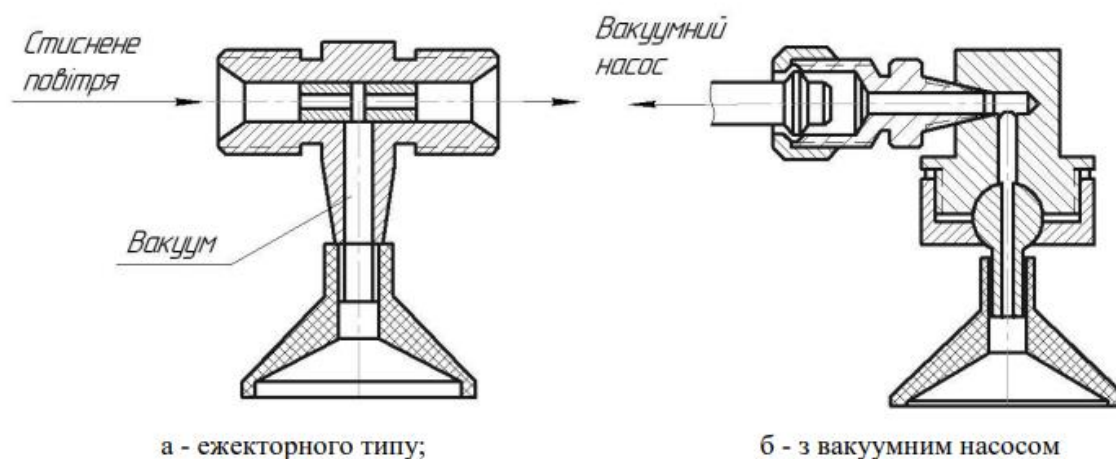


Рис.1.12 Пристрій для створення вакууму

Висновок до розділу 1.

Роботи-маніпулятори є ключовими елементами пакувальних ліній. Вони класифікуються за кінематичними схемами, типами приводу, рівнем автоматизації та функціональним призначенням. Ця різноманітність дозволяє інтегрувати роботів у широке коло завдань, зокрема для забезпечення високої точності і швидкості процесу пакування. Захватні пристрої відіграють важливу роль у роботизованих системах, оскільки їх конструкція і принципи дії визначають ефективність виконання завдань маніпуляції з об'єктами. Важливим аспектом є забезпечення універсальності, адаптивності та надійності захватів для роботи з різними матеріалами.

Визначено напрям подальших досліджень подальших досліджень - оптимізація конструкцій пневматичних захватів з використанням сучасних матеріалів та технологій для зменшення ваги і енергоспоживання, дослідження та пошук раціональних параметрів роботи захватних спрямованих на підвищення їх енергоефективності та розширення діапазону застосувань у вакуумних системах.

Розділ 2. Дослідження характерних параметрів захватних пристроїв для промислових маніпуляторів і приладів.

2.1. Вакуумні захвати

Вакуумні захватні пристрої [10, ³⁰, ³¹, ³², ³³, ³⁴, ³⁵] працюють за принципом створення розрідження в порожнині присоски, що утримує об'єкт. Надмірний тиск зовні створює силу, яка притискає предмет до поверхні присоски, забезпечуючи його надійне утримання. Завдяки цьому механізму захватні пристрої такого типу широко використовуються в автоматизованих лініях для збирання та транспортування об'єктів різних розмірів і форм.

Особливе значення вакуумні захвати мають у процесах холодного штампування, де вони забезпечують завантаження та вивантаження деталей, виготовлених із листових матеріалів. У таких умовах також використовуються магнітні захватні пристрої. Основними перевагами вакуумних і магнітних захватів є їхня універсальність. Вони не залежать від розмірів і форми контуру об'єкта, що дозволяє використовувати їх для транспортування широкого спектра виробів. Крім того, ці пристрої не викликають деформацій у продукції, що є критично важливим для роботи з тендітними або чутливими матеріалами.

Впровадження вакуумних і магнітних захватів у автоматизовані системи сприяє підвищенню продуктивності виробництва, забезпечуючи швидке і точне виконання завантажувально-розвантажувальних операцій. Завдяки своїй надійності та гнучкості такі захвати є ідеальним рішенням для сучасних автоматизованих ліній.

У таблиці 2.1 наведені параметри вакуумних і магнітних пристроїв

Таблиця 1.1

Вид захвату	Вдержуюча вага в площині стику, кг		
	Площа виробу, щоможе захватити	об'єму, який може захватити	Вага, що може захватити
Електрично-магнітні	0,075-0,135	0,003-0,0075	1,5-2
З магнітами, що використовуються завжди	0,045-0,15	0,021-0,075	3-9
Вакуумний	0,35	0,35	250

Порівняльний аналіз вакуумних і магнітних захватних пристроїв свідчить про значні переваги вакуумних систем. Основною перевагою вакуумних захватів є їхня здатність утримувати об'єкти з більшою силою навіть на поверхнях, що не мають магнітних властивостей. Це робить їх універсальними у використанні для роботи з матеріалами різного типу, включаючи пластик, дерево, скло та інші немагнітні матеріали. Крім того, вакуумні захвати ефективно вирішують проблему відокремлення предметів у вертикальному положенні під час упаковки, оскільки сила вакуумного утримання діє на верхній об'єкт, полегшуючи його захоплення.

У пресово-штампувальному виробництві вакуумні захвати широко застосовуються для автоматизації операцій, таких як холодне листове штампування, гаряче та холодне об'ємне тиснення. Актуальним

завданням у таких процесах є підвищення швидкості роботи пневматичних завантажувально-розвантажувальних пристроїв, які є важливими компонентами основних технологічних систем. Завдяки своїй простоті та надійності вакуумні захвати є ефективним рішенням для таких завдань.

Принцип роботи вакуумних захватів базується на створенні розрідження у вакуумній камері, що утворюється між корпусом захвату та деталлю. Атмосферний тиск, який діє на об'єкт, генерує силу, достатню для його утримання. Переваги таких пристроїв включають швидке захоплення та відпускання об'єкта, збереження поверхні об'єкта при захопленні та можливість роботи з рівними поверхнями.

До недоліків вакуумних захватів відносяться низька міцність на зріз, що обмежує їхню ефективність для роботи з важкими або грубими матеріалами, а також необхідність герметичності поверхні для утворення розрідження.

Конструкція вакуумних захватів залежить від способу створення розрідження в камері. Виділяють насосні та безнасосні системи, кожна з яких має свої особливості застосування. Для детального розуміння функціонування вакуумних захватних пристроїв рекомендується ознайомитися з типовими схемами пневматичних приводів, які включають вакуумні системи. Наприклад, схеми, подібні до представленої на рисунку 2.2, використовуються в приладобудуванні для маніпулювання деталями без отворів. Це ілюструє універсальність та ефективність вакуумних захватів у різних галузях промисловості.

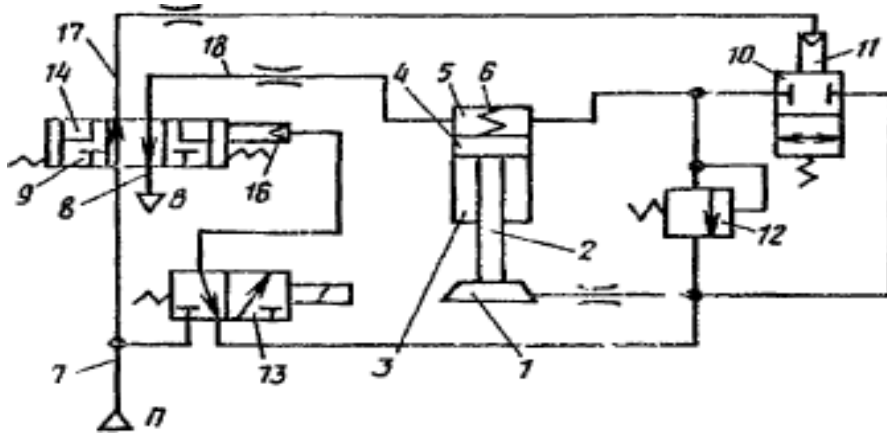


Рис.2.1 Пневмо-схема маніпулятора з вакуумним захватним пристроєм

Перевагою цього захватного пристрою є проста конструкція, яка забезпечує легкість управління та високу швидкість роботи. Завдяки таким характеристикам пристрій є ефективним рішенням для автоматизованих систем, особливо в умовах, де потрібна швидкість виконання операцій.

Однак недоліками такого пристрою є обмеження у надійності захоплення, особливо при роботі з об'єктами, що мають складну форму або поверхню. Наприклад, якщо отвори на предметах розташовані під кутом до горизонту, пристрій може не забезпечити їхнє надійне захоплення. Це обмежує застосування пристрою для нестандартних умов або складних задач.

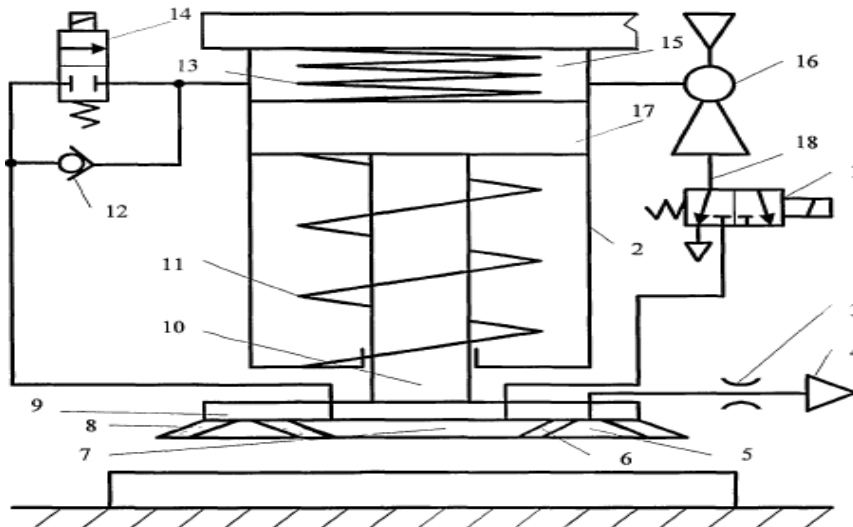


Рис 2.2. Пневматична схема вакуумного захватного пристрою 2

Плюсами цього пристрою є проста конструкція та управління захватом, а також висока швидкість.

Цей вакуумний захват має низку технічних переваг, які роблять його ефективним рішенням для автоматизованих систем. Однією з головних переваг є зменшення кількості керованих розподільників, що підвищує надійність роботи та збільшує швидкість виконання операцій. Особливістю конструкції є присоска, яка складається з центральної та периферійної порожнин. Після завершення процесу захоплення і звільнення заготовки, механізм автоматично відтягує присоску від об'єкта, видаляючи інструмент із робочої зони до моменту завершення операції підйому. Це значно підвищує надійність і безпеку пристрою під час експлуатації.

До недоліків цього захватного пристрою можна віднести його обмеження у використанні: пристрій не може ефективно працювати із заготовками, розташованими під кутом до горизонтальної площини. Крім того, складність виготовлення пристрою, пов'язана з

використанням двох циліндрів і круглих порожнин, збільшує витрати на виробництво. Для роботи також потрібні дорогі вакуумні насоси, що може підвищувати загальну вартість системи.

Попри ці недоліки, пристрій демонструє високу продуктивність і ефективність у задачах, що потребують швидкого і надійного переміщення об'єктів, зберігаючи їхню цілісність і якість. Він є перспективним рішенням для застосування в автоматизованих пакувальних лініях і промислових системах.

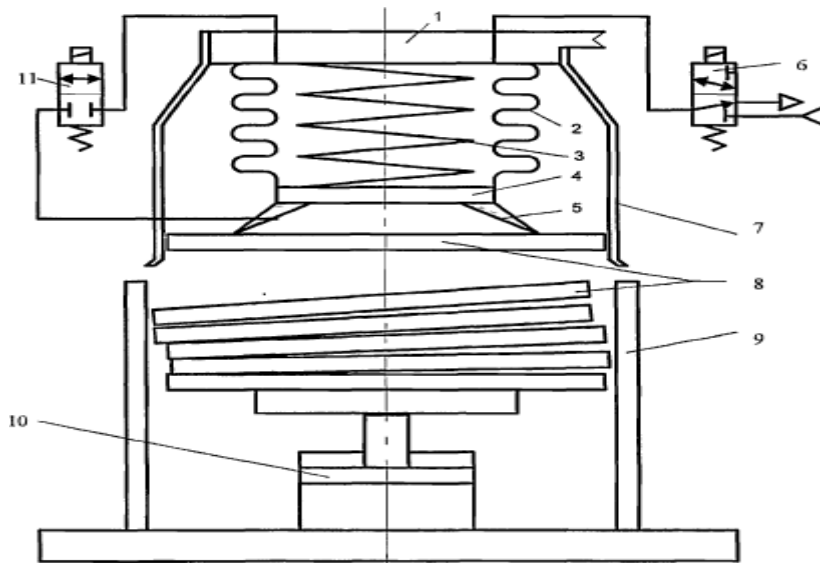


Рис. 2.3. Вакуумний пристрій

Аналіз систем приводу модулів вакуумного захоплення дозволяє виділити кілька класифікаційних ознак, які визначають їхню функціональність і ефективність. Основні критерії класифікації включають функціональне призначення, тип використовуваних дисків, спосіб керування приводом, кількість команд управління та швидкість

реакції. Ці системи виконують завдання переміщення захватного пристрою в просторі, забезпечують захоплення, утримання та опускання об'єктів.

За принципом дії вакуумні системи можуть працювати з використанням: надлишкового тиску повітря, тиску розрідження, або насосного та самовсмоктувального принципів. Вибір конкретного принципу залежить від вимог до точності, швидкості та надійності системи. Конструкція модулів також варіюється: вони можуть бути побудовані з урахуванням організації причинно-наслідкових зв'язків усередині одного пристрою або ж ґрунтуватися на взаємодії між фізичними явищами.

За способом керування модулі вакуумного захоплення поділяються на індивідуальні, комбіновані та інтегровані приводи.

У разі окремого керування кожен модуль вимагає шести команд для виконання основних функцій, таких як «взяти» та «встановити», при цьому швидкість виконання операцій становить близько 2-3 секунд. У системах із комбінованим управлінням для виконання тих самих операцій потрібно лише чотири команди, що дозволяє скоротити час реакції до десятих часток секунди. Це забезпечує значне підвищення ефективності та продуктивності системи.

Така класифікація дозволяє вибрати оптимальний тип приводу для конкретного застосування, враховуючи вимоги до швидкості, точності та надійності роботи мехатронної системи, що робить її незамінною у сучасних автоматизованих пакувальних лініях.

Швидкісні характеристики систем приводу вакуумних захватів,

призначених для роботи з об'єктами масою до 0,09 кг і переміщенням робочого органу на відстань до 0,05 м, показують високу ефективність таких конструкцій у задачах автоматизації. Дослідження існуючих вакуумних пристроїв дозволяє зробити кілька важливих висновків.

По-перше, захоплюючі механізми з агрегатною модульною конструкцією є найбільш ефективними з точки зору функціональності, швидкості роботи та простоти виготовлення. Вони забезпечують високу продуктивність і можуть бути легко адаптовані до різних умов використання. По-друге, використання відкритих конструкцій дає змогу створювати швидкодіючі вакуумні затискні пристрої, які поєднують простоту дизайну та надійність роботи. По-третє, модулі вакуумного захоплення мають великий потенціал для подальшого вдосконалення, що відкриває можливості для підвищення їхньої ефективності у виробничих процесах.

У межах дослідження конструкцій вакуумних захватів було визначено перспективність використання пружних оболонок із гуми. Ці конструктивні рішення забезпечують ефективний контакт із поверхнею об'єкта, зберігаючи його цілісність і підвищуючи швидкість операцій.

Щоб досягти максимальної швидкості роботи модуля вакуумного захоплення, необхідно враховувати чинники, які найбільше впливають на його динаміку. До таких чинників належать конструктивні особливості пристрою, вибір матеріалів для робочих елементів і оптимізація параметрів пневматичної системи. Правильний підхід до проєктування дозволяє створювати ефективні пристрої, що відповідають сучасним вимогам до автоматизації виробничих процесів.

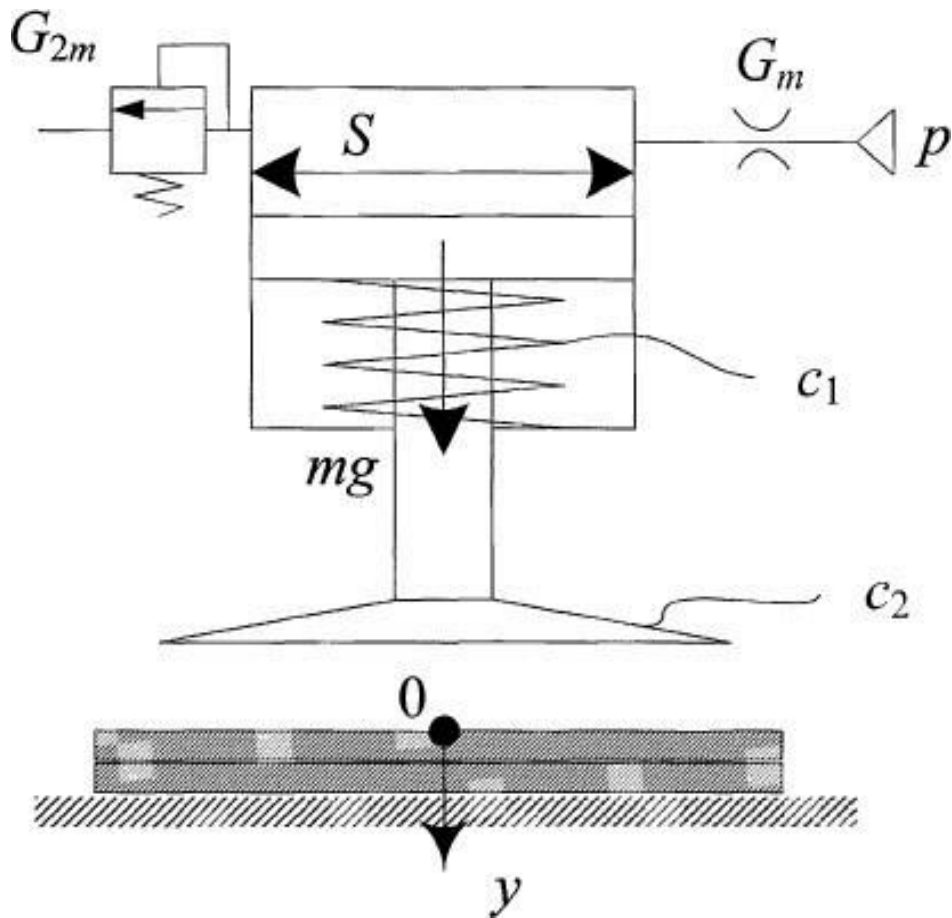


Рис. 2.4. Розрахункова схема створення математичної моделі вакуумного захватного модуля.

Перша система показує математичну схему вакуумного захватного модуля, коли він рухається до контакту присоски з деталлю:

$$\{ m\ddot{y} - c_1\Delta y_1 + \beta\dot{y} = pS + mg \quad [11]$$

$$V_{шк}p' + pSy' = RkTmGm$$

Де m — маса заряду

c_1 — пружинна жорсткість

Δy_1 — значення деформації пружини

$y_1 - y_2$ - пружинний штрих

β — тертя коеф.

S — поршнева площа

$V_{шк}$ - шкідливий обсяг

p - тиск

$p \dot{}$ – зміна тиску

R універсальний газовий стіл

k – індекс адіабати

T_m це температура трубопроводу

G_m - вартісна характеристика

T_a - атмосферний тиск

Друга система – система диференційних рівнянь, які описують роботу пристрою в процесі взяття деталі.

$$\begin{cases} m\ddot{y} + c_1\Delta y_1 + \beta\dot{y} = pS + mg \\ V_{шк}\dot{p} + pS\dot{y} = RkT_m G_m \\ \dot{T}pSy - \frac{T}{p}\dot{p} + \frac{ST}{(V_{шк} + Sy)}\dot{y} = RG_m T^2 \end{cases}$$

Третя система – система диференціальних рівнянь, які описують роботу пристрою при зворотньому ході с захваченою деталлю.

$$\begin{cases} m\ddot{y} + c_1\Delta y_1 + c_2\Delta y_2 + \beta\dot{y} = pS + mg, \\ V_{шк}\dot{p} + pS\dot{y} = RkT_m G_m \\ V_{шк}\dot{p}_2 + RkT_a G_m = RkT_1 G_{1m}, \\ \dot{T}pSy - \frac{T}{p}\dot{p} + \frac{ST}{(V_{шк} + Sy)}\dot{y} = RG_m T^2 \end{cases}$$

Четверта система – система диференційних рівнянь, які описують рух захвата с захваченою деталлю до дотику робочої поверхні.

$$\begin{cases} m\ddot{y} + (c_1 + c_2)\Delta y_1 + \beta\dot{y} = pS + mg, \\ V_{шк}\dot{p} + pS\dot{y} = Rk(T_m - T_a)G_m \\ \dot{T}pSy - \frac{T}{p}\dot{p} + \frac{ST}{(V_{шк} + Sy)}\dot{y} = RG_{2m} T^2 \end{cases}$$

Використані формули були взяті з книги [11].

2.2.Струменеві захоплюючі пристрої

Завдання проектування струменевих захоплювачів залежить від конкретних умов, пов'язаних із технологічними процесами, обладнанням і відштовхується від технологічних завдань, які визначають вихідні вимоги до розроблюваного пристрою завантаження-розвантаження. Вона здійснюється також на основі технічно-економічного дослідження не лише самих пристроїв завантаження, але й аналізу, технологічного змісту й особливостей автоматизованих виробничих процесів.

При створенні автоматичних пристроїв завантаження зі струменевими захоплювачами використовують функціональні ознаки струменя, характерні особливості форми і напрямку струменевих елементів, які формують потік повітря, а також спосіб захоплення й орієнтації заготовок, ступінь автоматизації або механізації технологічного процесу і ряд інших факторів.

Раціональні конструкції струменевих захоплювачів, які забезпечують максимальну присмоктуючу силу із виключенням можливості відриву заготовки від і торця захоплювача, повинні створюватися на основі вивчення показників точності розмірів, геометричної форми і взаємного розміщення основних поверхонь захоплюваних заготовок. Вимогою до раціональної конструкції захоплювачів потрібно вважати наявність явно вираженої базової прямолінійної плоскої або циліндричної поверхні захоплення, яка б не мала виступів, буртиків, перешкоджаючих протіканню потоку

повітря. Захоплювання деталей у великому діапазоні розмірів робить економічним і доцільним використання їх в умовах будь-якого виробництва, де однією з вимог забезпечення працездатності конструкцій струменевих захоплювачів є встановлення теоретично обумовленого співвідношення сил утримання заготовки захоплювачем і сил протидії цьому явищу. Послідовність виведення розрахункових рівнянь силових і конструктивних захоплювачів розглядають з урахуванням газодинамічного аналізу протікання газових потоків. В якості вихідних рівнянь, що принципово вирішують задачу визначення параметрів цих потоків (швидкість протікання, тиск, густина та ін.) у будь-який момент часу, достатньо використовувати систему відомих рівнянь газової динаміки

$$\begin{cases} dP = -pVdv, \\ OVp = const, \\ P\varrho^n = const. \end{cases} \quad (1.4)$$

де O - площа січення витікаючого потоку повітря, V - швидкість протікання потоку; P - тиск; v - питомий об'єм; p - густина газу; n - показник адіабати.

2.3. Струменеві захоплювачі з вертикальним і горизонтальним напрямками газових потоків.

Розрахункова схема струменевого захоплювача з перпендикулярним напрямком витікаючого з його отвору-сопла струменя стисненого повітря щодо поверхні заготовки зображена на рис. 2.5. Аналогічно до методики розрахунку роботи [3] діючу на заготовку силу визначають з рівняння:

$$F = F_{np} - R_{cmp}, \quad (1.5)$$

де F_{np} – сила, що виникає в результаті статичного тиску в зазорі h_{il} ;

$$R_{cmp} = R_{\dot{n} \dot{o} \dot{\delta}} = \frac{Q_m^2}{\pi r_c \rho}.$$

реактивна сила струменя, яку визначають за формулою:

$$R_{\dot{n} \dot{o} \dot{\delta}} = \frac{Q_m^2}{\pi r_c \rho}. \quad (1.6)$$

У результаті досліджень встановлено якісне покращення силових характеристик розглянутого захоплювача при виконання на його торці буртика радіусом r_1 висотою Δh перевищуючої товщину повітряної подушки, яка дорівнює порядку 0,06 – 0,09, що уможливило його застосування як захоплювача маніпулятора.

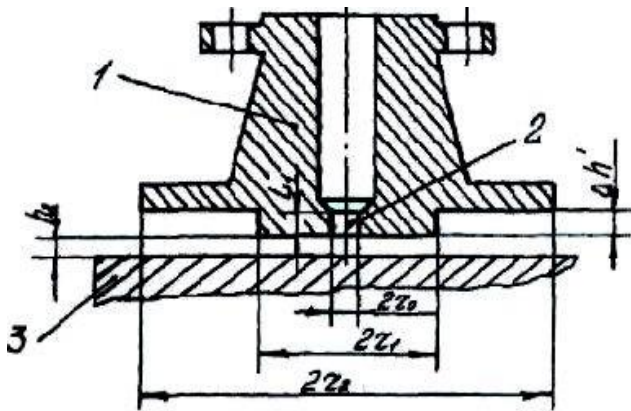


Рис. 2.5. Захоплювач з вертикальним напрямком струменя
Захоплювач містить корпус 1 з отвором-соплом 2, вісь якого перпендикулярна площині заготовки 3. Аналіз теоретичних і експериментальних досліджень свідчить, що струменевий захоплювач з вертикальним напрямком струменя можна використовувати при завантаженні деталей масою до 3,5Н. Збільшення вантажопідйомності можна домогтися шляхом застосування кількох захоплювачів чи одночасно виконанням на торці захоплювання кількох отворів, як зображено на рис. 2.5.

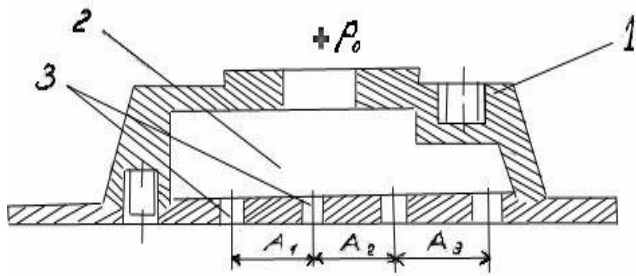


Рис. 2.6. Струменева захоплювача платформа

Вплив параметрів двох сусідніх струменів один на одного може бути значним, якщо не скористатися рекомендацією [3] і установити міжцентрову відстань $A_1 = A_2 = A_3 = (15 + 20 \text{ мм})$.

Розрахункова схема струменевого захоплювача, зі струменем повітря паралельним площині заготовки, зображена на рис. 2.7. У цьому випадку реактивна сила струменя $R_{стр}$ дорівнює нулю, а на зусилля захоплювання впливає тільки реактивна сила повітряної подушки R_n кільцевого суцільного потоку в зазорі Δh . Захоплювач містить корпус, на торці якого виконаний буртик радіусом r_{01} і висотою $\Delta h'$, а на поверхні буртика виконані з'єднані з джерелом стисненого повітря радіальні отвори-сопла 4 з осями, паралельними площинам торця корпусу і заготовки.

Максимальну кількість отворів-сопел і їх діаметр залежать від силових, витратних і конструктивних параметрів захоплювача, а висота буртика $\Delta h'$ вибирається експериментально залежно від діаметра сопла в кожному конкретному випадку.

Діаметр буртика $2r_{01}$, як свідчать експерименти, повинен дорівнювати $2r_{01} = 20 \div 30$ мм при загальному діаметрі захоплювача $2r_2 = 80 - 100$ мм, тобто ефективність захоплювача залежить від оптимального співвідношення між діаметрами, що знаходиться в межах $3 \div 4$.

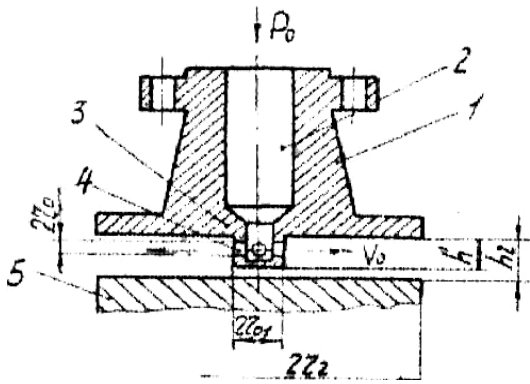


Рис. 2.7. Струменевий захоплювач сили

з паралельними торцю заготовки струменевими потоками

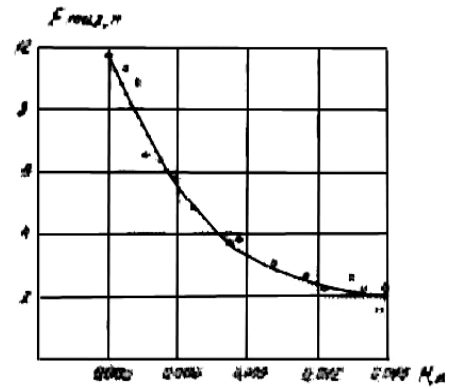


Рис. 2.8. Закон зміни сили

присмоктування захоплювача

Дослідження довели, що максимальна відстань h'_{max} , з якої заготовка піддається присмоктувальній дії, не перевищує величини $H_{max} < 25 \text{ мм}$. Зі збільшенням маси заготовки G_3 відстань H_{max} зменшується до значення $H_{max} > h'$, тобто до висоти буртика, у якому виконані отвори-сопла. Крива зміни вантажопідйомності від H зображена на рис. 2.8.

Притягнута до торця захоплювача заготовка займає неорієнтоване положення, якщо величина повітряної подушки h перевищує висоту буртика

$\Delta h'$. У цьому випадку заготовка плаває на повітряній подушці і її орієнтацію варто робити простим способом по краях захоплювача. Якщо ж $h < \Delta h'$ заготовка силами тертя об торець буртика утримується від повороту і переноситься захоплювачем в попередньо орієнтованому положенні.

Залежно від конфігурації об'єктів маніпулювання, співвідношення основних їх розмірів і розмірних чи силових характеристик елементів, можна виділити основні напрямки створення присмоктуючої дії:

- за рахунок зниження тиску в результаті течії плоского радіального потоку паралельно площині захоплюваного об'єкта;
- за рахунок зниження тиску при обтіканні кільцевим струменем зовнішньої чи внутрішньої циліндричної поверхні;
- за рахунок появи розрідження на поверхні маніпульованих об'єктів унаслідок ежекції, впровадження магнітних елементів та ін.

Виходячи з цього, розглянемо порядок розрахунку силової характеристики. Умова рівноваги притягнутої до торця захоплювача заготовки під дією сили F_{np} , в яку входять сила F_1 від швидкісного напору повітряного струменя на ділянці течії від r_{01} до r_1 зі швидкістю, що дорівнює місцевій швидкості звуку, сила F_2 від напору потоку в інтервалі радіусів r_1 і периферії r_2 , а також реактивна сила R_n повітряної подушки, має вигляд

$$F_{np} = F_1 + F_2 - R_n \gg G_{заг} \quad (2.7)$$

Силу присмоктування F_1 за умови витікання струменя з одного отвору - сопла в проміжку h_{12} на ділянці від r_{01} до r_1 можна визначити за формулою

$$F_1 = \int_0^\varphi \int_{R_{01}}^{R_1} \frac{V_{\text{зв}}^2 \rho}{2} \varphi_r d_r.$$

Після інтегрування і з огляду на те, що маса газу в розглянутих секторах обмежених радіусом r_{01} і r_1 кутом сформованого струменя, що дорівнює

$$\rho = \rho_a \left(\frac{P_0}{P_a} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{r_{01}}{r},$$

$\varphi = \pi/6$ складає

$$F_1 = \frac{\pi}{12} \rho_a V_{\dot{\epsilon}\delta}^2 \left(\frac{P_0}{P_a} \right)^{\frac{1}{n}} r_{01} (r_1 - r_{01}).$$

отримаємо

Сила присмоктування F_2 при течії потоку повітря на ділянці від r_{01}

до r_1

$$F_2 = \int_0^{\frac{\pi}{6}} \int_{r_{01}}^{r_2} \frac{V_{\dot{\epsilon}\delta}^2 \rho}{2} \varphi_r d_r = \frac{\pi}{12} \rho_a V_r^2 r_1^2 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1},$$

запишемо виразом

де $V = V_2 \cdot (r_1/r_2)$; r - поточне значення радіуса проміжку h_{12} .

Реактивну силу R_n повітряної подушки h запишемо очевидним виразом

$$R_n = \int_0^{\frac{\pi}{6}} \int_{r_{01}}^{r_1} P \cdot r dr.$$

Розглядаючи елементарні обсяги газу в перетинах висотою h_2 , шириною dr на радіусах r_{01} і r_1 і обмежених кутом $\pi/6$ і, виходячи з умови нерозривності потоку

$$P_0 = \left(\frac{\pi}{6} \cdot r_{01} \cdot dr \cdot h_2 \right)^n = P \left(\frac{\pi}{6} \cdot r \cdot dr \cdot h_2 \right)^n,$$

можна записати значення

$$P = P_0 \left(\frac{r_{01}}{r} \right)^n,$$

яке після підстановки у формулу (R_n) дає

$$R_n = \frac{\pi \cdot P_0 \cdot r_{01}}{6(r-n)} (r_1^{2-n} - r_{01}^{2-n}).$$

зможу знайти остаточне значення реактивної сили повітряної подушки:

У випадку малих значень R_n , величиною реактивної сили повітряної подушки можна знехтувати і тоді рівняння (5.3) з урахуванням (5.5) і (5.6) в остаточному підсумку буде мати вигляд

$$F_{r0} = \frac{N \cdot \pi}{12} \cdot \rho_a \left[V_{r0}^2 \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{1}{n}} r_{01} (r_1 - r_{01}) + V_r^2 r_1^2 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \right],$$

де N – кількість отворів-сопел, h_2 – оптимальний повітряний проміжок, при якому досягається найефективніша навантажувальність захоплювача.

На захоплювачі з горизонтальним витіканням ефективність досягається при умові $h_2 = \Delta h$. Розв'язування рівняння (5.09) виконано на ЕОМ при використанні стандартних програм, блок-схема алгоритму обчислень яких зображена на рис. 5.9

У результаті на рис. 5.10 зображена розрахункова графічна залежність сили присмоктування F_{np} від вхідного тиску P_m при різних діаметрах $2r_c$ отворів-сопел, причому суцільними лініями зображено розрахункову, а пунктирною – відповідно експериментальну залежності. У розрахунках прийнято $p_a = 1,225$ кг/м³, $n = 1,4$, $r_{01} = 8,0$ мм, $r_2 = 80$ мм, $N = 4$, $r_{c1} = 0,5$ мм, $r_{c2} = 1,0$ мм, $r_{c3} = 1,5$ мм.

Порівняння залежностей свідчить про можливість застосування теоретичних висновків для інженерного розрахунку даних захоплювачів.

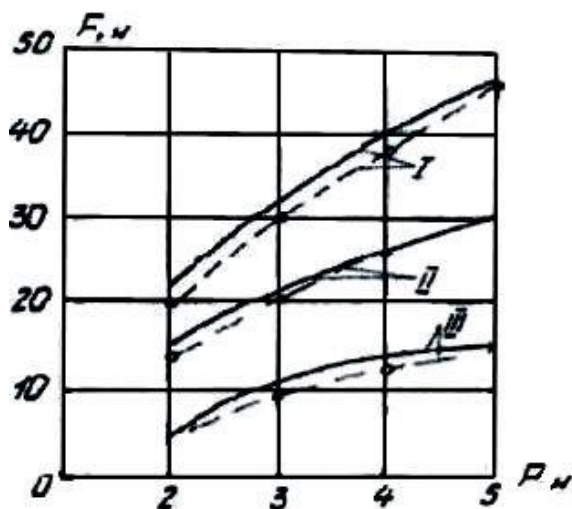


Рис. 2.10. Залежність сили присмоктування від підвідного тиску P_H для захоплювачів з конструктивними параметрами отворів-сопел $2r_c=0,001, 0,002, 0,003$ м, $2r_c=0,16$ м.

Тут пунктирні – експериментальні, а суцільні лінії – розрахункові при $N=4, 2, 2r_{01}=0,016$ м

2.4. Пневматичні та гідравлічні захоплювальні пристрої

Послідовність етапів проектування пневматичного або гідравлічного захоплювача спрощено виглядає наступним чином: спочатку встановлюють потрібне зусилля захоплювання W , потім за його значенням і необхідним діапазоном розкриття захоплювача визначають роботу A , яка повинна виконуватись за один хід поршня; далі, виходячи з вибраного відношення між діаметром і ходом поршня, розраховують необхідне зусилля Q на штоці. Після цього передавальне відношення і механізму передавання вибирають без урахування втрат як відношення $i=Q/W$ і по ньому підбирають параметри механізму передавання.

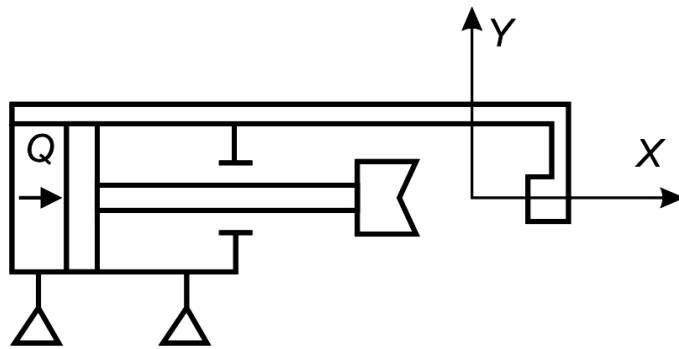


Рис. 2.11. Схема пневматичного (гідравлічного) захоплювача.

В якості ілюстрації розглянемо захоплювач, зображений на рис. 3.11. Зусилля Q пневмоциліндра через шток безпосередньо передається на робочий елемент і визначає зусилля захоплювання W . Якщо знехтувати силами тертя, інерційністю рухомих елементів привода і прирівняти сили W і Q , то можна зробити висновок, що розкриття захоплювача починається при дії сили $F_x = -Q$, отже, найбільше допустиме прискорення a_x захоплювача по осі X буде $a_x = Q/m$, де m - маса деталі. Насправді прискорення a_x діє на всі рухомі елементи захоплювача і рівняння рівноваги можна записати у вигляді

$$Q = (m + m_c + m_n)a_x, \quad (3.11)$$

де m_c - сумарна маса рухомого робочого елемента і штока

двигуна;

m_n - маса поршня.

При цьому на рухомий робочий елемент діє зусилля захоплювання:

$$\hat{W} = Q - (m_c + m_n)a_x \text{ і розкриття захоплювача почнеться при } F_x = -$$

Граничне значення прискорення

$$\hat{a} = \frac{Q}{m \left(1 + \frac{m_c + m_n}{m} \right)}$$

Таким чином, для проаналізованого ефекту основним параметром є відношення $(m_c + m_n/m)$. Якщо відсутні обмеження на зусилля захоплювання, то параметри двигуна захоплювача потрібно вибирати з великим запасом, щоб для максимальних значень прискорень забезпечити необхідний запас несучої здатності захоплювача.

2.5. Магнітні захоплювальні пристрої

У магнітних захоплювальних пристроях, які використовують для захоплювання виробів будь-якої конфігурації із різних матеріалів, застосовують електромагніти та постійні магніти. У порівнянні з вакуумними вони простіші за конструкцією, володіють тривалішим терміном служби, швидкістю захоплювання виробів і силою притягання на одиницю площі, але можливість їх використання для виробів тільки із магнітних матеріалів обмежує галузь їх застосування. До інших недоліків відносять залишковий магнетизм і захоплювання сторонніх частинок (стружка та ін.), здатних пошкодити поверхню захоплюваного виробу.

На рис. 2.12 зображено магнітний захоплювач із феромагнітним екраном. У позиції завантаження магніт 1 захоплює заготовку 2 із гнізда 3 і переміщує його в позицію розвантаження. Тут у простір між магнітом 1 і приймачем 4, виконаним із немагнітного матеріалу, вводиться феромагнітний екран 5, шунтуючий магнітне поле. Завдяки цьому заготовка під дією сил тяжіння падає на штир 6.

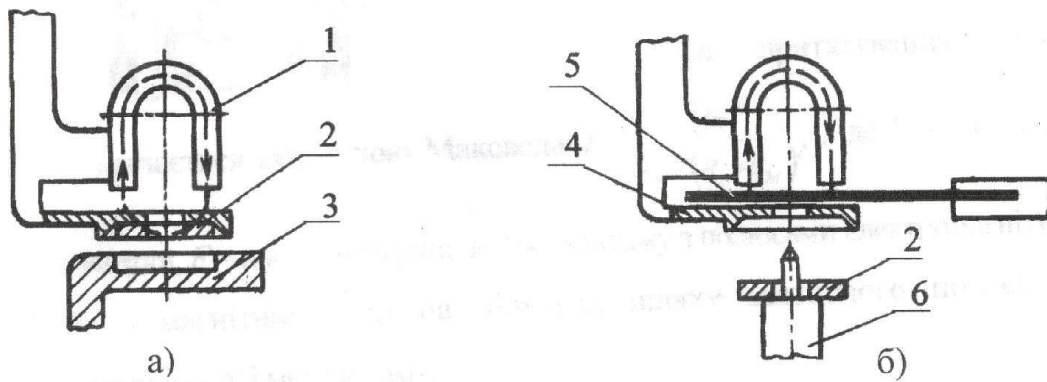


Рис. 2.12. Магнітний захоплювач із феромагнітним екраном: а) позиція завантаження; б) позиція розвантаження

Магнітні ЗУП здійснюють безконтактне орієнтування захоплених феромагнітних об'єктів шляхом впливу на них стаціонарним чи змінним магнітним полем, у тому числі конструкцією маніпулятора ПР, за рахунок вилучення з його конструкції привода і механізму повороту кисті руки.

Прикладом магнітного ЗУП може служити конструкція захоплювача, зображена на рис. 2.13 та призначена для плоских об'єктів складної конфігурації. При сполученні захоплювача з довільно розташованим на площині об'єктом 3 останній орієнтується в міжполюсному просторі магніта з феромагнітними елементами вздовж поля. Одночасно за рахунок градієнта поля у вертикальній площині об'єкт притягається до магнітного захоплювача і, потрапляючи отворами на штифтовані вловлювачі 4, фіксується від випадкового повороту.

Для надійного влучення вловлювачів в отвір використовується явище автопошуку, у процесі якого захоплювач робить невеликі кутові коливання

навколо вертикальної осі. Коливальні рухи викликаються додатковими мініатюрними магнітами 2, розміщеними в захоплювачі, які живляться пульсуючим струмом.

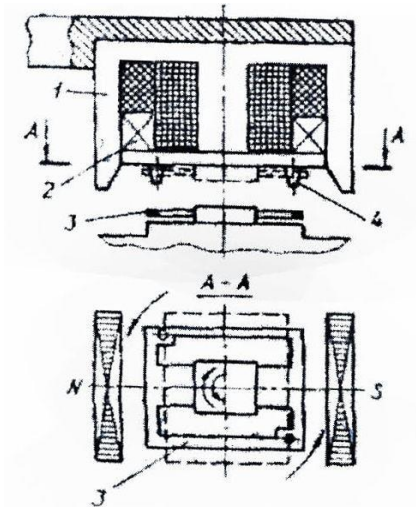


Рис. 2.13. Гравітаційний (магнітний) захоплювальний пристрій

Силу притягування електромагніта визначають за формулою
Максвела

$$P_y = \frac{(In)^2}{26F(R + R_M)^2}, \text{ де } In - \text{число ампер-витків обмотки; } F - \text{площа}$$

поверхні дотику вантажу з полюсами електромагніта R_B ; R_M - магнітний опір на ділянку шляху магнітного потоку відповідно повітряному і металевому.

Наявність домішок (марганцю, сірки, фосфору, нікелю і т.п.) в матеріалі об'єкта маніпулювання знижує піднімальну силу електромагніта.

2.5. Захоплювальні пристрої з еластичними елементами

Найбільшою універсальністю володіють еластичноохоплюючі (рис. 2.14 а) захоплювачі, що дозволяють захоплювати тіла довільної форми і жорсткості. Такі захоплювачі забезпечують необхідну піддатливість та пристосовуваність до форми об'єкта, рівномірний розподіл зусилля затиску по його поверхні.

Еластичноохоплюючий захоплювач містить корпус, сиффон, канали підведення робочого середовища, корпус та камеру із силорозподільним нагнітачем середовища, котре подається в камеру після того, як об'єкт вводиться у зону корпусу.

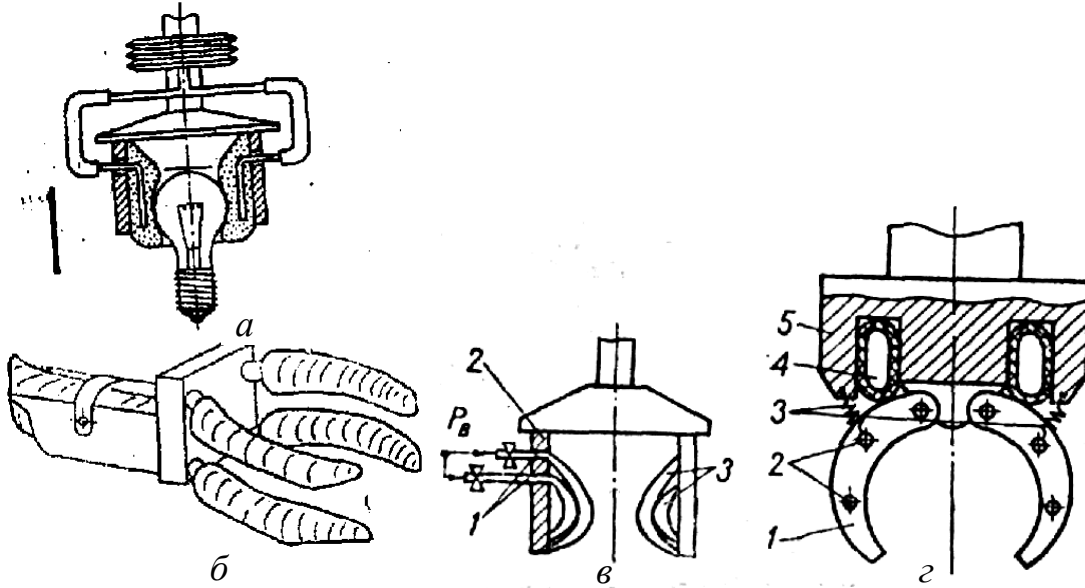


Рис. 2.14. Захоплювачі з балонними (а) і камерними (б) виконавчими елементами

Розширеними функціональними можливостями володіють пальцеві захоплювачі (мал. 2.14 б). Одна з модифікацій таких захоплювачів містить корпус, канал підведення робочого середовища та еластичні пальці. Особливістю згаданого захоплювача є охоплення об'єкта пальцями по усьому периметру, за аналогією рухів людини, коли вона захоплює об'єкти довільної форми, рівномірно розподіляючи зусилля по поверхні об'єкта. Внутрішня поверхня пальців захоплювача виготовлена з матеріалу, котрий володіє більшою, ніж у зовнішньої поверхні пальців, пружністю. Тому при подаванні під тиском робочого середовища по каналу, пальці захоплювача деформуються всередину за рахунок нерівномірного розтягування внутрішньої і зовнішньої

поверхонь. Деформація є тим більшою, чим більший тиск робочого середовища та різниця пружності матеріалів зовнішньої і внутрішньої поверхонь пальців.

Використання в якості робочих чи виконавчих пристроїв камерних елементів дозволяє створювати прості за конструктивним виконанням і надійністю захоплювачі. На рис. 2.14 *в, г* зображені два компоновання захоплювачів, у яких використовується стиснене повітря для захоплювання і утримання об'єктів, що мають різні форму і розміри [2, 5, 7].

При захоплюванні об'єктів (мал. 2.14 *в*) стиснене повітря по шлангах 1 через отвори в корпусі 2 подається в кожен балон-губку 3 одночасно. Якщо деталі дуже дрібні, стиснене повітря подається одночасно в обидва балони-губки 3. При захоплюванні об'єктів з великими розмірами повітря подається тільки у верхні балони. Зміною тиску стисненого повітря, що надходить у балони-губки 3, досягається регулювання зусилля утримання об'єкта. Тому захоплювачі можуть утримувати об'єкти, що мають не тільки різні розміри, але й вагу. Для відпускання об'єкта повітря випускається з балонів 3.

У захоплювачі, зображеному на рис. 2.14 *г*, пальці 1 повертаються на осях, укріплених у основі 5 [2, 5, 7]. У цій же основі змонтована в кільцевому жолобі камера 4, котра приводить у рух пальці.

2.6. Вибір схеми та методика розрахунку параметрів ЗП

Основними групами вимог, що визначають вибір захоплювача, є

умови експлуатації та геометричні характеристики робототехнічного комплексу (РТК), характеристики об'єкта і промислового робота. Розглянемо кожен з цих груп.

1. Умови експлуатації та характеристики зовнішнього середовища.

1.1. Умови експлуатації визначають варіант виконання (нормальне, пилозахищене, вибухозахищене та ін.) захоплювача і представляють у вигляді гранично допустимих параметрів зовнішнього середовища, при яких повинні забезпечуватися значення показників захоплювача, зазначені в технічному завданні на проектування.

1.2. Габаритні розміри зони захоплювання, спосіб базування об'єкта і параметр положення на позиції захоплювання.

1.3. Габаритні розміри зони відпускання, спосіб базування і параметри положення об'єкта на позиції відпускання.

2. Характеристика об'єкта.

2.1. Форма і геометричні параметри об'єкта.

2.2. Маса та інерційні характеристики об'єкта.

2.3. Характеристики міцності об'єкта.

3. Характеристики промислового робота.

3.1. Швидкості й прискорення за ступенями рухомості ПР.

3.2. Абсолютна похибка позиціонування ПР.

Вибір схеми і параметрів захоплювача проводять згідно з наступними етапами прийняття рішень [7, 17, 21, 32].

1. Визначення поверхонь об'єкта, по яких допустиме захоплювання, проводять з урахуванням показників зовнішнього середовища та

характеристик об'єкта. Для захоплювання не можна використовувати ділянки поверхонь, за якими базується об'єкт при захоплюванні та відпусканні.

2. Вибір поверхонь об'єкта, по яких проводиться захоплювання, і схеми базування об'єкта в захоплювачі здійснюється згідно з масою та інерційними характеристиками об'єкта. При виборі схем базування не допускають великих зміщень центру маси об'єкта відносно центру захоплювача.
3. Вибір кількості, форми і кінематики переміщення робочих елементів захоплювача з урахуванням габаритних розмірів зони захоплювання та об'єкта здійснюється в результаті узгодження вимог до базування об'єкта при захоплюванні та відпусканні, форми поверхні об'єкта, по яких проходить захоплювання.
4. Розрахунок робочих елементів захоплювача із врахуванням показників діапазону їх розкриття повинен здійснюватись так, щоб забезпечити захоплювання об'єктів у всьому діапазоні зміни параметрів розмірів об'єкта, а також враховувати проходження об'єкта з максимально характерним розміром між робочими поверхнями елементів при заході захоплювача на позицію захоплювання в заданому напрямку.
5. Вибір компоновки захоплювача проводять з урахуванням умов експлуатації, характеристик об'єктів та ПР.
6. Розрахунок параметрів пневмоциліндра привода ЗП можна здійснювати за основною або спрощеною методиками. Розрахунок за спрощеною методикою можна застосовувати для наближених розрахунків на початковій стадії проектування або замість основної методики у

випадках, коли відсутні жорсткі обмеження на вагові та габаритні характеристики проектованого захоплювача, а також обмежень на зусилля захоплювання для легкоушкоджуваних об'єктів.

За спрощеною методикою, з урахуванням вимог вагових і габаритних характеристик об'єктів, розраховують необхідне значення зусилля захоплювання W_n для корисної вантажопідйомності m за формулою

$$W_n = kCmg, \quad (2.12)$$

де C - безрозмірний коефіцієнт, що дорівнює 10 - для електромеханічних ЗП і 25 - для пневматичних; коефіцієнт запасу k вибирають в інтервалі від 1 до 2,5. Значення $k > 2$ вибирають при утримуванні об'єктів із сильно зміщеним центром мас у випадку, коли коефіцієнт тертя $f \leq 0,1$. Площа перерізу S_u і хід пневмоциліндра L вибирають з умови

$$PS_uL \geq nW(h_2 - h_1),$$

де h_2 , h_1 - параметри відповідно максимального та мінімального розкриття захоплювача; n - кількість рухомих робочих елементів; P - тиск повітря.

Основна методика розрахунку параметрів пневмопривода включає етапи:

- Розрахунок інерційних характеристик об'єкта за формою та вагою об'єктів.
- Розрахунок прикладених сил F і моментів M , що діють на об'єкт у захоплювачі.
- Визначення для кожного із захоплюваних об'єктів (далі позначені індексом j) гранично допустимих значень прикладених сил f_{xj} , f_{yj} , f_{zj} та моментів μ_{xj} , μ_{yj} , μ_{zj} при одиничному зусиллі захоплювання ($W=1$).
- Розрахунок необхідного зусилля захоплювання, що забезпечує утримання

j -го об'єкта,

$$W_H = \max \left\{ \frac{\hat{F}_x}{f_{yj}}, \frac{\hat{F}_y}{f_{zj}}, \frac{\hat{F}_z}{f_{xj}}, \frac{\hat{M}_x}{\mu_{yj}}, \frac{\hat{M}_y}{\mu_{zj}}, \frac{\hat{M}_z}{\mu_{xj}} \right\}$$

де $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ - максимальні значення прикладених сил і моментів, діючих вздовж осей системи координат захоплювача.

- Для об'єктів, що утримуються при значенні параметрів розкриття h_j , в осях $W-h$ будують точки, що відповідають розрахунковим значенням W_{hj} , після цього за отриманими точками будують огинаючу $W(h)$.
- Вибір параметрів пневмоциліндра здійснюється із умови [11]
-

$$PS_{\delta}L \geq n \int_{h_1} W(h) dh. \quad (2.13)$$

- Умову (2.13) можуть задовольняти різноманітні поєднання параметрів F і L . Значення їх добутку можуть бути близькі для довгоходових циліндрів малої площі січення, короткоходових циліндрів великого січення та мембранних приводів.

7. Електродвигун захоплювача вибирають, виходячи з вагових і габаритних обмежень та необхідної потужності. Потрібне зусилля захоплювання забезпечує редуктор. Розрахунок на швидкодію проводиться як перевіряльний.

8. Схема і параметри механізму передавання захоплювача вибирають з умов забезпечення потрібної кінематики переміщення

робочих елементів і формування потрібної залежності зусилля захоплювання W від h параметра розкриття захоплювача.

9. Для вибраних параметрів захоплювача перевіряють належність прикладених сил і моментів, що діють на об'єкт при функціонуванні ПР, області жорсткого фіксування. При великих запасах за утримуючою здатністю захоплювача його параметри можуть бути відкоректованими з метою зменшення вагових і габаритних характеристик. Якщо умова утримання порушується, то можуть бути збільшені площа січення і хід пневмоциліндра, передавальне відношення редуктора і механізму передавання, змінена форма робочих елементів, встановлені накладки.

Висновок до розділу 2

Проведене дослідження показало, що вибір типу захватного пристрою залежить від характеру об'єктів, які необхідно маніпулювати, і умов експлуатації. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на підвищення енергоефективності, універсальності та надійності захватних механізмів із використанням сучасних матеріалів і технологій.

Розділ 3. Методика розробки оптимізованої конструкції системи захвату з ежектором

У попередньому розділі були розглянуті математичні моделі модуля комплектування, які включають п'ять систем диференціальних рівнянь, що описують динаміку руху пристрою вперед і назад. Хоча ці моделі, засновані на теорії пружності, забезпечують високий рівень точності, вони значно ускладнюють технічні розрахунки. У цій главі акцент зроблено на спрощені методи розрахунку, які дозволяють визначити ключові параметри затискних пристроїв на основі законів загальної механіки.

Конструкція вакуумних захватних пристроїв повинна відповідати формі поверхні об'єкта, який захоплюється. За класифікацією форм робочих елементів вакуумні захвати належать до факсимільного класу, оскільки їхні краї повторюють контури захопленого предмета. Найкраще вакуумні захвати підходять для роботи з плоскими предметами, і саме цей випадок розглядається першочергово.

Способи створення розрідження (вакууму):

Активні вакуумні захвати — підключаються до вакуумного насоса або ежектора через пневматичне реле. У цьому випадку створення вакууму відбувається за рахунок роботи зовнішнього обладнання, що забезпечує надійність і стабільність захоплення.

Пасивні вакуумні захвати — працюють шляхом механічного притискання присоски до поверхні предмета. Сила притискання деформує корпус захвату, зменшуючи об'єм порожнини. Надлишок повітря виходить через щілини або клапан, а при відновленні часткової форми об'єм порожнини збільшується, створюючи розрідження.

- Розрідження у пасивних вакуумних захватах визначається залежно

від деформації корпусу захвату, і його значення можна описати виразом:

$$F_0 = \Delta p S$$

Де S — площа захвату, а Δp — різниця атмосферного та порожнинного тиску. За звичай шматок S поверхні плоскої частини лежить під присоскою.

Враховуючи це, виникають наступні умови утримання предмета пристроєм його вертикальному підйомі та горизонтальному переміщенні:

$$\Delta p S > \rho t S_0 (g + w_z); \Delta p S > \rho f t S_0 w_x$$

Використання активних і пасивних вакуумних захватів має свої переваги й обмеження. Активні системи забезпечують стабільний рівень вакууму, проте вимагають наявності зовнішнього джерела енергії. Пасивні захвати простіші в конструкції та не потребують додаткового обладнання, однак їхня ефективність залежить від форми об'єкта і якості контакту.

Висновок до розділу 3

Застосування спрощених методів розрахунку дозволяє адаптувати конструкцію захватів до різних типів предметів, забезпечуючи їх надійне утримання і підвищуючи ефективність роботи автоматизованих систем.

Розділ 4. Експериментальне дослідження мехатронної системи

Мета: Дослідити залежність рівня вакууму від вхідного тиску у вакуумному ежекторі та його вплив на здатність утримувати вантаж.

4.1. Опис експериментальної установки

Основні компоненти установки:

- Вакуумний ежектор. Основний пристрій для створення вакууму, що використовує ефект Вентурі для всмоктування повітря та утримання вантажу за допомогою вакуумного присмоктування.
- Джерело стисненого повітря. Компресор, що забезпечує стабільний вхідний тиск із можливістю регулювання (діапазон, наприклад, від 0,1 до 0,6 бар).
- Вакуумна присоска (вакуумний захват). Пристрій для утримання вантажу, що підключається до вакуумного ежектора. Присоска повинна мати достатній розмір і еластичність для надійного контакту з поверхнею упаковки.

Вантаж (упаковка з продуктом):

- Тестовий вантаж із фіксованими параметрами
- Матеріал поверхні: гладкий картон, пластик або інший пакувальний матеріал.
- Манометр для вимірювання вхідного тиску: Встановлюється на вході до ежектора для точного контролю тиску (вимірюється у бар або

кПа).

- Вакуумметр для вимірювання рівня вакууму. Встановлюється на виході з ежектора для реєстрації рівня створеного вакууму (вимірюється у мм рт. ст. або кПа).
- Система фіксації вантажу: Платформа або підставка, на якій розташовується упаковка з продуктом перед підйомом.
- Тензодатчик або ваговий сенсор: Для реєстрації сили утримання або визначення моменту, коли вантаж починає відриватися від присоски.

4.2. Проведення досліду

Процес підготовки до експерименту починається з монтажу обладнання: вакуумний ежектор підключається до компресора через регульований клапан для контролю вхідного тиску, встановлюються датчики для фіксації витрати повітря, тиску та рівня вакууму. Система має бути герметично закритою, щоб виключити зовнішній вплив та забезпечити точність вимірювань. Для імітації реальних умов в камеру можна додати джерело тепла, що дозволяє моделювати вплив температурних змін на роботу ежектора.

Експеримент виконується за кілька етапів. На початку задаються вхідні параметри: тиск стисненого повітря, витрата повітря, температура середовища та об'єм вакуумованої камери. Далі компресор подає повітря до вакуумного ежектора, і починається процес створення вакууму. Паралельно проводяться вимірювання часу досягнення необхідного рівня вакууму, стабільності тиску та температури. Дані

фіксуються за допомогою відповідних вимірювальних приладів і вносяться до таблиць для подальшого аналізу. Цей процес повторюється з різними параметрами вхідного тиску, витрати повітря та температури для отримання комплексної картини роботи ежектора.

Аналіз даних включає обробку отриманих результатів та побудову залежностей рівня вакууму від вхідного тиску, часу досягнення вакууму від об'єму камери та температури. Графіки дозволяють визначити оптимальні умови роботи вакуумного ежектора, зокрема тиск стисненого повітря, який забезпечує максимальну ефективність створення вакууму при мінімальних витратах енергії. Окремо аналізуються тепловтрати та вплив температури на стабільність вакууму.

Порядок проведення дослідів:

Для кожного значення вхідного тиску:

1. Увімкнути ежектор і створити вакуум.
2. Зафіксувати рівень вакууму за допомогою вакуумметра.
3. Під'єднати вакуумну присоску до упаковки.
4. Поступово піднімати вантаж (упаковку з продуктом) на невелику висоту.
5. Перевірити, чи утримується вантаж присоскою при заданому тиску.
6. Виміряти максимальну масу вантажу, яку може утримати

присоска при кожному значенні вхідного тиску.

Фіксація результатів:

Для кожного тиску записати:

- Рівень вакууму (кПа),
- Чи утримується вантаж (так/ні),
- Максимальна маса вантажу, що утримується (г/кг).

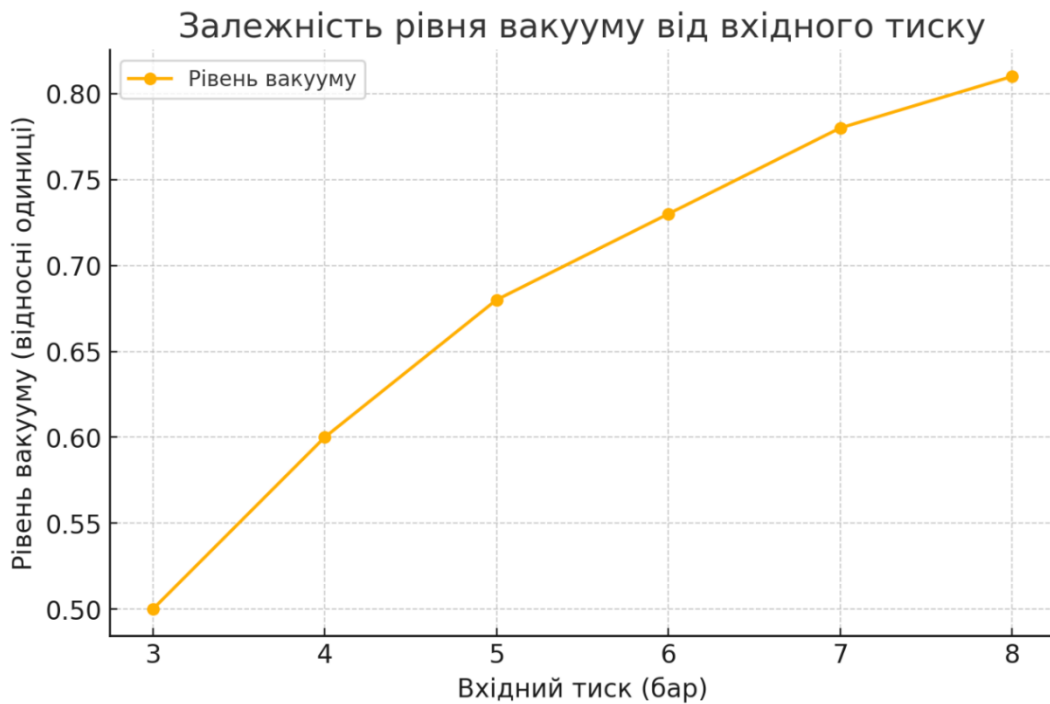
Для підвищення надійності утримання вантажу необхідно забезпечити щільний контакт вакуумної присоски з поверхнею упаковки.

Поверхня упаковки має бути чистою та рівною, щоб уникнути втрат вакууму через витоки повітря.

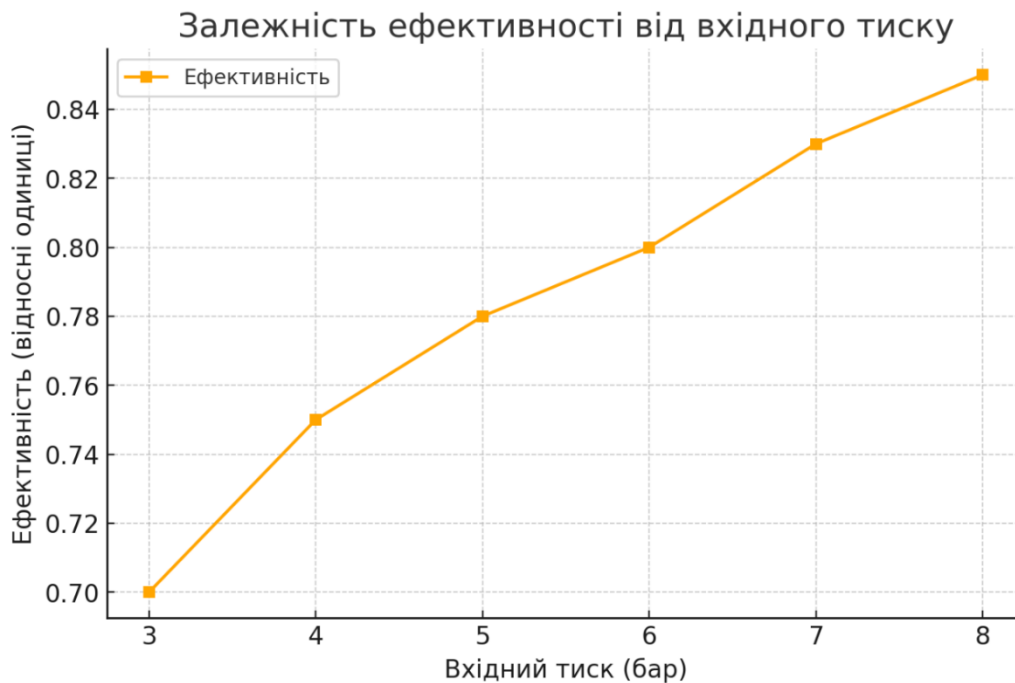
За необхідності можна використовувати вакуумні присоски різних розмірів і матеріалів для тестування їх ефективності

Результати дослідження дозволяють визначити ключові показники роботи вакуумного ежектора, включаючи максимальний рівень вакууму, час стабілізації системи, втрати енергії та теплову стабільність. Крім того, на основі отриманих даних можна надати рекомендації щодо оптимальних умов експлуатації вакуумного ежектора та можливих конструктивних змін для підвищення його продуктивності. У результаті експерименту формується детальний звіт з усіма розрахунками, графіками та висновками, що можуть бути використані для вдосконалення технологічних процесів із застосуванням вакуумних систем.

Залежність рівня вакууму від вхідного тиску – показує, як зі збільшенням вхідного тиску рівень вакууму зростає.



Залежність ефективності роботи вакуумного ежектора від вхідного тиску – демонструє, що ефективність зростає зі збільшенням тиску.



Побудова графіків залежності рівня вакууму, часу стабілізації від тиску та витрати повітря.

Аналіз втрат тиску та теплопередачі.

Для реального прикладу з наведеними параметрами були проведені наступні розрахунки:

1. Ефективність вакуумного ежектора (η):

$$\eta = \frac{P_{\text{атм}} - P_{\text{вак}}}{P_{\text{атм}}} = 0.803 \text{ (80.3\%)}$$

2. Масова витрата (\dot{m}):

$$\dot{m} = \rho Av = 1.225 \cdot 0.005 \cdot 50 = 0.306 \text{ кг/с}$$

3. Час досягнення вакууму (t):

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{0.1}{0.02} = 5 \text{ с}$$

Висновок до розділу 4

Результати експерименту є важливим етапом у визначенні практичної ефективності вакуумного ежектора та можуть бути використані для впровадження у виробничі системи або вдосконалення технологічного процесу із застосуванням вакуумних технологій.

Розділ 5. Охорона праці

5.1. Регламент технічного обслуговування

Якість роботи пневмоприводів значною мірою залежить від чистоти стисненого повітря, що визначається станом системи повітропідготовки, внутрішніх поверхонь труб та інших компонентів системи. Для забезпечення надійності пневматичних пристроїв важливо запобігти потраплянню забруднень до споживачів, що досягається регулярним технічним обслуговуванням. Це включає видалення конденсату, очищення обладнання та перевірку стану фільтруючих елементів.

У системах із ручним керуванням очищення стисненого повітря потребує особливої уваги, якщо ємність для збирання конденсату непрозора (відсутній візуальний контроль). У таких випадках необхідно регулярно зливати конденсат за встановленим графіком або на основі експериментальних даних. При використанні автоматичних систем зливу важливо організувати процес так, щоб уникнути забруднення навколишнього середовища.

У разі несправності конденсатовідвідника його потрібно розібрати, ретельно очистити робочі канали й дренажні отвори, промити, висушити та повернути на місце всі фільтруючі елементи. Для очищення бака рекомендується застосовувати теплу воду з милом, що ефективно видаляє залишки забруднень.

Під час експлуатації фільтрів їхні пори поступово забиваються частинками забруднень, що збільшує опір потоку стисненого повітря.

Коли перепад тиску на фільтрі досягає 0,1 МПа, це сигналізує про необхідність заміни фільтруючого елемента або його очищення для відновлення пропускної здатності.

Ефективність роботи очищувальних пристроїв залежить від відповідності витрат стисненого повітря діапазону, зазначеному в технічній документації. Недотримання цього параметра може призвести до зниження продуктивності системи або її виходу з ладу. Регулярне обслуговування та контроль системи очищення стисненого повітря є ключовими факторами для забезпечення надійної та безперебійної роботи пневмоприводів.

5.2. Усунення несправностей у роботизованих системах

Однією з ключових умов забезпечення функціональної надійності пневматичних пристроїв є дотримання вимог до змащування поверхонь тертя. Ефективність роботи пневматичних дисків значною мірою залежить від своєчасного використання мастильних матеріалів та контролю за їх якістю.

Стабільність подачі мастила в масляний розпилювач визначається в'язкістю використовуваного масла, яка сильно залежить від температури навколишнього середовища. Якщо температура істотно змінюється в робочому діапазоні пневматичного обладнання або температура стисненого повітря нестабільна, необхідно відрегулювати масляний спринклер або замінити мастило на більш відповідне. Тип мастила, його кількість і кратність застосування визначаються технічною документацією на конкретну модель пневматики.

Обслуговування повітропроводів. Стан трубопроводів системи стисненого повітря перевіряється відкриттям контрольних секцій. У разі необхідності проводиться очищення трубопроводів шляхом продування стисненим повітрям, промивання водою або застосування хімічних засобів. Якість очищення оцінюється візуально або за чистотою повітря та води, що виходить із труб. Наприклад, для перевірки в розетку можна вкласти чистий аркуш картону, і за слідами пилу оцінити результат очищення.

Методи очищення застосовуються насамперед для металевих труб. При обслуговуванні гнучких пластикових труб слід уникати перегинів, які можуть порушити їхню цілісність. Особливо важливо, щоб труби, з'єднані з рухомими частинами машини, не торкалися нерухомих елементів. У разі виявлення пошкоджень еластичний шланг необхідно замінити.

Своєчасне обслуговування систем змащення та трубопроводів є необхідною умовою для забезпечення стабільної роботи пневматичного обладнання, підвищення його надійності та продовження терміну експлуатації.

5.3. Забезпечення стабільної роботи вакуумних систем.

Технічне обслуговування пневматичного обладнання та двигунів полягає в забезпеченні належної підготовки стисненого повітря і регулярному контролі стану системи. Ключовим етапом є перевірка розподільчої системи, включаючи прохідність трубопроводів і відсутність засмічень. Цей контроль здійснюється як ручними

методами, так і за допомогою механічного обладнання. Особливу увагу приділяють стану трубних з'єднань, їх герметичності та якості затягування.

Перевірка герметичності

Герметичність трубних з'єднань і ефективність ущільнювальних елементів перевіряються шляхом огляду, прослуховування або за допомогою спеціальних пристроїв для виявлення течі. У разі виявлення проблем проводиться заміна ущільнень, з'єднань або пошкоджених ділянок трубопроводу. Недотримання герметичності може призвести до збільшення непродуктивних витрат стисненого повітря, що знижує ефективність роботи як окремого обладнання, так і системи в цілому.

Контроль розподільчих елементів і пневматичних двигунів

Для розподільчих елементів важливо перевіряти стан болтів, які забезпечують фіксацію з'єднань, а також відповідність параметрів з'єднань технічним вимогам. У пневматичних двигунах під час обслуговування слід контролювати швидкість руху вихідного органу та прикладене зусилля. Відхилення від нормативних значень може свідчити про зношення деталей або необхідність налаштування системи.

Технічне обслуговування пневматичного обладнання є важливим елементом забезпечення його надійності, безпеки та тривалого терміну експлуатації. Хоча суворих нормативів для обслуговування пневматичних систем не існує, рекомендується дотримуватися чітко визначеного порядку проведення щоденних і періодичних перевірок.

Перевірки включають:

Контроль кількості конденсату у водовіддільнику фільтра або рівня масла в масляному розпилювачі.

Оцінку стану системи або її компонентів, зокрема перевірку функціонування виконавчих механізмів, визначення швидкості їхнього руху за допомогою індикаторів чи інших приладів.

Аналіз загального стану системи, включаючи:

- перевірку рівня шуму витяжного повітря;
- виявлення ударів або інших аномальних звуків, які можуть свідчити про зношення чи несправності.

Регулярний і систематичний підхід до технічного обслуговування пневматичного обладнання дозволяє своєчасно виявляти можливі проблеми, знижує ризик аварійних ситуацій і сприяє безперебійній роботі системи. Це особливо важливо для підприємств, де ефективність виробничих процесів безпосередньо залежить від стабільної роботи пневматичних механізмів

Результати щоденних перевірок фіксуються в протоколі, який містить інформацію про виявлені відхилення та запропоновані заходи для їх усунення. Ці дані передаються відповідним службам і використовуються для планування подальших перевірок, підготовки запасних частин і інших робіт.

Періодичний огляд здійснюється кожні 3, 6 або 12 місяців залежно від типу обладнання, його експлуатаційних характеристик і умов

роботи. Під час планових перевірок виконуються такі завдання:

- Перевірка роботи повітряних двигунів та інших пристроїв.
- Оцінка наявності витоків у системі.
- Перевірка роботи електричних ліній у пневматичних пристроях з електронним керуванням.
- Аналіз ступеня забруднення фільтрів і, за потреби, їх очищення або заміна.
- Перевірка надійності різьбових з'єднань і загального стану кріплень.

На основі результатів щоденних і періодичних перевірок проводиться аналіз першопричин несправностей, а також планування простоїв обладнання для профілактики. Зібрані дані допомагають виявити зношені деталі, визначити терміни заміни компонентів і розробити заходи для підвищення надійності пневматичних систем.

Таким чином, правильно організоване технічне обслуговування пневматичного обладнання забезпечує його ефективну експлуатацію, знижує ризик поломок і сприяє підвищенню загальної продуктивності виробничих процесів.

Висновок до розділу 5

У розділі розглянуто питання забезпечення безпечної та ефективної експлуатації роботизованих систем у виробничому середовищі. Особливу увагу приділено регламенту технічного обслуговування, методам усунення несправностей і заходам для підтримки стабільної роботи вакуумних систем.

Загальні висновки

У дипломному проєкті було розглянуто та проаналізовано комплекс питань, пов'язаних із розробкою, моделюванням, оптимізацією та технічним обслуговуванням мехатронної системи робота-маніпулятора для пакувальної лінії. Основна увага була зосереджена на використанні сучасних технологій, зокрема вакуумних захватів та пневматичних систем, для забезпечення ефективності, надійності та безпеки експлуатації обладнання.

У ході роботи було виконано такі завдання:

- 1. Огляд і аналіз сучасних захватних пристроїв:** Проведено класифікацію вакуумних і магнітних захватів, їх типів, принципів роботи та областей застосування. Зроблено акцент на перевагах вакуумних захватів, які забезпечують високу швидкість, точність і збереження транспортувальних об'єктів.
- 2. Дослідження динамічних процесів:** Проаналізовано взаємодію потоків повітря в системах захвату. Використано ізотермічні моделі для опису поведінки потоків у замкнених системах і проведено оптимізацію параметрів потоку для забезпечення стабільності системи.
- 3. Технічне обслуговування:** Розроблено рекомендації щодо технічного обслуговування пневматичних систем, очищення стисненого повітря, контролю герметичності та змащення пневматичних пристроїв. Визначено порядок щоденних і періодичних перевірок для підвищення надійності та безпеки експлуатації обладнання.

4. Оптимізація процесів: Запропоновано методи автоматизації завантажувально-розвантажувальних процесів, які дозволяють зменшити енергетичні витрати, підвищити продуктивність і точність роботи пакувальної лінії.

Результати дипломної роботи мають практичне значення та можуть бути використані для модернізації виробничих процесів у пакувальній галузі. Розроблена конструкція вакуумного захвату та запропоновані методи оптимізації забезпечують підвищення ефективності роботи мехатронної системи. Рекомендації щодо технічного обслуговування дозволяють знизити витрати на ремонт і збільшити термін експлуатації обладнання.

Таким чином, виконаний дипломний проєкт досяг своєї мети: розроблено ефективну мехатронну систему робота-маніпулятора для пакувальної лінії, що відповідає сучасним вимогам автоматизації, продуктивності та енергоефективності. Отримані результати можуть бути основою для подальших досліджень і вдосконалень у сфері мехатроніки та робототехніки.

Використана література

- 1 Які є різні типи промислових роботів. Режим доступу: <https://www.evsint.com/uk/industrial-robots-types/>
- 2 Білоконь С. М., Дрозд І. В. Робототехнічні системи: сучасний стан та перспективи розвитку. Київ: Національний технічний університет України, 2022.
- 3 Гаврилюк П. О., Кривошاپка В. А. Мехатронні модулі: теорія та практика. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2020.
- 4 Демиденко М. І., Гончарук Ю. А. Технічні засоби автоматизації: сучасні рішення. Харків: ХНУРЕ, 2021.
- 5 Савчук В. П. Сучасні роботизовані системи в логістиці. Науково-технічний журнал "Автоматика", 2021, №2, с. 98-103.
- 6 Соколовський А. Ю., Гнатюк О. С. Аналіз конструкцій захоплювальних пристроїв. Збірник праць міжнародної конференції "Робототехніка 2019", Львів, с. 56-61.
- 7 Соловей Т. В., Кучеренко М. Г. Інтелектуальні сенсори для роботів. Grasping Київ: ІЕЕ НАН України, 2019.
- 8 Siciliano, B., Khatib, O. Springer Handbook of Robotics. Berlin: Springer, 2021.
- 9 Bekey, G. A. Autonomous Robots: From Biological Inspiration to Implementation and Control. Cambridge, MA: MIT Press, 2020.
- 10 Проць. Я.І. Захоплювальні пристрої промислових роботів: Навчальний посібник . – Тернопіль: Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя, 2008. – 232с. ISBN 966-305-021-7
- 11 FANUC™ Europe. Режим доступу: <https://>

<https://www.fanuc.eu/>

12 Hanwha Group. Режим доступу: <https://www.hanwha.com/>

13 KUKA. Режим доступу: <https://www.kuka.tech/>

14 Universal Robots. Режим доступу: <https://www.universal-robots.com/>

15 ufactory. Режим доступу: <https://www.ufactory.us/xarm>

16 ABB Robotics. Режим доступу:
<https://new.abb.com/products/robotics>

17 Yaskawa. Режим доступу: <https://www.yaskawa.eu.com/>

18 Kawasaki. Режим доступу: <https://kawasakirobotics.com/ua/>

19 Ткаченко Ю. П. Перспективи використання захоплювальних пристроїв у виробництві. Науковий вісник Одеської політехніки, 2020, №5, с. 33-38.

20 Коваленко А. В. Модернізація захоплювальних пристроїв для промислових роботів. Науковий вісник НТУУ "КПІ", 2019, №5, с. 45-51.

21 Марченко І. П., Гречанюк С. Д. Інноваційні рішення для автоматизації виробничих процесів. Науковий вісник Університету імені Тараса Шевченка, 2021, №4, с. 102-109.

22 Мартинюк В. І. Проектування мехатронних систем для робототехніки. Дніпро: ДНУ, 2020.

23 Олійник О. М. Технологічні особливості захоплювальних пристроїв. Запоріжжя: ЗНТУ, 2019.

24 Петренко В. В., Семенюк О. О. Роботизовані захоплювачі для роботи з нестандартними об'єктами. Журнал

"Машинобудування", 2020, №3, с. 25-30.

25 Bicchi, A., Kumar, V. Robotic Grasping and Contact: A Review. International Journal of Robotics Research, 2019, Vol. 40, No. 5, pp. 245-260.

26 Ciocarlie, M., Allen, P. K. Hand Posture Subspaces for Dexterous Robotic Grasping. IEEE Transactions on Robotics, 2021, Vol. 37, No. 3, pp. 867-879.

27 Cutkosky, M. R. Robotic Grasping and Fine Manipulation. New York: Springer, 2022.

28 Hirzinger, G., Brunner, B. Sensor-Based Robot Grasping. Robotics and Automation Journal, 2020, Vol. 29, No. 4, pp. 78-85

29 Павленко І.І., Мажара В.А. Роботизовані технологічні комплекси: Навчальний посібник. – Кіровоград: КНТУ, 2010. – 392 с.

30 Король Ю. М., Левченко О. В. Динаміка маніпуляторів з адаптивними захоплювачами. Київ: Інститут механіки НАН України, 2018.

31 Мірошніченко К. В. Аналіз зусиль захоплення у промислових роботах. Збірник праць конференції "Автоматизація 2022", Київ, с. 78-84.

32 Поліщук І. В. Енергоефективність захоплювальних механізмів. Науковий вісник Полтавського технічного університету, 2021, №9, с. 67-73.

33 Пономаренко С. М. Оптимізація силового захоплення маніпуляторами. Вінниця: ВНТУ, 2018.

34 Романюк М. В., Пащенко Л. О. Дослідження ефективності

мехатронних модулів. Науковий вісник Черкаського
державного технологічного університету, 2020, №6, с. 42-48.

35 Степаненко О. В., Гончарук І. М. Моделі динаміки
роботизованих захоплювачів. Журнал "Інженерія
майбутнього", 2021, №7, с. 112-117.