

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Факультет «Инженерной механики и машиностроения»
Кафедра «Технология машиностроения»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к практическим работам дисциплины
«РОБОТОТЕХНИКА И МЕХАТРОНИКА»

Направление подготовки:	15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»
Магистерская программа:	«Информационные технологии машиностроения»
Программа:	магистратура
Форма обучения:	Очная, заочная

УТВЕРЖДЕНО
Протокол заседания кафедры
«Технология машиностроения»
№1 от 30.08.2019 г.

УДК 621. 865.8 (075.8)

Методические указания к практическим работам дисциплины «*Робототехника и мехатроника*» (для студентов всех форм обучения магистратуры направления 15.04.05 «Конструкторско-технологическая подготовка производства»/ Составитель: Горобец И.А. – Донецк: ГОУВПО «ДОННТУ», 2019 – 68с.

В методических указаниях приведены описания, цель и задачи практических работ студентов при изучении дисциплины «*Робототехника и мехатроника*», вопросы для самоконтроля, список литературы, направленных на достижение потребных результатов в получении необходимых компетенций.

Составитель, к.т.н., проф.

И.А.Горобец

Рецензент, д.т.н., проф.

А.Н.Михайлов

СОДЕРЖАНИЕ

Введение. Мехатронные системы и робототехника.....	4
1. Практическая работа №1 Мехатронные системы и робототехника. Классификация и особенности.....	5
2. Практическая работа №2 Параллельные и движущиеся роботы. Принципы действия, структурные схемы и кинематика.....	12
3. Практическая работа №3 Принципы уравнивания звеньев манипуляторов.....	23
4. Практическая работа №4 Кинематический анализ промышленных роботов.....	29
5. Практическая работа №5 Рабочие органы промышленных роботов. Схемы конструкций, кинематика рабочих органов.....	37
6. Точность позиционирования промышленного робота.....	50
7. Привод промышленных роботов.....	57
Список использованных источников.....	67

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение темпов производства изделий привело к необходимости механизации (в начале XIX века), а затем и автоматизации (в XX веке) объектов производства. Промышленные роботы, начиная с 60-х годов XX столетия, находят широкое применение в промышленности, заменяя человека на участках с опасными, вредными для здоровья, тяжелыми, точными, монотонными условиями труда. Основными предпосылками расширения использования ПР являются: повышение качества продукции и объемов её выпуска, вместе со снижением времени выполнения технологических операций, интенсификация существующих и стимулирование создания новых высокопроизводительных процессов и оборудования, смена условий работы человека, за счет выполнения неквалифицированной и опасной для жизни и здоровья работы, улучшение условий труда для человека.

Усложнение конструкции технических объектов привело к необходимости повышения быстродействия и эффективности управления ими. При этом миниатюризация электронных элементов, сенсоров, повышение быстродействия систем автоматического управления позволило управлять не только объектом в целом, но и изменять хаарктеристики отдельных узлов и агрегатов. Логика развития технических систем привела к появлению устройств, способных воспринимать информацию о внешней среде, преобразовывать ее, обрабатывать и формировать управляющие сигналы для приводов. Последние обеспечивают перемещения движителей или нагрузки на рабочих органах, соответствующие требованиям задания. Такие устройства называются **мехатронными модулями**, поскольку они обладают свойством «самодостаточности». Мехатронные модули обладают всеми элементами машины: приводом, трансмиссией, датчиками и сенсорами, системой управления, рабочим органом. Характерным примером исполнения мехатронного изделия является современный промышленный робот.

Целью разработанных методических указаний к практическим работам по курсу *«Робототехника и мехатроника»* является освоение теоретического курса и приобретение навыков при решении практических задач по анализу структур, кинематики и выбора привода манипуляторов промышленных роботов , как типовых представителей мехаттронных устройств.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РОБОТА №1

Мехатронные системы и робототехника. Классификация и особенности

Цель работы: Изучение особенностей и классификации промышленных роботов.

Задачи практической работы заключаются в изучении и освоении материала:

1. Исторические и технические аспекты появления промышленной робототехники.
2. Современная классификация промышленных роботов (поколения промышленных роботов).
3. Основные термины и определения, характеристики и классификация ПР.
4. Структура ПР.

1.1 Исторические и технические аспекты появления промышленной робототехники

Идеи создания "механических" людей возродились в начале 20 века. Это состоялось на основе появления электротехники, электроники и литературы. Слово "РОБОТ" впервые появилось в произведении "R.U.R." чешского писателя Карла Чапека (1920) . Позже Айзек Айзимов (известный американский писатель – фантаст) сформулировал законы робототехники в одном из своих романов:

1. Робот не может причинить человеку вред.
2. Робот должен повиноваться всем приказам человека, кроме "случаев", когда они противоречат закону 1.
3. Робот должен заботиться о своей безопасности, кроме случаев 1 и 2.

В 1927г. американский инженер Д.Венсли построил управляемый с помощью свистка автомат "Телевокс". Он мог выполнять ряд операций и произносить фразы.

В 40-х - 50-х годах были разработаны механические манипуляторы для проведения различных механических операций в ходе обслуживания, например, атомных электростанций. Это были копирующие манипуляторы. Ими управлял оператор посредством джойстика. Оператор находился в зоне защиты от вредного излучения.

Первый промышленный робот (ПР) появился в 1961г. в США. Он был изготовлен корпорацией "Unimation". В 1963г. появляются роботы фирмы "American Machine and Foundry Company (AMF)". Роботы использовались в автомобильной промышленности ("Форд", "Дженерал моторс", "Дженерал Электрик"). В 1967г. начат выпуск роботов в Англии по лицензии США, в 1968

- в Швеции и Японии, в 1971 - 1973г. - в ФРГ, Франции, Италии. В 1975г. было произведено 8500 ПР. В 1990г. - 103000.

Сейчас производством роботов в мире заняты около 200 фирм (Япония (70), Западная Европа (90), США - (30)), которые выпускают более 250 марок ПР [3].

Сейчас принято деление роботов на 3 поколения.

Первое поколение - ПР. Это автоматические устройства, оснащенные одной или несколькими руками. Движение руки робота осуществляется по нескольким управляемым координатам (2-8) с заданной скоростью и необходимой точностью. Оператор может перепрограммировать движения робота (рис. 1.1.). После этого робот однообразно выполняет движения по жесткой программе. Такие роботы не имеют датчиков обратной связи и не могут реагировать на изменения внешней среды. Предполагается, что внешняя среда детерминирована и постоянна. Программирование движений осуществляется методом обучения. Программа предусматривает запись всех движений манипулятора.

ПР применяются для автоматизации транспортных, вспомогательных и некоторых технологических операций в условиях мелкосерийного и серийного производств.

Второе поколение - адаптивные роботы.

Адаптивные роботы- это роботы, управляемые устройством адаптивного управления. Эти роботы могут реагировать на изменения внешней среды. Роботы оснащены датчиками обратной связи. Область применения роботов расширена (по сравнению с роботами первого поколения) за счет возможности корректировать программу в зависимости от изменений внешней среды. Манипуляторы (механическая часть) роботов не имеют существенного отличия от роботов первого поколения. Структурная схема робота приведена на рисунке 1.2.

Область применения роботов - технологические процессы без строго организованной окружающей среды (разная ориентация деталей), изменяющаяся номенклатура деталей.

Третье поколение - роботы с искусственным интеллектом.

Задание на работу роботу вводится в более общей форме. Робот планирует свои действия в неопределенной и меняющейся обстановке.

Робот действует аналогично человеку, который понял поставленную задачу, проанализировал окружающую среду и знает, какие движения необходимо сделать для выполнения задачи. Структура робота приведена на рис.1.3.

Область применения роботов: космос; исследование океанских глубин;

поверхности планет, зоны высокой радиации; а также сложные сборочные операции, процессы с риском травматизма.

1.2 Основные термины и классификация промышленных роботов

1.2.1 Термины и определения

Манипулятор – это управляемое устройство для выполнения двигательных функций при перемещении объектов в пространстве, оснащенное рабочим органом.

Манипулятор с ручным управлением - манипулятор, управление которым осуществляет оператор.

Сбалансированный манипулятор - манипулятор, содержащий систему уравнивания устройства рабочего органа.

Автооператор - автоматическая машина, состоящая из исполнительного устройства - манипулятора и устройства передвижения.

Промышленный робот - автоматическая машина, состоящая из манипулятора и устройства программного управления для выполнения в производственном процессе двигательных и управляющих функций.

Адаптивный промышленный робот (АПР) – промышленный робот, управляемый устройством адаптивного управления.

Исполнительное устройство промышленного робота - устройство, выполняющее все двигательные функции робота.

Рабочий орган робота - часть исполнительного устройства ПР для выполнения технологических и вспомогательных операций .

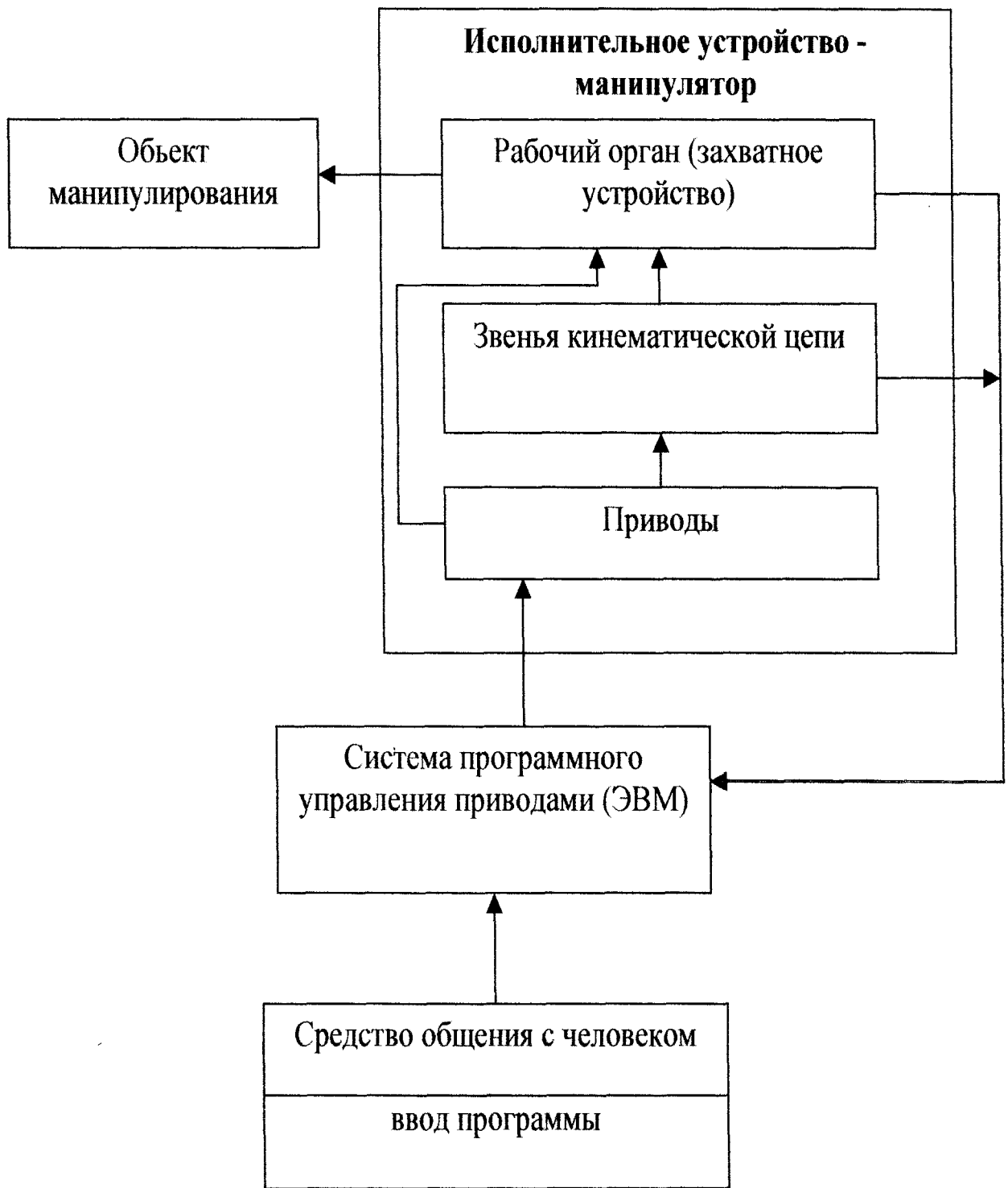


Рис. 1.1. Структура программного робота (первое поколение)



Рис 1.2. Структура адаптивного робота (второе поколение)

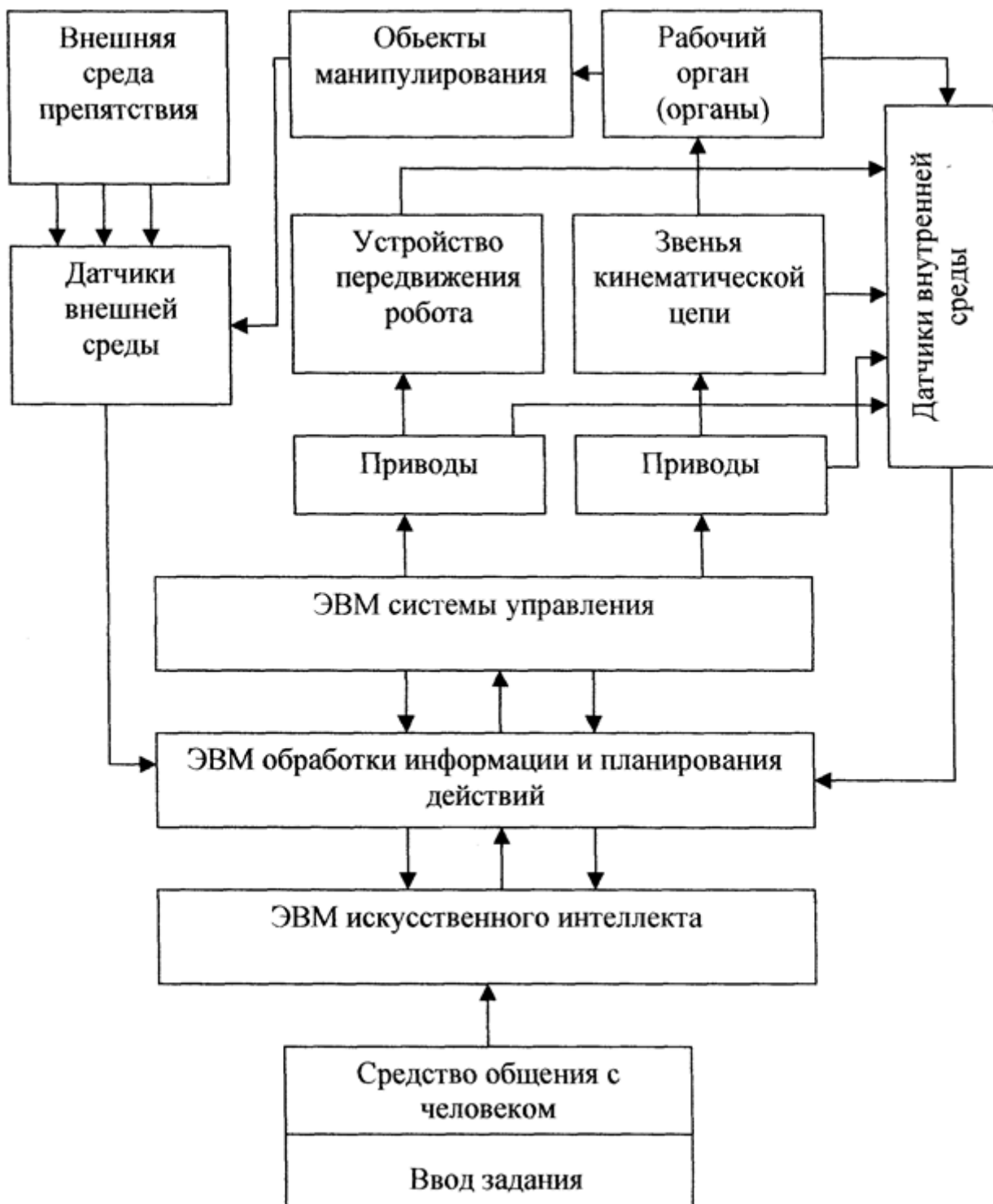


Рис 1.3. Структура интеллектуального робота (третье поколение)

1.3. Характеристики промышленного робота

Номинальная грузоподъемность манипулятора - наибольшее значение массы предметов производства (включая массу захватного устройства) при которой гарантируется их удержание и обеспечение значений эксплуатационных характеристик.

Рабочее пространство манипулятора – пространство, в котором может находиться исполнительное устройство при работе манипулятора.

Рабочая зона манипулятора – пространство, в котором может находиться рабочий орган при функционировании манипулятора.

Зона обслуживания - пространство, в котором рабочий орган выполняет свои функции в соответствии с назначением манипулятора.

Число степеней подвижности робота - сумма возможных координатных движений объекта манипулирования относительно опорной системы.

Погрешность позиционирования рабочего органа - отклонение положения рабочего органа манипулятора от заданного программой.

Мобильность робота - определяется возможностью совершать движения.

1.4. Классификация промышленных роботов

Промышленные роботы классифицируют по признакам [5,6,7]:

- специализация;
- грузоподъемность;
- число степеней подвижности;
- возможность передвижения;
- способ установки на рабочем месте;
- вид системы координат;
- вид привода;
- вид управления;
- способ программирования;
- количество манипуляторов;

По специализации ПР подразделяют на специальные, специализированные, универсальные.

По характеру выполняемых операций в технологических процессах(ТП):

- технологические ПР, выполняющие основные операции ТП (сварка, окраска, сборка)
 - вспомогательные ПР, выполняющие действия типа "взять-положить".
- Такие роботы применяются для обслуживания оборудования,

автоматизации вспомогательных операций, транспортно-складских операций.

- универсальные ПР, выполняющие основные и вспомогательные функции.

По грузоподъемности ПР подразделяют на :

- сверхлегкие - номинальной грузоподъемностью до 1 кг;
- легкие- 1—10кг;
- средние - 10-200 кг;
- тяжелые - 200-1000 кг;
- сверхтяжелые- более 1000 кг;

По типу подвижности ПР делят на:

- роботы с 2 степенями подвижности;
- роботы с 3 степенями подвижности;
- роботы с 4 степенями подвижности;
- со степенями подвижности более 4.

По возможности передвижения:

- стационарные;
- подвижные.

По виду систем координат ПР, работающих в:

- прямоугольной декартовой системе координат;
- цилиндрической декартовой системе координат;
- сферической;
- угловой;
- других системах координат.

По виду привода ПР делятся на роботы с:

- электромеханическими приводами;
- гидравлическими;
- пневматическими;
- комбинированными.

По виду управления ПР подразделяется на роботы с:

- программным управлением (цикловым, позиционным, контурным);
- адаптивным управлением (позиционным и контурным).

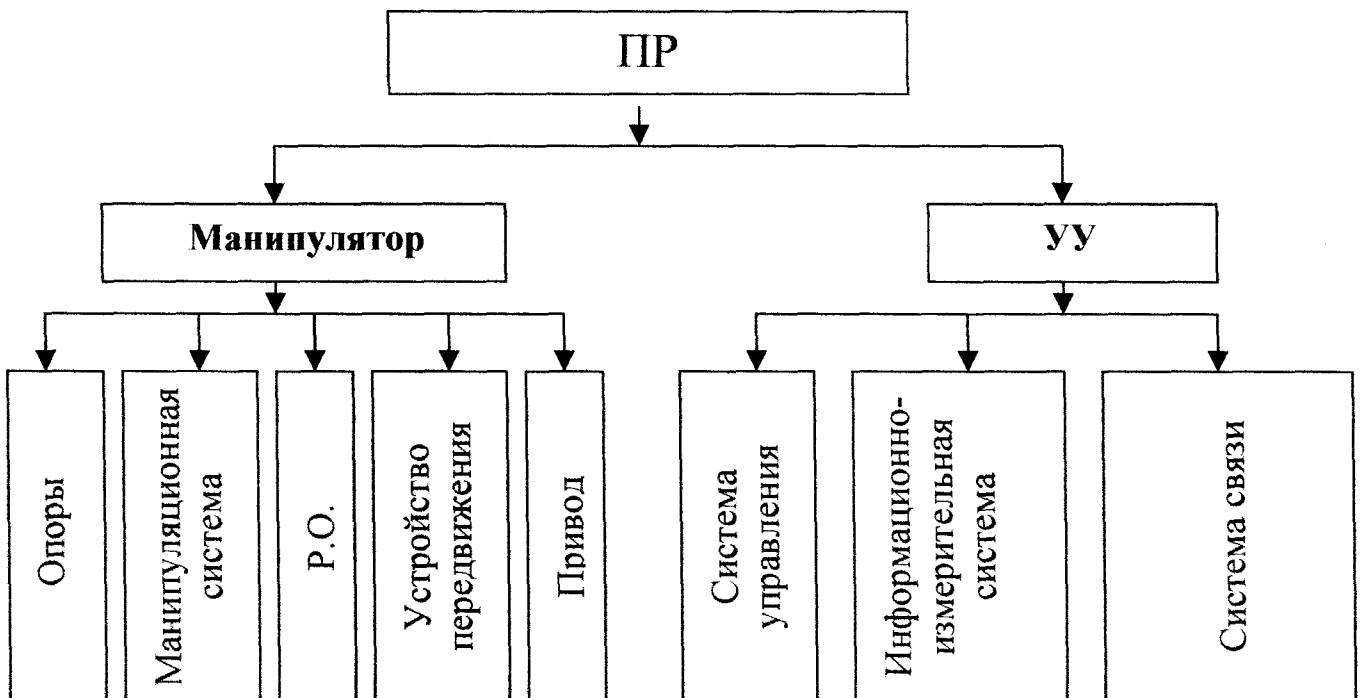
По способу программирования ПР делят на роботы с:

- программируемым обучением;
- роботы, программируемые аналитически.

По количеству манипуляторов:

- с 1 манипулятором;
- с 2 манипуляторами;

Рис.1.4 – Структура ПР



- число манипуляторов более 2.

По способу размещения:

- напольные;
- подвесные;
- встраиваемые в другое оборудование.

1.5. Составные части промышленного робота

Робот состоит из манипулятора (механическая часть) и устройства управления (электронная часть). Стоимость устройства управления (УУ) около 60% от стоимости робота.

Общая структурная схема приведена на рис. 1.4.

1.6 Контрольные вопросы

1. История и предпосылки появления автоматизированного производства
2. Исторические этапы развития робототехники
3. Особенности роботов 1-3 поколений .
4. Пояснить смысл понятий: манипулятор, сбалансированный манипулятор, автооператор .
5. Пояснить смысл понятий: промышленный робот (ПР), ПР с ЧПУ, адаптивный ПР.

6. Дать классификацию ПР.
7. Составные части и конструкция ПР.
8. Основные технические характеристики ПР.

Литература

Основная:

1. Промышленные роботы: основные типы и технические характеристики: [Электронный ресурс] : [учеб. пособие] / Ю.Г.Козырев. – М.: КНОРУС, 2017.- 560с. - 1 файл. - Режим доступа: <http://ed.donntu.org/books/19/cd9434.pdf>. - Загл. с экрана.
2. Моисеев, Ю. И. Применение промышленных роботов для загрузки металлообрабатывающего оборудования [Электронный ресурс] : [учеб. пособие] / Ю. И. Моисеев. – Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2013. – 170 с. - 1 файл. - Режим доступа: <http://ed.donntu.org/books/19/cd9444.pdf>. - Загл. с экрана.
3. Робототехнические мехатронные системы: [Электронный ресурс] : [учебник] / О.Д.Егоров, Ю.В.Подураев, М.А.Буйнов. – ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2015. – 326с. - 1 файл. - Режим доступа: <http://ed.donntu.org/books/17/cd6752.pdf> - Загл. с экрана.
4. Лукинов А.П. Проектирование мехатронных и робототехнических устройств: [Электронный ресурс] : [учеб. пособие].-СПб.:Издательство «Лань», 2012. -608с. – - 1 файл. - Режим доступа: <http://ed.donntu.org/books/17/cd8070.pdf>. - Загл. с экрана.

Учебно-методические издания, разработанные в ГОУВПО ДОННТУ:

5. Горобец И.А. Промышленная робототехника. Механические системы манипуляторов .- Донецк, ДонНТУ, 2001.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РОБОТА №2

Параллельные и движущиеся роботы. Принципы действия, структурные схемы и кинематика

Цель работы: изучить конструктивные особенности параллельных и движущихся роботов.

Задачи работы:

1. Ознакомление с конструктивными особенностями, структурными схемами параллельных роботов
2. Ознакомление с конструктивными особенностями, структурными схемами перемещающихся роботов.

2.1 Параллельные роботы

Параллельные роботы являются одной из современных разновидностей манипуляторов [1,3,4].

Классические структуры роботов копируют структуру и кинематику движения руки человека. Они имеют ряд достоинств : небольшая величина рабочего пространства ; гибкость элементов ПР, позволяющая осуществлять сложные движения ; возможность различного исполнения.

Однако, для определенных условий производства появилась необходимость в ПР, имеющих более высокие показатели кинематических характеристик (скорость движения и ускорение перемещения); точности позиционирования; отношения массы перемещаемых грузов к массе ПР; а также наиболее простую кинематику и приводные механизмы.

Это обусловило появление (в конце 40-х) и производство (в конце 80-х годов) «**параллельных**» роботов. Кинематика этих роботов основана на анализе кинематики движений и условий равновесия тел животных, имеющих несколько лап, точно определяющих положение тела относительно окружающей среды.

Параллельные роботы (в отличии от серийных) имеют большее количество кинематических связей между основанием ПР и его управляемой платформой рис.2.1.

Преимущества параллельных роботов:

- Высокие кинематические характеристики (скорость перемещения, ускорения, достигающие 22 g);
- Возможность упрощения кинематической цепи и исключения передаточных механизмов из привода;
- Высокая точность позиционирования (до 0,01 мм) при использовании

высоких скоростей перемещения управляемой рабочей площадки;

- Идентичность конструкций параллельных кинематических пар.

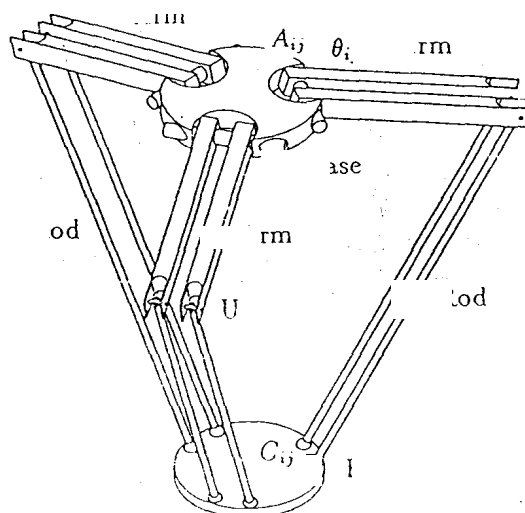


Рис. 2.1 Кинематическая схема параллельного робота «Гекса»

Недостатки параллельных роботов:

- Ограничение возможности подхода рабочего органа к труднодоступным элементам объекта;
- Увеличенная площадь размещения робота;
- Необходимость в сложных расчетах «обратных» задач кинематики движений.

Количество параллельных структур (имеющееся в настоящее время) можно разделить на три класса, рис.2.2 :

1. Полностью параллельные с приводом поступательного типа;
2. Полностью параллельные с приводом вращательного типа ;
3. Смешанные .

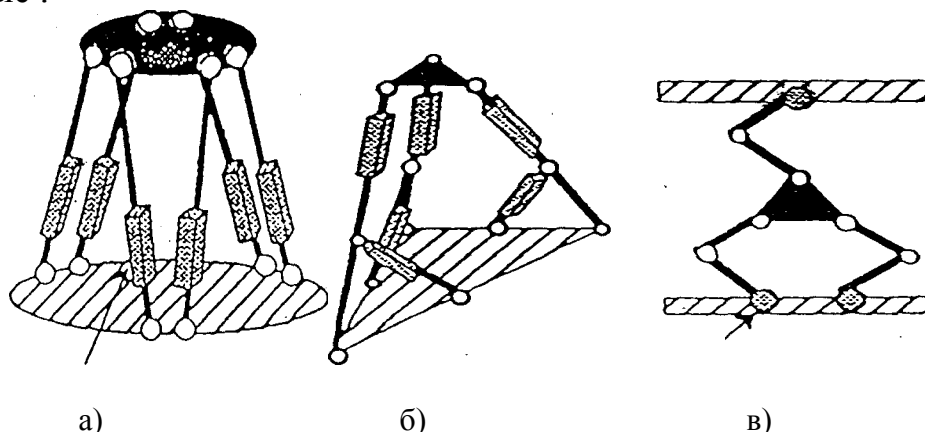


Рис.2.2 Основные виды параллельных структур: а) полностью параллельные с приводом поступательного движения, б) смешанные, в) полностью параллельные с приводом вращательного движения.

Примером таких роботов может служить робот «Дельта» (серийно

выпускаемый с 1988г.), рис.2.3. Он выполнен из сверхлегких металлов и синтетических материалов, имеет значительную резонансную частоту (около 100 Гц), низкий коэффициент трения в сочленениях и простоту конструкции.

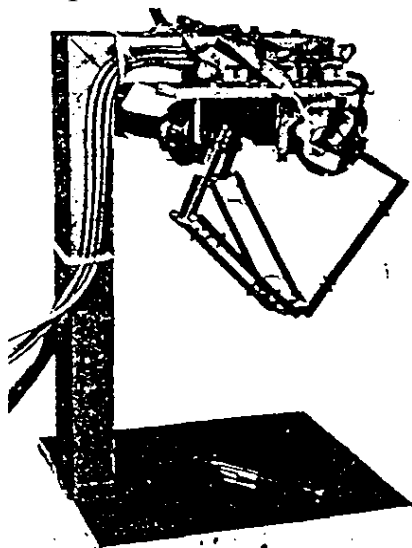


Рис.2.3 Вид робота «Дельта»

Кинематика робота приведена на рис. 2.4. Роботы «Ария», «Рекса» и «Гекса» имеют аналогичную кинематическую схему.

На рис.2.5 приведена схема конструкции параллельного робота для микромонтажа (например, для установки нити стекловолокна в микросхему сенсора). Робот снабжен пассивным сочленением кинематических звеньев с приводами и рабочей платформой. Это позволяет повысить точность позиционирования схвата (микрогейфера). В качестве привода робота могут быть использованы гидро-, пневмо- и электромеханический приводы. Конструкции параллельных роботов могут использовать интегрированные элементы памяти формы положения кинематических звеньев

Конструкции роботов могут использовать устройства передвижения (от наземных колесных и гусеничных до предназначенных для передвижения в воде, глубинах земли, в воздухе и космосе). Для перемещения роботов по пересеченной местности разработаны разнообразные конструкции механизмов, например на гусеничном ходу (рис.2.6). Устройство имеет рамную конструкцию 2, содержащую замкнутую траковую цепь 3. Цепь находится в контакте с 2 ведущими зубчатыми колесами 1 и 6. Конструкция имеет колесо 5, которое может изменять свое положение в пространстве благодаря двухзвенному рычажному механизму 4. Такая конструкция устройства позволяет преодолевать препятствия без дополнительных приспособлений [2,4].

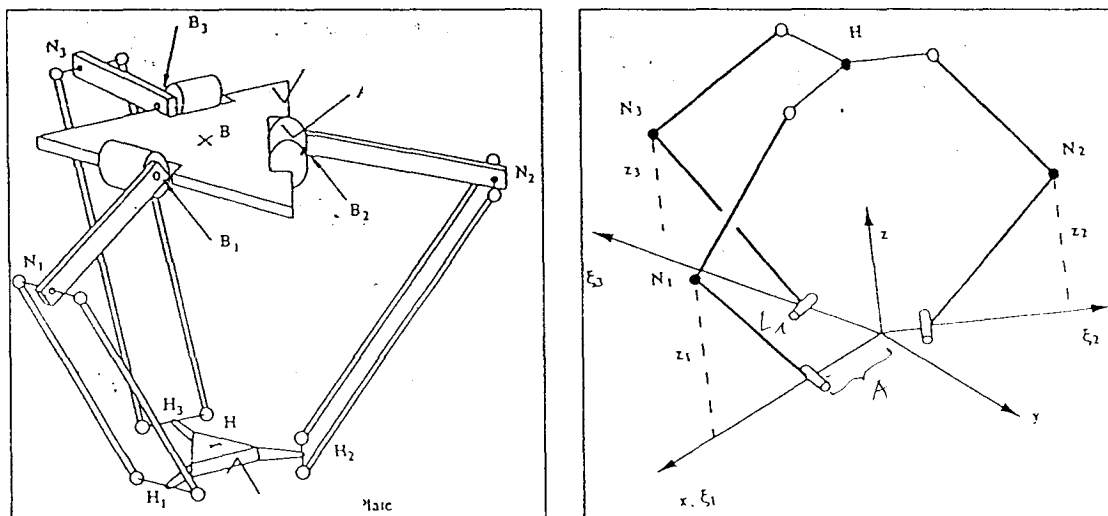


Рис.2.4 Кинематическая и структурная схемы ПР «Дельта»

2.2 Перемещающиеся роботы

В настоящее время ведутся разработки **шагающих** роботов (которые начаты в конце 60-х в университете штата Огайо (США)). Такие роботы могут использоваться при авариях на АЭС, химическом производстве, для выполнения планетарных миссий. Шагающие роботы являются более сложными мехатронными системами (по сравнению с катящимися устройствами передвижения), поскольку в них решается ряд задач: координация движения органов передвижения, обработка сигналов сенсоров двигательной системы, использование экономичных приводных систем и компактных и энергоемких источников питания, планирование движений, статическая и динамическая устойчивость, выбор точек опоры.

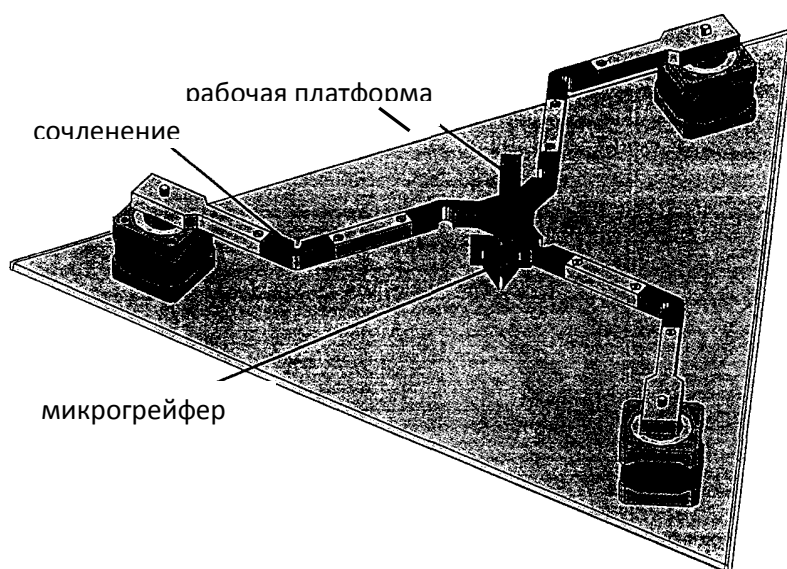


Рис.2.5 Схема конструкции параллельного робота – микрогрейфера

Так, например, роботы «Маг» и «Катарина», рис.2.8, снабжены специальной платформой с видеодатчиками и сложной адаптивной системой регулирования и координации движения ног. Система состоит из приводных электродвигателей с редукторами, трехкомпонентными сенсорами для измерения усилий, рис.2.9, индивидуального контроллера и центрального процессорного устройства управления [5].

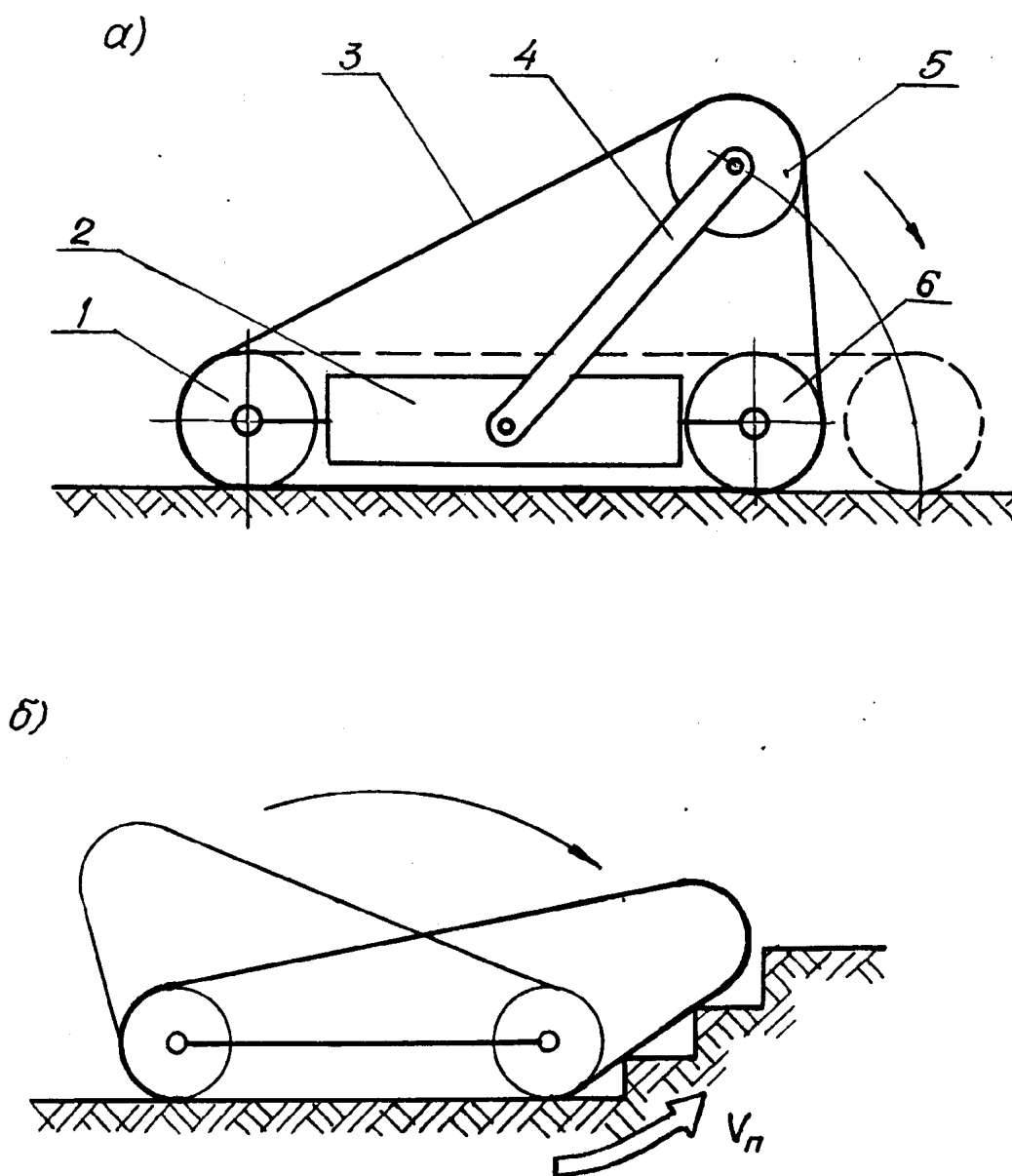


Рис 2.7 Вид самоходной тележки робота

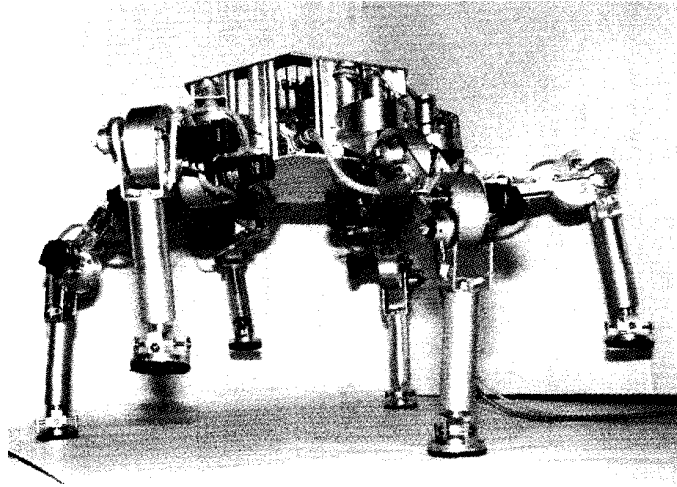


Рис.2.8 Вид шагающего робота «КАТАРИНА»

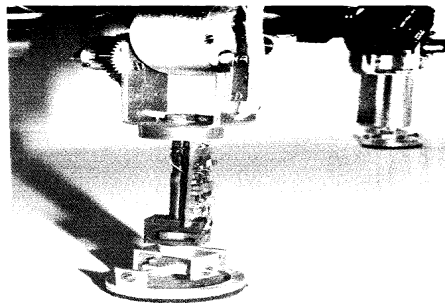


Рис.2.9 Вид ноги робота

Основные технические характеристики робота «Маг» :

Полная масса робота – 21 кг,

габариты ноги – 405 мм,

масса ноги – 2,8 кг,

масса перемещаемого груза – 5 кг,

максимальная потребляемая мощность – 130 Вт,

максимальная скорость перемещения – 0,4 км/ч.

На рис.5.10 приведена структурная схема робота.

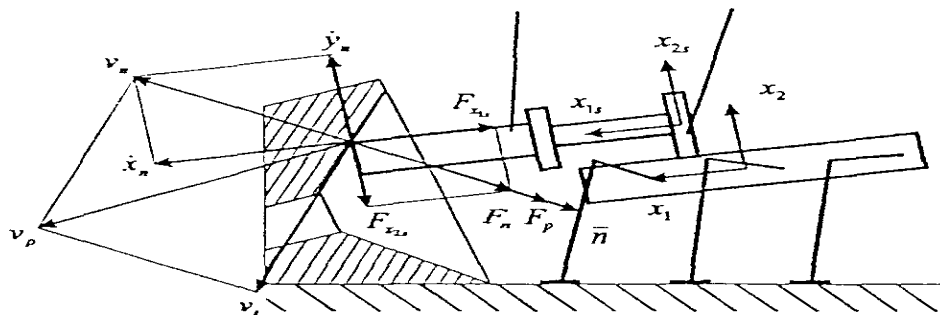
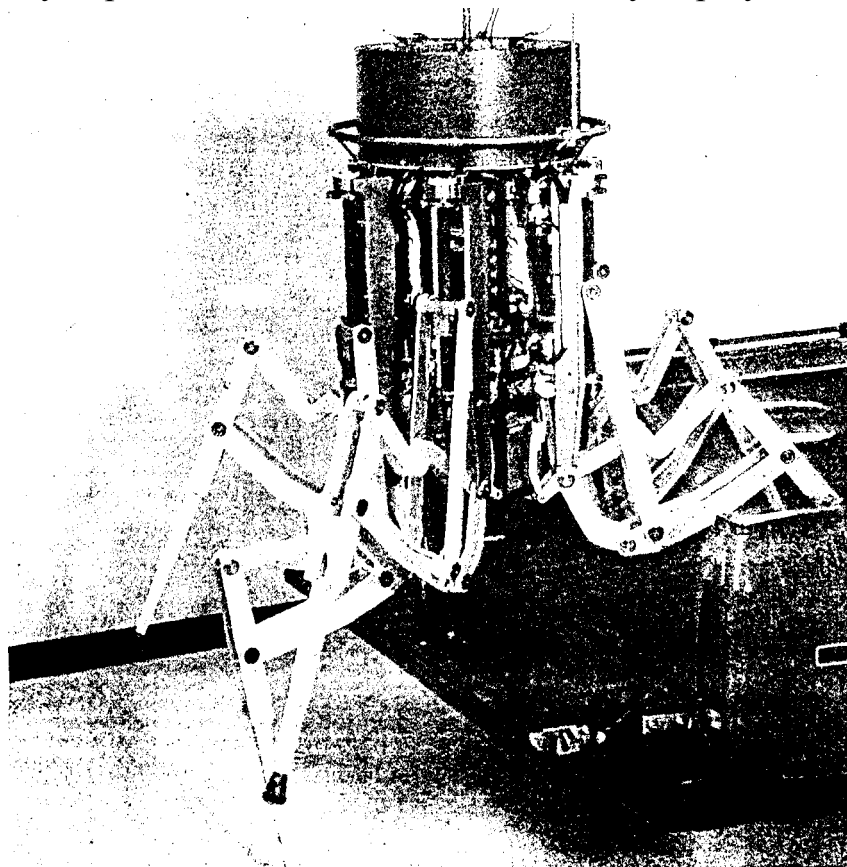


Рис.2.10 Структурная схема робота

Разновидность шагающего робота приведена на рис.2.11. Привод робота (в отличии от предыдущего) осуществляется элементами поступательного действия. Робот имеет специфическую структурную схему ноги, рис.2.12. Это позволяет роботу передвигаться даже по лестничному маршу.



85

Рис.2.11 Вид шагающего робота Одекс - 1

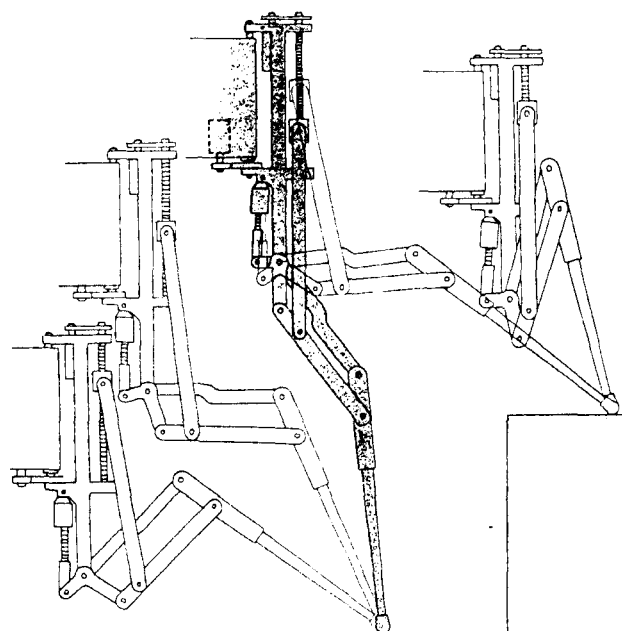


Рис.2.12 Кинематическая схема и схема движения ноги робота

2.3 Контрольные вопросы

1. Классификация параллельных роботов
2. Структурные схемы параллельных роботов.
3. Достоинства и недостатки параллельных роботов.
4. Использование параллельных роботов.
5. Перемещающиеся роботы.

2.5 Литература

Основная:

1. Промышленные роботы: основные типы и технические характеристики: [Электронный ресурс] : [учеб. пособие] / Ю.Г.Козырев. – М.: КНОРУС, 2017.- 560с. - 1 файл. - Режим доступа: <http://ed.donntu.org/books/19/cd9434.pdf>. - Загл. с экрана.
2. Моисеев, Ю. И. Применение промышленных роботов для загрузки металлообрабатывающего оборудования [Электронный ресурс] : [учеб. пособие] / Ю. И. Моисеев. – Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2013. – 170 с. - 1 файл. - Режим доступа: <http://ed.donntu.org/books/19/cd9444.pdf>. - Загл. с экрана.
3. Робототехнические мехатронные системы: [Электронный ресурс] : [учебник] / О.Д.Егоров, Ю.В.Подураев, М.А.Буйнов. – ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2015. – 326с. - 1 файл. - Режим доступа: <http://ed.donntu.org/books/17/cd6752.pdf> - Загл. с экрана.
4. Лукинов А.П. Проектирование мехатронных и робототехнических устройств: [Электронный ресурс] : [учеб. пособие].-СПб.:Издательство «Лань», 2012. -608с. – - 1 файл. - Режим доступа: <http://ed.donntu.org/books/17/cd8070.pdf>. - Загл. с экрана.

Дополнительная

5. Спыну Г.А. Промышленные роботы. Конструирование и применение: Учебное пособие, 2-ое издание – К.: Высшая школа, 1991. – 311с.

Учебно-методические издания, разработанные в ГОУВПО ДонНТУ:

6. Горобец И.А. Промышленная робототехника. Механические системы манипуляторов .- Донецк, ДонНТУ, 2001.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РОБОТА № 3

Принципы уравнивания звеньев манипуляторов

Цель работы: Изучение принципов уравнивания звеньев манипуляторов

Задачи работы:

1. Изучение принципов уравнивания подвижных звеньев манипуляторов.
2. Статическое уравнивание манипуляторов.
3. Динамическое уравнивание манипуляторов.
4. Кинематические схемы статического уравнивания манипуляторов.

3 Принципы уравнивания подвижных звеньев манипуляторов

Уравнивание манипуляторов имеет большое значение для улучшения функционирования роботов. Однако, введение дополнительных механизмов уравнивания ведет к усложнению конструкции робота, повышает металлоемкость и инерционность, приводит к дополнительным нагрузкам в элементах конструкции.

Системы уравнивания разделяются на **активные** и **пассивные**.

Активные системы уравнивания используют основной или дополнительный приводы, а также информацию о положении системы. Эти системы осуществляют более точное уравнивание, но они применяются редко (ввиду их сложности). **Пассивные** системы используют неуправляемые источники энергии: гравитационное поле, силы упругости, сжатый газ [3].

Системы уравнивания роботов разнообразны, как по принципу действия, так и по конструктивным особенностям. Однако, они подразделяются на две группы:

- статическое уравнивание;
- динамическая развязка движений.

3.1 Статическое уравнивание манипуляторов

Предназначено для разгрузки приводов от статических нагрузок, таких как силы тяжести звеньев и перемещаемого объекта. Уравнивание статических нагрузок в роботах осуществляется с помощью пружин, противовесов, путем распределения масс или непосредственно приводами робота.

Рассмотрим основные принципы статического уравнивания промышленных роботов.

Подвижное звено ОА (рис. 3.1), вращается в вертикальной плоскости вокруг точки С. Сила тяжести $P=mg$ (где m -масса звена ОА) создает относительно оси вращения момент

$$M=P \cdot l \cdot \sin\alpha,$$

где $l=OC$, а α -угол поворота звена относительно вертикальной оси ОУ. Для полного уравновешивания звена приложим такой же уравновешивающий момент M_u противоположного направления. Это решим при помощи противовеса D , установленного на продолжении звена ОА (рис. 3.2). Масса противовеса m_1 определяется из соотношения

$$m_1=m \cdot OC/OD.$$

Если $OC>OD$, то масса противовеса превышает массу звена, в результате металлоемкость конструкции и ее инерционность значительно возрастают. Несмотря на простоту такого решения, уравновешивание с помощью противовесов применяется сравнительно редко.

Способ уравновешивания с помощью пружин характеризуется простотой конструктивного воплощения без значительного увеличения массы робота. Однако, при таком способе уравновешивания затрудняется полное уравновешивание подвижных звеньев робота. Так, например, пружина ВД устанавливается между стойкой и звеном ОА (рис. 3.2). Точка Д крепления пружины к стойке смещена на угол γ относительно вертикали. Положение подвижного звена ОА характеризуется углом α . Жесткость пружины C , ее начальная длина d_0 , расстояния $OD=a$ и $OB=b$ выбираются из условия минимального значения неуравновешенного момента M_{ny} во всем диапазоне изменения угла α :

$$M_{ny}=c \cdot a \cdot b(1-d_0/d)\sin((\alpha+\gamma)-P \cdot l \cdot \sin\alpha, \quad (3.1)$$

где P -сила тяжести подвижного звена ОА;

l - расстояние от оси О до центра тяжести звена ОА вдоль его оси;

$$d = DB = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos(\alpha + \gamma)}, \quad (3.2)$$

где d - текущая длина пружины.

Плечо действия восстанавливающей силы пружины h относительно точки О равно:

$$h=a \cdot b \cdot \sin(\alpha + \gamma)/d \quad (3.3)$$

Задача решается численными методами путем перебора вариантов при условии минимума или максимума M_{ny} или суммы

$$S = \sum_{i=1}^n M_{нуi}^2,$$

где i - число точек разбиения интервала изменения угла α .

Все механизмы уравнивания, использующие в качестве силового элемента пружину с линейной характеристикой, могут быть разделены на две группы. К **первой** относятся те, в которых требуемый закон изменения уравнивающего момента обеспечивается геометрией расположения упругого элемента и соответствующим выбором её жесткости (рис.3.1). В механизмах **второй** группы уравнивающий момент создается введением промежуточного звена: зубчатой пары, кулисы, кулачка и т. д.(рис.3.3).

Для создания уравнивающего момента, пропорционального синусу угла отклонения звена ОА от вертикали, в механизмах первой группы необходимо, чтобы деформация пружины была равной расстоянию ВД, а жесткость пружины определялась выражением

$$C = P \cdot l / (OB \cdot OD) \quad (3.4)$$

В этом случае момент силы упругости M_y пружины относительно точки О равен (рис. 3.3)

$$M_y = F h = C \cdot ВД \cdot h = P \cdot l \cdot ВД \cdot h / (OB \cdot OD), \quad (3.5)$$

где h - плечо силы F относительно точки О.

$$\text{Но} \quad ВД \cdot h = 2 S_{OBD} = OB \cdot OD \sin \alpha. \quad (3.6)$$

$$\text{Тогда} \quad M_y = P \cdot l \cdot \sin \alpha. \quad (3.7)$$

В схемах (а) и (е) (рис. 3.3) использованы гибкий элемент (трос) и пружины с мягкими характеристиками, работающими в режиме растяжения. В остальных схемах применены пружины сжатия с малыми деформациями и большими усилиями. В схемах (в - е) использованы вспомогательные элементы зубчатых пар с передаточным отношением 2:1, кулиса, у которой $OD=OB$, кулачок с радиусом кривизны $r=f(\alpha)$, предназначенные для обеспечения деформации пружины, пропорциональной синусу половинного угла отклонения звена ОА от вертикали.

Статическое уравнивание сил тяжести звеньев и объекта может быть достигнуто как с помощью противовесов, так и рациональным распределением масс звеньев манипулятора. Противовесы увеличивают массу системы и её инерционность, что не всегда допустимо. Поэтому рациональнее размещать

массу звеньев, редукторов и двигателей, таким образом, чтобы выполнялось условие статического равновесия. Положение статического равновесия будет достигнуто, если потенциальная энергия системы во всех ее положениях в пространстве не будет зависеть от обобщенных координат.

Так как при учёте лишь сил тяжести потенциальная энергия зависит только от координат Z (по вертикали) центров масс звеньев и груза, то условие статически уравновешенной системы запишется в виде:

$$P_i = \sum_{i=1}^n P_i Z_i = g \sum_{i=1}^n m_i Z_i = 0, \quad (3.8)$$

где P_i - вес i -го звена или груза;

Z_i - координата Z центра масс звеньев или груза;

m_i - масса i -го звена или груза;

g - ускорение свободного падения.

Исследования показывают, что для манипулятора с поступательными парами уравновешивание путем введения дополнительных масс не может быть достигнуто.

Для манипулятора с вращательными парами уравновешивание может быть достигнуто, если будет обеспечено уравновешивание каждого звена относительно своей оси вращения, т.е. $Z_i=0$.

3.2 Динамическое уравновешивание системы

Наряду со статическим уравновешиванием для быстродействующих манипуляторов необходимо решать задачу и динамического уравновешивания системы. Воспользуемся выражением кинетической энергии. Рассмотрим двухзвенный манипулятор, содержащий две параллельные вращательные кинематические пары. Кинетическая энергия первого и второго звеньев записывается в виде:

$$K_1 = 0,5(m_1 r_1^2 + J_1) \dot{\varphi}_1^2; \quad (3.9)$$

$$K_2 = 0,5(m_2 r_2^2 + J_2)(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) + m_2 l_1 r_2 \dot{\varphi}_1 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) \cos \varphi_2, \quad (3.10)$$

где m_1, m_2 – масса звена С1 и С2 манипулятора;

J_1, J_2 – момент инерции звеньев С1 и С2 манипулятора;

r_1, r_2 - расстояние от осей шарниров до центров масс звеньев С1 и С2;

l_1, l_2 – длины звеньев С1 и С2 манипулятора;

$\varphi_1, \dot{\varphi}_1, \varphi_2, \dot{\varphi}_2$ - углы поворота и скорости звеньев С1 и С2 в глобальной неподвижной системе координат.

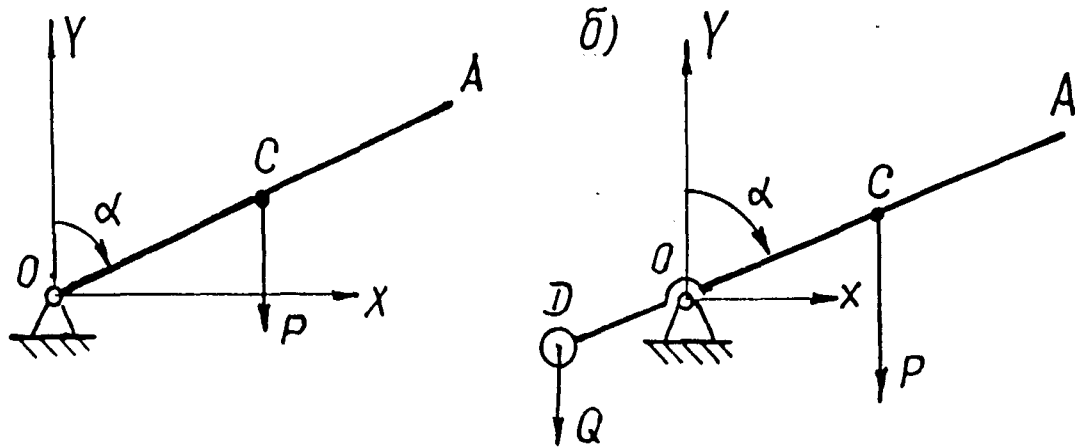


Рис. 3.1 Принцип уравнивания звеньев противовесом.

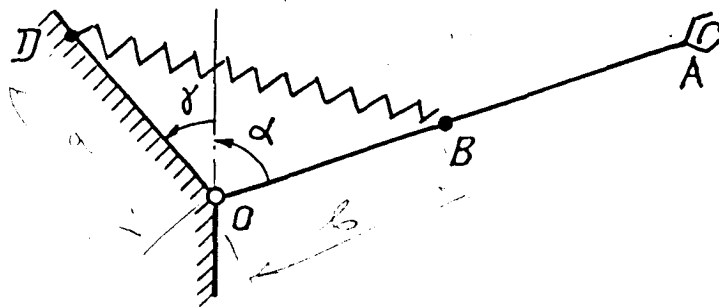


Рис. 3.2 Схема пружинного уравнивающего механизма.

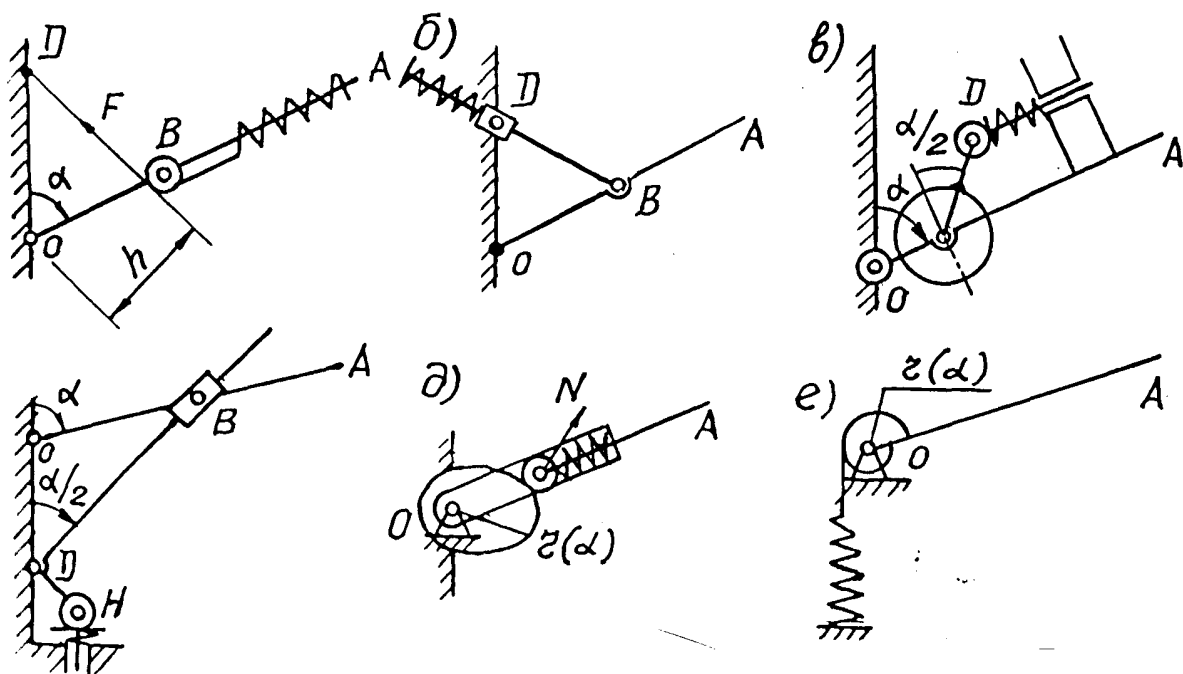


Рис. 3.3 Варианты пружинных уравнивающих механизмов.

Общая кинетическая энергия манипулятора K равна сумме кинетических энергий K_1 и K_2 .

Для развязки динамического взаимовлияния движений по степеням подвижности необходимо, чтобы коэффициенты при $\dot{\varphi}_1^2$, $(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2$ и $(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)$ были сведены к нулю. Это не всегда достижимо, но к этому нужно стремиться. Для первого звена это достижимо при $r_1=0$. Для второго звена влияние динамических нагрузок существенно устраняется при $r_2=0$. Таким образом, и для первого, и для второго звеньев центр их масс должен совпадать с осью соответствующей вращательной пары. Это может быть реализовано в процессе конструирования, прежде всего перераспределением массы самих звеньев, их приводов и передаточных механизмов относительно осей их шарниров.

3.3 Вопросы для контроля

1. Для чего используется уравнивание роботов?
2. Как подразделяются системы уравнивания звеньев манипулятора?
3. Для чего предназначено статическое уравнивание манипуляторов?
4. Для чего предназначено динамическое уравнивание манипуляторов?

Литература

Основная:

1. Промышленные роботы: основные типы и технические характеристики: [Электронный ресурс] : [учеб. пособие] / Ю.Г.Козырев. – М.: КНОРУС, 2017.- 560с. - 1 файл. - Режим доступа: <http://ed.donntu.org/books/19/cd9434.pdf>. - Загл. с экрана.
2. Робототехнические мехатронные системы: [Электронный ресурс] : [учебник] / О.Д.Егоров, Ю.В.Подураев, М.А.Буйнов. – ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2015. – 326с. - 1 файл. - Режим доступа: <http://ed.donntu.org/books/17/cd6752.pdf> - Загл. с экрана.

Дополнительная

3. Роботизированные технологические комплексы и гибкие производственные системы в машиностроении. Альбом схем и чертежей. Под общ. Редакцией Соломенцева Ю.М.- М.:Машиностроение, 1989. – 120с.
4. Спыну Г.А. Промышленные роботы. Конструирование и применение: Учебное пособие, 2-ое издание – К.: Высшая школа, 1991. – 311с.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РОБОТА № 4

Кинематический анализ промышленных роботов

Цель работы: приобретение знаний и умений проведения кинематического анализа промышленных роботов.

Задачи работы:

1. Ознакомление с методами решения кинематического анализа промышленных роботов.
2. Ознакомление с особенностями решения прямой задачи кинематики промышленных роботов.
3. Ознакомление с особенностями решения обратной задачи кинематики промышленных роботов.
4. Анализ полученных зависимостей при проведении кинематического анализа промышленных роботов

5. Кинематический анализ промышленных роботов

При изучении кинематических свойств многозвенных механизмов возникает необходимость описания движения звеньев без учета их масс и действующих на них сил. Конструкция манипуляторов чаще всего представляет собой сочленение N звеньев, состоящих из кинематических пар 5 порядка (характеризуются наличием 1 степени свободы). Тогда положение i звена относительно $i-1$ звена манипулятора может быть описано через обобщенный параметр:

$$q_i = \Delta_i * \alpha_i + (1 - \Delta_i) * S_i,$$

где Δ_i – показатель i кинематической пары. Для вращательного движения $\Delta_i = 1$, для поступательной пары – 0.

α_i – угол поворота i звена манипулятора относительно $i-1$ звена при наличии вращательной кинематической пары,

S_i - относительное поступательное перемещение i звена относительно $i-1$ звена при наличии поступательной кинематической пары.

Определение взаимного положения звеньев манипулятора сводится к задаче преобразования одной системы координат в другую, рис.4.1. Такое

преобразование выполняется при помощи специальных матриц размером 4 x 4. Эти матрицы носят название матриц винтовых смещений.

В формуле 4.1 обозначено: B_k – условное обозначение матрицы винтового смещения, параметрами которой являются угловое и линейное перемещение, соответствующие K -той оси системы координат.

α, β, γ – углы поворота звена относительно одной из осей x, y, z соответствующей системы координат,

S_x, S_y, S_z – линейные смещения вдоль осей X, Y, Z соответственно.

При наличии только одного параметра, например углового перемещения α вдоль оси x первая матрица винтового смещения преобразуется к виду

$(S_x = 0)$.

$$B_x(\alpha, S_x) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & S_x \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$B_y(\beta, S_y) = \begin{vmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & S_y \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$B_z(\gamma, S_z) = \begin{vmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & S_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

При наличии только одного параметра, например углового перемещения α вдоль оси x первая матрица винтового смещения преобразуется к виду

$(S_x = 0)$.

При наличии только поступательного перемещения вдоль оси X эта же матрица преобразуется к виду:

$$B_x(\alpha, 0) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \end{vmatrix}$$

Результирующая матрица перехода $A_i(q_i)$ между системами координат двух соседних звеньев в общем виде может быть записана в виде:

$$A_i(q_i) = B_k(\alpha_i, 0) * B_k(0, S_i) \quad (4.2)$$

$$B_x(0, S_x) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & S_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}$$

При этом вращательное и поступательное движения могут быть в разных осях координат.

Матрицы (7.1) – есть матрицы перехода от i системы координат, связанной с i звеном, к $(i-1)$ системе координат $(i-1)$ звена.

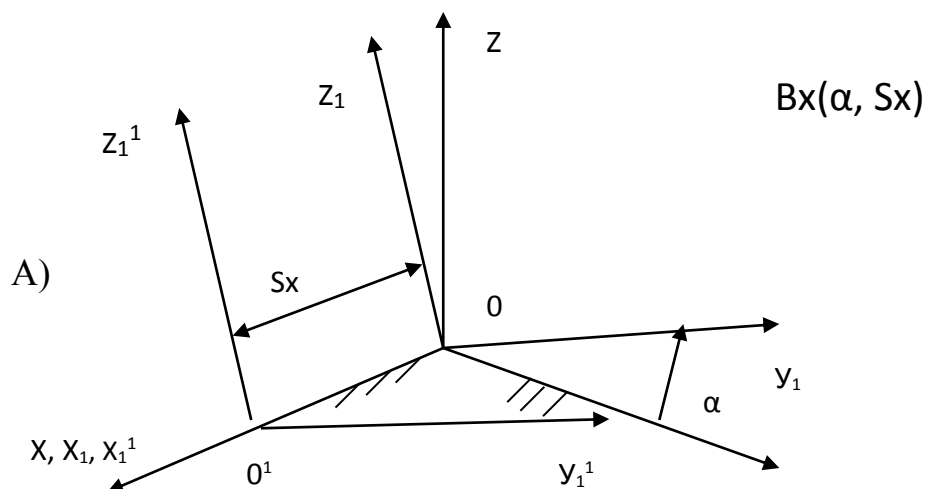
$$\overline{r_{i-1}} = A_i * \overline{r_i}$$

где r_{i-1}, r_i – радиус -вектор точки пространства в системе координат $(i-1)$ и i , соответственно.

Обратный переход от $(i-1)$ системы координат к i системе координат запишется в виде:

$$\overline{r_i} = A_i^{-1} * \overline{r_{i-1}}$$

где A_i^{-1} – обратная результирующая матрица, которая определяется с помощью обратных матриц $B_x^{-1}(\alpha, S_x), B_y^{-1}(\beta, S_y), B_z^{-1}(\gamma, S_z)$.



$$B_x(\alpha, S_x) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & -S_x \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \end{vmatrix}$$

$$B_y(\beta, S_y) = \begin{vmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -S_y \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \end{vmatrix}$$

$$B_z(\gamma, S_z) = \begin{vmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -S_y \end{vmatrix}$$

Прямая задача кинематики заключается в следующем: необходимо найти матрицу r_0 (радиус – вектор), которая определяет координаты захватного устройства робота в пространстве относительно неподвижной системы координат (обычно с основанием манипулятора) при известных конструктивных параметрах робота и значений обобщенных параметров q_i для всех кинематических пар.

В качестве примера рассмотрим решение прямой задачи кинематики в общем виде для манипулятора, работающего в сферической системе координат, рис.7.2.

Система координат $0X_0Y_0Z_0$ ($i = 0$) является неподвижной и условно связана с неподвижным основанием манипулятора. Система координат $i = 1$ связана с поворотной стойкой. Она обеспечивает поворот манипулятора относительно оси O_0Z_0 на угол θ . Система координат с индексом $i = 2$ связана с рукоятью 2. Рукоять может поворачиваться относительно горизонтальной оси шарнира на угол φ . Система координат с индексом $i = 3$ связана с выдвигным элементом 3. Точка O_3 условно совпадает с захватным устройством манипулятора.

Рассмотрим связь систем координат с индексами 0 и 1.

$$\overline{r}_0 = B_z(\Theta, v)^* \overline{r}_1,$$

или

$$\overline{r}_1 = B_z^{-1}(\Theta, v)^* \overline{r}_0,$$

где

$$B_y(\Theta, v) = \begin{vmatrix} \cos\Theta & -\sin\Theta & 0 & 0 \\ \sin\Theta & \cos\Theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & v \end{vmatrix}$$

Аналогично связь систем координат с индексом 1 и 2 описывается уравнениями:

$$\overline{r_1} = B_y(\varphi, 0)^* \overline{r_2},$$

или

$$\overline{r_2} = B_y^{-1}(\varphi, 0)^* \overline{r_1},$$

где

$$B_y(\beta, S_y) = \begin{vmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -S_y \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \end{vmatrix}$$

Переход к системе координат с индексом 3 осуществляется через поступательное перемещение на величину l вдоль оси O_2X_2 . Она представляет собой постоянную часть l_0 и переменную Δl .

$$\overline{r_2} = B_x(0, l)^* \overline{r_3},$$

или

$$\overline{r_3} = B_x^{-1}(0, l)^* \overline{r_2},$$

где

$$B_x(0, l) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & l_c + \Delta l \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}$$

Здесь радиус-вектор r_3 может характеризоваться как единичный радиус-вектор, который описывает систему координат схвата робота.

$$r_3^T = \{1, 1, 1, 1\}$$

Объединим уравнения

$$r_0 = B_z(\Theta, \psi)^* B_y(\varphi, 0)^* B_x(0, l)^* \overline{r_3},$$

Перемножим матрицы. Получим

$$\overline{r_0} = \begin{vmatrix} \cos\theta\cos\varphi & -\sin\theta & \cos\theta\sin\varphi & (l_c + \Delta l)\cos\theta\cos\varphi \\ \sin\theta\cos\varphi & \cos\theta & \sin\theta\cos\varphi & (l_c + \Delta l)\sin\theta\cos\varphi \\ -\sin\varphi & 0 & \cos\varphi & \psi - (l_c + \Delta l)\sin\varphi \end{vmatrix} \overline{r_3}$$

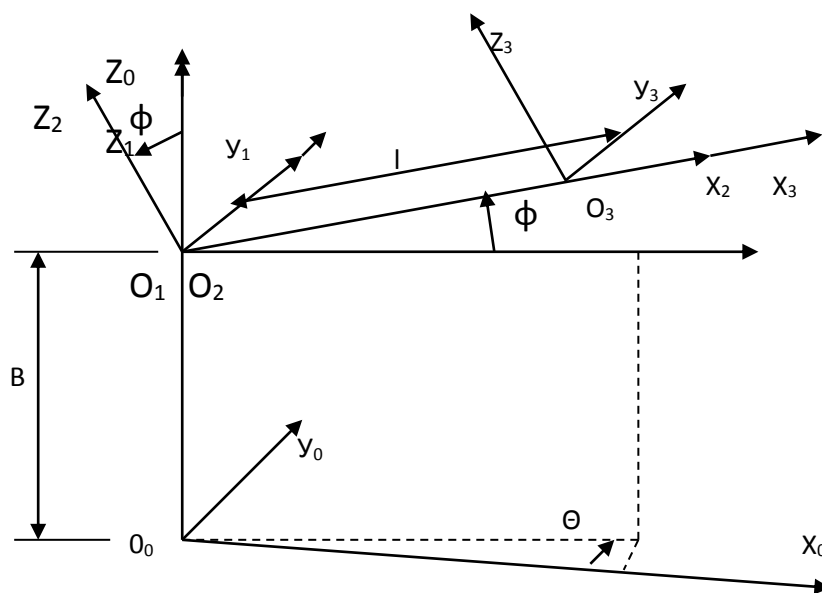
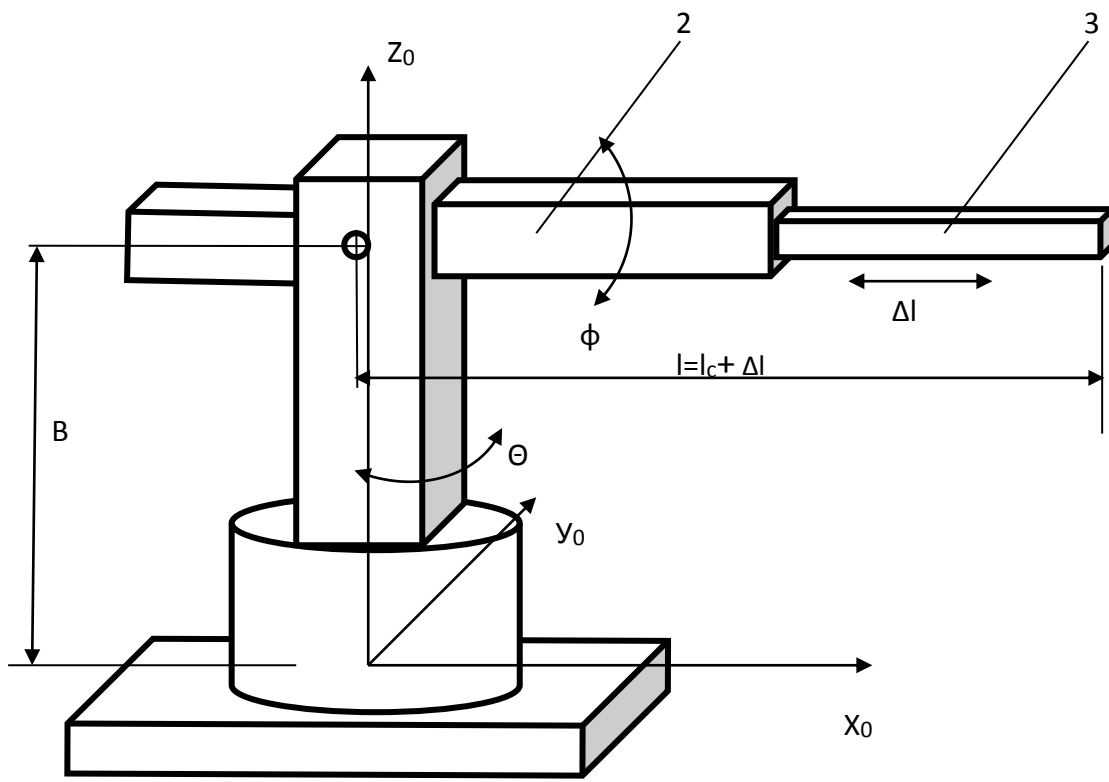


Рис. 4.2 – Кинематическая схема манипулятора (а) и системы его координат (б)

4.1 Использование однородных преобразований в кинематике

В полученной матрице можно выделить матрицу размерностью 3 x 3 (отмечено пунктиром) . Она является матрицей направляющих косинусов и определяет ориентацию системы координат $O_3X_3Y_3Z_3$ в пространстве относительно базовой системы координат $O_0X_0Y_0Z_0$. Последний столбец матрицы является координатами точки O_3 в пространстве базовой системы координат. Координаты захватного устройства можно записать:

$$\begin{aligned} X &= (l_c + \Delta l) \cos \Theta \cos \varphi, \\ Y &= (l_c + \Delta l) \sin \Theta \cos \varphi, \\ Z &= b - (l_c + \Delta l) \sin \varphi \end{aligned} \quad (4.3)$$

В рассмотренном примере обобщенными параметрами q_i являются величины Θ , φ , Δl , величины b и l_c являются конструктивными параметрами манипулятора.

Таким образом, решение прямой задачи кинематики манипулятора с N звеньями можно выразить в виде:

$$r_0 = A_1(q_1) * \dots * A_i(q_i) * \dots * A_r(q_r) \overline{r}_r, \quad (i=1, 2, r)$$

где A_i – связь i системы координат звена с $(i-1)$ системой координат с учетом наличия вращательной или поступательной пары, или их комбинации.

Обратная задача кинематики – состоит в следующем: по известной матрице r_0 захватного устройства манипулятора в пространстве необходимо определить значение обобщенных координат q_i . Анализ уравнения (4.3) показывает, что поиск координат Θ , φ , Δl при известных значениях x, y, z не является простым и однозначным, т.к. уравнения нелинейные. Решение задачи может быть получено методами итерационного исчисления. Например, согласно методу Ньютона последовательные приближения искомых корней α, β, γ системы трех нелинейных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} F_1(\alpha, \beta, \gamma) &= 0, \\ F_2(\alpha, \beta, \gamma) &= 0, \\ F_3(\alpha, \beta, \gamma) &= 0, \end{aligned} \right\}$$

Вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned} \alpha_{k+1} &= \alpha_k - \Delta_1/J, \\ \beta_{k+1} &= \beta_k - \Delta_2/J, \\ \gamma_{k+1} &= \gamma_k - \Delta_3/J, \end{aligned} \quad (4.4)$$

где $\alpha_k, \beta_k, \gamma_k$ – начальные ($k=1$) значения корней α, β, γ . Они могут быть определены ориентировочно (графически, прикидкой и т.д.).

$\alpha_{k+1}, \beta_{k+1}, \gamma_{k+1}$ – уточненные значения корней α, β, γ .

J – якобиан рассматриваемой системы уравнений.

$$J = \begin{vmatrix} \partial F_1 / \partial \alpha & \partial F_1 / \partial \beta & \partial F_1 / \partial \gamma \\ \partial F_2 / \partial \alpha & \partial F_2 / \partial \beta & \partial F_2 / \partial \gamma \\ \partial F_3 / \partial \alpha & \partial F_3 / \partial \beta & \partial F_3 / \partial \gamma \end{vmatrix}$$

где $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ – величины, которые определяются по формулам:

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} F_1 & \partial F_1 / \partial \beta & \partial F_1 / \partial \gamma \\ F_2 & \partial F_2 / \partial \beta & \partial F_2 / \partial \gamma \\ F_3 & \partial F_3 / \partial \beta & \partial F_3 / \partial \gamma \end{vmatrix}$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} \partial F_1 / \partial \alpha & F_1 & \partial F_1 / \partial \gamma \\ \partial F_2 / \partial \alpha & F_2 & \partial F_2 / \partial \gamma \\ \partial F_3 / \partial \alpha & F_3 & \partial F_3 / \partial \gamma \end{vmatrix}$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} \partial F_1 / \partial \alpha & \partial F_1 / \partial \beta & F_1 \\ \partial F_2 / \partial \alpha & \partial F_2 / \partial \beta & F_2 \\ \partial F_3 / \partial \alpha & \partial F_3 / \partial \beta & F_3 \end{vmatrix}$$

Вычисление корней (4.4) происходит до условия, когда поправки $\Delta_1/J, \Delta_2/J, \Delta_3/J$, будут меньше принятой точности вычислений.

При решении обратной задачи кинематики могут определяться значения обобщенных координат при перемещении захватного устройства манипулятора в пространстве, например по прямой из точки А с координатами X_a, Y_a и Z_a в точку В с координатами X_b, Y_b , и Z_b . Перемещение захвата из точки А в точку В должно содержать фазу разгона с ускорением \mathbf{a} , фазу постоянной скорости \mathbf{V}_c и фазу торможения таким образом, чтобы в точках А и В скорость была равна 0.

Литература

Основная:

1. Промышленные роботы: основные типы и технические характеристики: [Электронный ресурс] : [учеб. пособие] / Ю.Г.Козырев. – М.: КНОРУС, 2017.- 560с. - 1 файл. - Режим доступа: <http://ed.donntu.org/books/19/cd9434.pdf>. - Загл. с экрана.

Учебно-методические издания, разработанные в ГОУВПО ДОННТУ:

2. Горобец И.А. Промышленная робототехника. Механические системы манипуляторов .- Донецк, ДонНТУ, 2001.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РОБОТА №5

Рабочие органы промышленных роботов. Схемы конструкций, кинематика рабочих органов

Цель работы: Получение навыков анализа схем и расчета захватных устройств промышленных роботов

Задачи работы:

1. Ознакомление с классификацией и техническими характеристиками рабочих органов промышленных роботов.
2. Ознакомления с методикой и параметрами расчетов захватных и притяжных схватов.
3. Изучение особенностей адаптивных захватных устройств.

К рабочим органам ПР относятся **захватные устройства (ЗУ)**, предназначенные для взятия и удержания детали или изделия.

При обслуживании одним промышленным роботом нескольких единиц оборудования возможно применение широкодиапазонных ЗУ или с автоматической заменой элементов ЗУ (особенно если одновременно обрабатываются заготовки (детали) различных конфигурации и массы.) Поэтому к захватным устройствам ПР, работающих в условиях серийного производства, предъявляются дополнительные требования: широкодиапазонность (возможность захвата и базирования деталей в широком диапазоне их масс, размеров), обеспечение захвата близко расположенных деталей, легкость и быстрота замены. В ряде случаев необходимо автоматическое изменение усилия удержания объекта в зависимости от его массы.

В роботах часто применяются технологические рабочие органы, предназначенные для выполнения конкретных технологических процессов. К ним относятся, например:

- клешни для контактной точечной сварки,
- горелка для дуговой сварки плавлением,
- распылитель для окраски и т.д.

5.1 Классификация рабочих органов

Классификация основных типов рабочих органов приведена на рис.5.1.

Зажимные ЗУ удерживают деталь благодаря кинематическому воздействию рабочих элементов (губок, пальцев, клещей и т. д.) с помощью сил трения или запирающих усилий [1,2,3].

Притяжные ЗУ обеспечивают силовое воздействие на объект благодаря использованию различных физических принципов. Наиболее распространены вакуумные и магнитные ЗУ.

Рабочие органы ПР в зависимости от их назначения могут оснащаться дополнительными приспособлениями для выполнения ориентирующих перемещений и некоторых технологических операции (гайковертом, сверлильным устройством и др.).

По числу рабочих позиций хватные устройства делятся на **однопозиционные** и **многопозиционные**, а по характеру управления — на следующие четыре группы.

1. **Неуправляемые ЗУ** с постоянными магнитами или вакуумными присосками без принудительного разрежения. В таком ЗУ для снятия объекта требуется приложить большее усилие, чем для его удержания.
2. **Командные ЗУ** управляются только по командам на захват или отпускание объекта. К ним относятся устройства с пружинным приводом, которые оснащаются стопорным механизмом, срабатывающим через такт.
3. **Жестко программируемые ЗУ** управляются системой числового программного управления промышленным роботом. Перемещение губок, взаимное расположение рабочих элементов и усилие зажима а таких устройствах изменяются в зависимости от заданной программы, по которой может осуществляться также управление работой вспомогательных технологических приспособлений.
4. **Адаптивные ЗУ** — программируемые устройства, оснащенные различными датчиками внешней информации (формы изделия и состояния поверхности, массы объекта, усилия зажима и т. п.)

По характеру крепления к руке промышленного робота все хватные устройства можно разделить на четыре группы:

1. **несменяемые** — являющиеся неотъемлемой частью конструкции робота, замена которых не предусмотрена;
2. **сменные** — самостоятельные узлы с базовыми поверхностями для крепления к руке робота (крепление таких устройств, например фланцевое с помощью болтов, не предусматривает их быстрой замены);
3. **быстросменные**, а в общем виде — рабочие органы крепятся с помощью специальных механизмов, как например, байонетный замок, и могут быстро заменяться;
4. **автоматически заменяемые** — оборудуются механизмами, позволяющими осуществить их автоматическую замену.

5.2 Технические характеристики ЗУ

Технические характеристики хватных устройств делятся на четыре группы. В первую группу объединяются показатели, общие для всех типов хватных устройств, во-вторую показатели схватов, в третью – вакуумных хватных устройств, в четвертую – магнитных хватных устройств.

Номенклатуру технических характеристик составляют следующие

показатели:

1. Номинальная грузоподъемность, кг.
2. Усилие захватывания, Н.
3. Предельные значения приложенных сил и моментов, Н или Нм (указываются предельные значения приложенных сил и моментов по трем осям прямоугольной системы координат - захватного устройства).
4. Время захватывания, с.
5. Время отпускания, с.
6. Средняя наработка на отказ, ч.
7. Масса, кг.
8. Габаритные размеры, мм.
9. Эксплуатационные показатели схватов.
 - 9.1. Кинематическая схема.
 - 9.2. Усилие на выходном звене привода, Н.
 - 9.3. Максимальное перемещение выходного звена привода, мм.
 - 9.4. Давление рабочего тела привода, МПа.
 - 9.5. Напряжение питания, В.
10. Эксплуатационные показатели вакуумных захватных устройств.
 - 10.1. Размеры контактной площади присоски, мм.
 - 10.2. Номинальное давление в полости присоски, МПа.
11. Эксплуатационные показатели магнитных захватных устройств.
 - 11.1. Число ампер-витков.
 - 11.2. Размеры площади контакта, мм².
 - 11.3. Напряжение питания, В.

5.3. Зажимные захватные устройства

При конструировании зажимных ЗУ промышленных роботов необходимо учитывать конкретный тип детали или группы деталей, их форму, материал и условия технологического процесса. Важные критерии при этом — необходимая точность удержания детали и допустимое усилие на губках. Привод зажимных устройств осуществляется, как правило, с помощью пневматического или пневмогидравлического привода, расположенного в их основании

Эластичное зажимное ЗУ предназначено для захвата и удержания легкодеформируемых изделий (например, электрической лампы) и отличается от остальных механических ЗУ. Это устройство приводится в действие давлением воздуха.

Расчет зажимных захватных устройств включает:

- нахождение сил, действующих в местах контакта заготовки и губок;
- определение усилий привода;
- проверку отсутствия повреждений поверхности детали при захватывании;
- расчет на прочность деталей устройств (по методикам расчета

деталей машин).

Силы, действующие в местах контакта захватного устройства с объектами манипулирования, рассчитываются по формулам табл. 5.1 [1,2,3].

Различают следующие схемы удержания объектов в механическом ЗУ:

— деталь поддерживается губками; силы трения мало влияют на механизм удержания детали (схема 3 табл.5.1);

— деталь удерживается благодаря запирающему действию губок при ограниченном влиянии сил трения (схема 4 табл. 5.1);

— деталь удерживается силами трения (схемы 2 и 5 табл. 5.1).

На практике обычно встречается сложное нагружение захватных устройств, при котором имеет место комбинация описанных случаев (см. схему 2 табл. 5.1). В процессе манипулирования объектом характер нагрузки ЗУ и схемы удержания детали могут изменяться. Поэтому расчет должен вестись для критического случая нагружения. В случае несимметричного распределения нагрузок по ширине губок нагрузка на крайние сечения определяется в соответствии со схемой 1 табл. 5.2.

В общем случае усилие, развиваемое приводом ЗУ, определяется по формуле

$$F = \frac{K_1 K_2 \sum_{i=1}^m P_i}{\eta}; \quad (5.1)$$

где K_1 — коэффициент запаса ($K_1 = 2...3$); K_2 — передаточный коэффициент механизма; P_i — усилие зажима на i -й губке; m — число губок захвата; η — коэффициент полезного действия механизма.

Для симметричных губок усилие, развиваемое приводом, определяется по формуле:

$$F = \frac{2K_1 K_2 P}{\eta}. \quad (5.2)$$

Усилие зажима на i -й губке схвата можно рассчитать по формуле:

$$P_i = \sum_{i=1}^k N_i \cos \varphi_i, \quad (5.3)$$

где N_i — усилие контактирования, определяемое по формулам табл. 10.2;

φ_i — угол контакта; k — число точек контакта.

Коэффициент K_2 рассчитывается в соответствии с выбранной типовой схемой захватного устройства (см. табл.)

Таблица 5.1 Типы зажимных устройств и их расчетные схемы

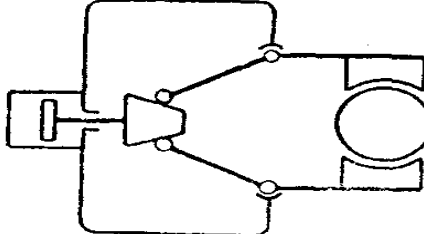
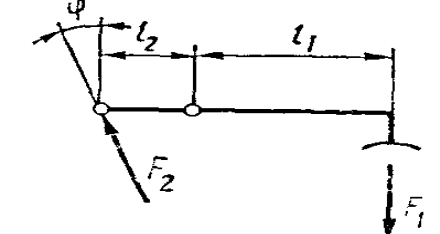
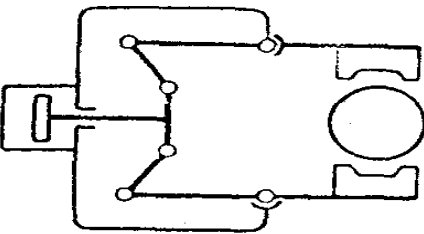
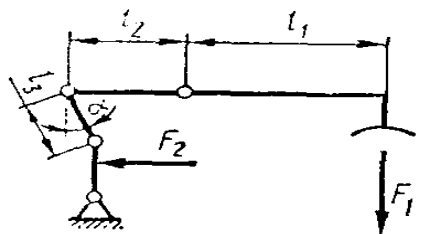
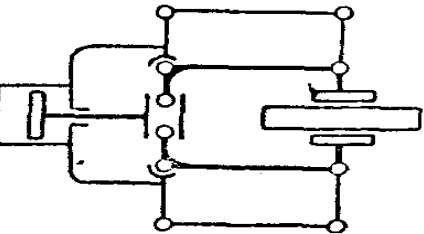
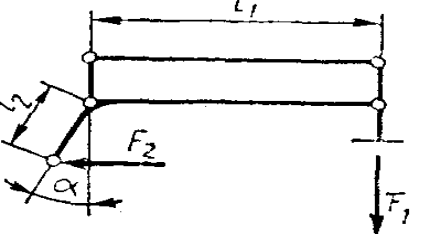
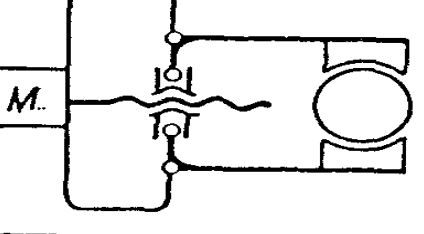
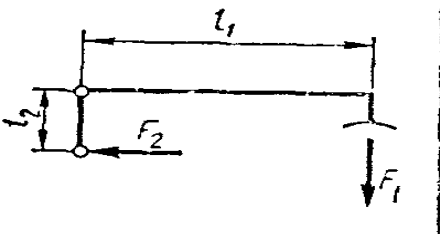
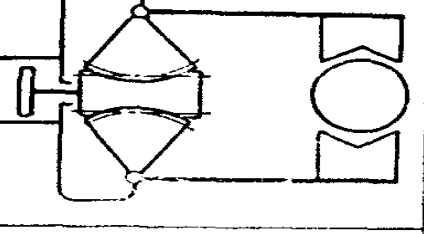
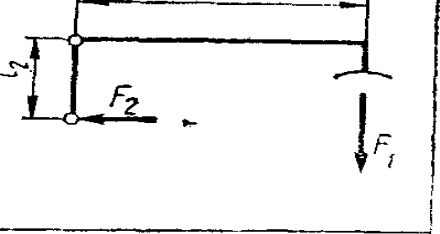
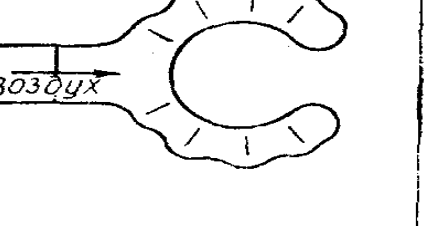

Тип ЗУ	Схема ЗУ	Расчетная схема
Клиновое		
Рычажное		
Рычажное с параллельным перемещением губок		
Винтовое		
Реечное		
Эластичное		

Таблица 5.2 Схемы и расчетные формулы зажимных захватных устройств

Расчетная схема		Расчетные формулы
№ п/п	Эскиз	
1		<p>Для а</p> $R_1 = \frac{l-c}{l} Q$ $R_2 = \frac{c}{l} Q$ <p>Для б</p> $R_1 = \frac{l+c}{l} Q$ $R_2 = -\frac{c}{l} Q$
2		$N_i = \frac{(-R_n) \sin(\varphi_j - \varphi_k)}{\mu [\sin(\varphi_1 - \varphi_2) + \sin(\varphi_2 - \varphi_3) + \sin(\varphi_3 - \varphi_1)]}$ <p>где $i, j, k = 1, 2, 3; i \neq j \neq k$</p>
3		$N_i = \frac{R_n \sin(\varphi_j - \mu \cos \varphi_j)}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2) - 2\mu \cos(\varphi_1 + \varphi_2)}$ <p>где $i, j = 1, 2; i \neq j$</p>
4		$\varphi_1 = 90^\circ, \varphi_2 = \varphi$ $N_1 = R_n \frac{\sin \varphi - \mu \cos \varphi}{\cos \varphi + 2\mu \sin \varphi}$ $N_2 = R_n \frac{1}{\cos \varphi + 2\mu \sin \varphi}$
5		$\varphi_1 = \varphi_2 = 90^\circ$ $N_1 = N_2 = \frac{R_n}{2\mu}$

5.4 Притяжные захватные устройства

Вакуумные захватные устройства. Для удержания стеклянных и хрупких предметов, как, например, кинескоп телевизора, применяют вакуумные захватные устройства (рис. 5.1). Резиновый раструб в них укреплен на шаровом соединении, обеспечивающем самоустановку и плотное прилегание по всему контуру. Основным параметр — усилие F захвата — зависит от площади S контакта с объектом и разрежения (давления) p , Па.

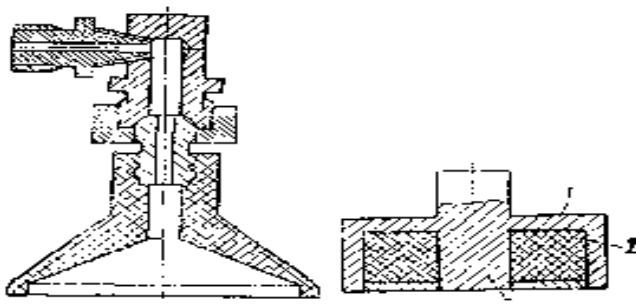


Рис. 5.1 Конструкция вакуумного захватного устройства.

Рис. 5.2 Конструкция круглого электромагнитного захватного устройства

Усилие F , Н, определяют по формуле:

$$F = \frac{\pi D^2}{4} p, \dots \dots \dots (5.4)$$

где D — диаметр отверстия раструба, см.

Пример. Если с одной стороны схвата будет полное атмосферное давление, а с другой — разрежение в 13 Па, т. е. форвакуум, то при диаметре отверстия раструба $D = 10$ см получим:

$$F = \frac{\pi 10^2}{4} (980066 - 13) = 78,5 \cdot 98053 \approx 770 \text{ Н.}$$

Следует отметить, что добиваться высокого вакуума нецелесообразно, так как после получения форвакуума усилие F увеличивается незначительно.

Электромагнитные захватные устройства используют для захвата объектов из магнитных материалов. Эти ЗУ обладают рядом преимуществ: несложны при конструировании и в эксплуатации, не требуют специальных приводов, могут захватывать листовый материал в стопке.

Наибольшее распространение получили круглые электромагнитные ЗУ (рис. 5.2). Они состоят из корпуса 1 и сердечника 3 из электротехнической стали, образующих кольцевую полость, в которую помещена катушка 2 .

Усилие F захвата электромагнитов может быть определено с помощью выражений, полученных на основании формулы Максвелла:

для электромагнитов постоянного тока:

$$F = \frac{1}{2} (IN)^2 \mu_0 \frac{S}{\delta^2}; \quad (5.5)$$

для электромагнитов переменного тока:

$$F = \frac{1}{4} (IN)^2 \mu_0 \frac{S}{\delta^2}; \quad (5.6)$$

где I — сила тока, А; N — число витков катушки; μ_0 — магнитная проницаемость воздуха, Гн/м; S — площадь рабочего зазора, см²; δ — рабочий зазор, мм.

5.5 Сменные схваты и устройства автоматической замены схватов

В настоящее время в серийных роботах используются сменные устройства схватов различных уровней [1, 3,4].

1. **Сменными** являются рабочие органы целиком (если хватные устройства, то вместе с приводом рис. 5.3а). При этом появляется возможность вводить в комплект схваты с двигателями, имеющими различные энергетические характеристики и значения хода выходного звена. Включать в захваты устройства, имеющие другие принципы действия (электромагнитные, вакуумные). Если робот используется как технологический, то предусматриваются сменные рабочие органы (например, сварочные клещи), если как измерительный — то измерительный преобразователь. Основным недостатком способа замены всего рабочего органа является громоздкость заменяемого блока.

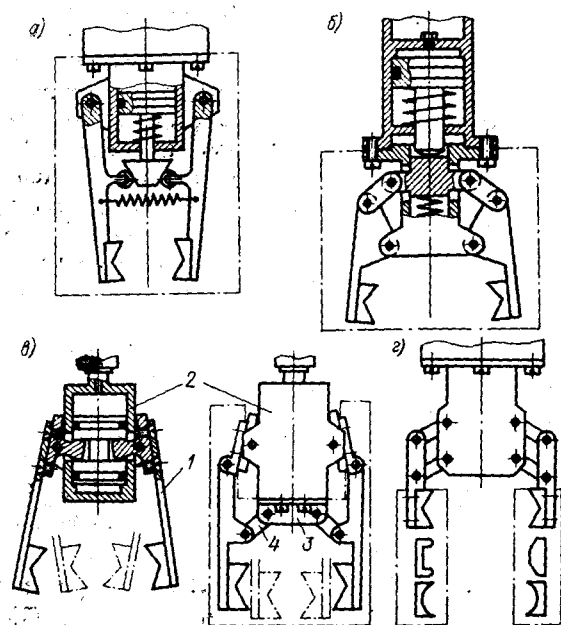


Рис. 5.3 Схема сменных схватов

2. **Сменными** являются механизмы схвата (рис. 5.3, б), а двигатель (обычно пневмоцилиндр) остается несменным. При этом принцип действия схвата остается тем же, но можно выбором механизма передачи задавать различные направления перемещений рабочих элементов, увеличивать диапазон раскрытия схвата. При смене схвата не возникает трудностей, связанных со стыковкой силовых магистралей; вследствие этого не снижается надежность соединений и уплотнений.

3. **Сменными** являются звенья механизма схвата. На рис. 5.3, в показано, как заменой рычагов 1, совершающих качательное движение, другими и установкой крышки 3 с серьгами 4 на корпусе 2 схвата можно изменить кинематику схвата и

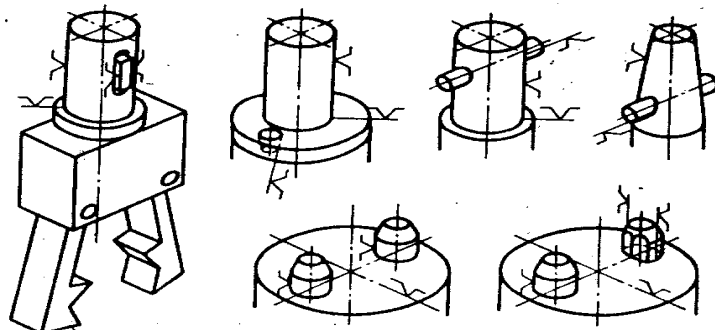
обеспечить плоскопараллельное схождение рабочих элементов.

4. **Сменными** являются рабочие элементы (рис. 5.3, з). При этом обеспечивается приспособляемость схвата к форме поверхности предмета.

Замена ЗУ может осуществляться вручную, автоматизированно и автоматически. Возможность замены ЗУ в принципе предусматривается в большинстве выпускаемых ПР. Для обеспечения такой возможности осуществляются стандартизация и унификация типов соединений и присоединительных размеров ЗУ (ГОСТ 26063—84). К настоящему времени разработано немало конструкций быстросменных схватов, узлы крепления которых позволяют соединять схваты с рукой робота простейшими движениями, и часто без применения специального инструмента.

В роботах, предназначенных для работы в гибких производственных системах, замена ЗУ должна осуществляться автоматически. При проектировании ПР с автоматической заменой ЗУ наибольшие сложности вызывает конструирование достаточно простых и надежных узлов стыковки ЗУ с рукой ПР.

Рис. 5.4 Схема соединений схватов ПР



При проектировании узлов стыковки в первую очередь должны решаться три вопроса: задание баз для сменных схватов, обеспечение установки на базы и надежное закрепление при базировании. Основные схемы базирования представлены на рис. 5.4. Базирующими могут быть такие сочетания поверхностей: плоскость и "поверхности двух штифтов, плоскость и поверхности плоского выступа, конус и поверхности продольного выступа, в плоскости пирамиды.

Наиболее сложной является задача закрепления (удерживания, фиксирования) при базировании ЗУ, соединенного с рукой робота. Так при использовании упругих элементов — пружин — усилие создается за счет их поджатия или растяжения при работе приводов ПР, когда хвостовик схвата, находящегося в гнезде, взаимодействует с перемещающейся приводами ответной частью, рис.5.5. Фиксирование хвостовика схвата происходит в

фигурном пазе, вырезанном в корпусе. На первом этапе движения поджимается пружина, она осуществляет фиксирование в конечном положении. Закрепление и освобождение осуществляются при относительно небольших усилиях (моментах), которые развиваются двигателями основных приводов ПР

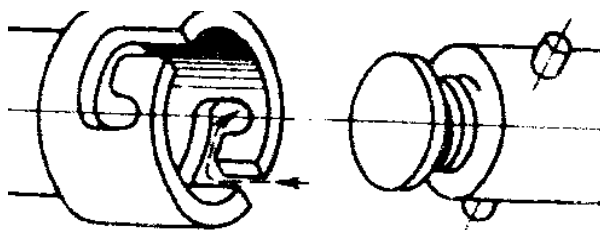


Рис. 5.5- Схема байонетного соединения.

Для быстроразъемных соединений в качестве фиксирующих элементов часто применяются различные защелки. Клиновые защелки при действии продольных сил обеспечивают поджатие хвостовика схвата к ответной части, поскольку направление перемещения защелки выбирается всегда перпендикулярным к основному относительному перемещению соединяемых деталей. Источниками продольных перемещений защелок и необходимых усилий поджатия могут быть пружины или специальные управляемые силовые элементы (маломощные пневмоцилиндры, мембранные приводы, электромагниты). Силовые элементы могут быть расположены на руке ПР, на сменном схвате, на приспособлении, в котором происходит смена схвата.

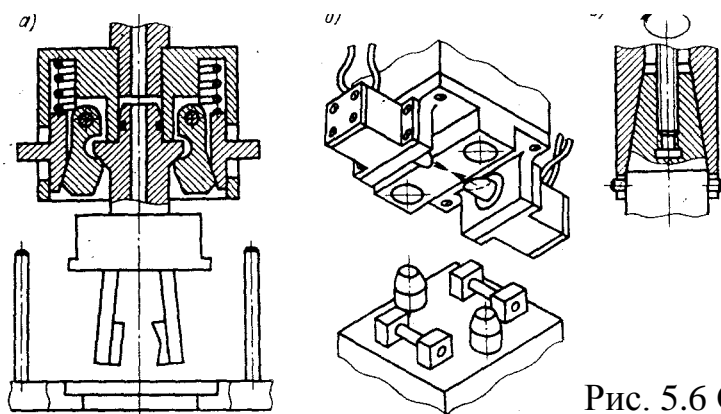


Рис. 5.6 Схема соединений схватов ПР

Наиболее удобными в эксплуатации являются устройства, в которых защелка переключается то в одно, то в другое положение при последовательных нажатиях руки на схват.

Имеются также конструкции сменных схватов, удерживание которых осуществляется с помощью электромагнита или вакуумной камеры. Удерживающая способность таких узлов ограничена.

В настоящее время распространение получили сменные схваты с самостоятельными приводами (чаще всего — пневматическими). Некоторые варианты схем изображены на рис. 5.6. Чаще всего основание сменного схвата подтягивается к руке и прижимается к базовой плоскости продольной силой, создаваемой двигателем. Прижимы, через которые передается сила, могут быть расположены как снаружи, так и внутри. Подтягивание и прижатие к базовой плоскости могут осуществляться с помощью винта, вращаемого поворотным двигателем, или от пневмоцилиндра через специальную передачу. Продольная сила может создаваться клиновой передачей.

5.6 Адаптивные захватные устройства

В ряде случаев манипулятор требуется оснащать датчиками внешней информации: о наличии объекта манипулирования, его форме, размерах, массе, состоянии поверхности, усилие его удержания, степени возможного проскальзывания и т.п. Часто наилучшим местом установки датчиков является ЗУ. В зависимости от сложности и характера решаемых задач конструкция адаптивных ЗУ может быть различной [1,4,5].

На рис. 5.7 а показаны общий вид и схема экспериментального антропоморфного трехпалого ЗУ. Фаланги пальцев трубчатые. Движения передаются через пропущенные внутри пальцев тросики, что делает конструкцию компактной. Фаланги сгибаются на $\pm 45^\circ$ в каждом шарнире, поэтому рабочая зона ЗУ больше, чем у человеческой руки при той же длине пальцев. 11 степеней подвижности трехпалой кисти обеспечивается благодаря двигателям постоянного тока которые объединены в общий блок и вынесены за пределы ЗУ. Согласованность движений пальцев осуществляется следующим: движения ряда приводов программируются, а остальные управляются по усилиям.

Экспериментальное адаптивное ЗУ МН – 1 показано на рисунке 5.7, б. На наружных сторонах его губок установлены шесть тактильных датчиков 3, построенных на основе микропереключателей. С их помощью фиксируется соприкосновение ЗУ с объектом. На внутренней поверхности губок, на их концах и на рычаге 1 между губками установлено 17 потенциометрических датчиков давления 2,4 и 6. Два фотодиода 5 обеспечивают локацию объекта и наведение ЗУ на него. ЗУ использовалось в экспериментах по поиску, опознаванию и сборке объектов.

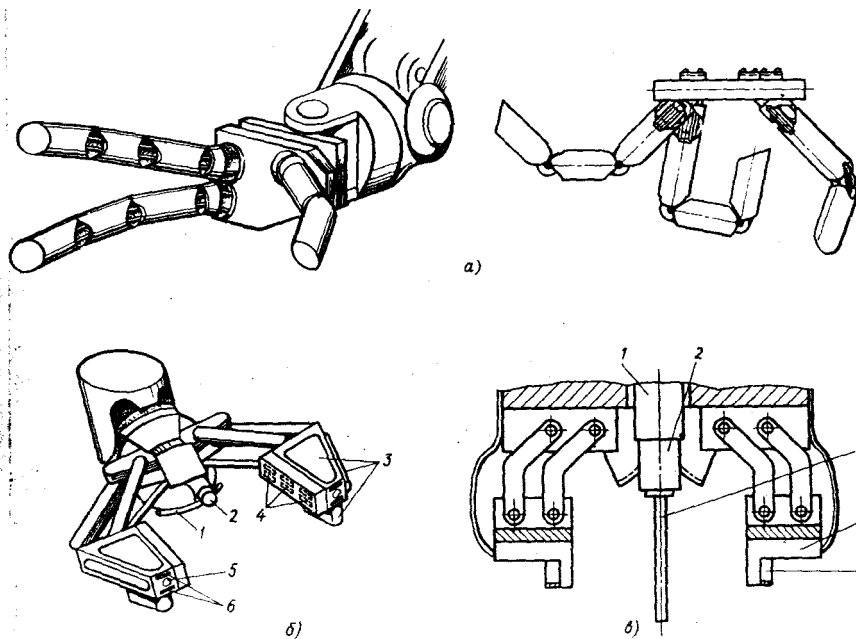


Рис.5.7- Схема конструкций адаптивных захватных устройств

В ЗУ экспериментального ПР, разработанного ЭНИМСом (рис. 5.7, в), предусмотрен выдвижной элемент 1, несущий силовой датчик 2, соединенный с щупом 3. В торцах зажимных губок 4 помещены фотодальномеры 5. ЗУ обеспечивает захватывание неориентированно расположенных деталей типа плоских дисков. Сначала при раскрытых губках и выдвинутом штыре 3 проводится сканирование поля расположения деталей. При соприкосновении щупа 3 с деталью с помощью датчика 2 определяется ее положение путем нахождения направления нормали к цилиндрической поверхности объекта. Затем ЗУ выводится на центр диска и поворачивается вокруг продольной оси руки ПР, при этом фотодальномеры находят свободные участки наружной поверхности детали, которые могут быть использованы для ее захватывания.

Адаптивные ЗУ широко применяют при автоматизации сборочных операций.

5.5 Контрольные вопросы

1. Для чего используют вакуумные захватные устройства?
2. Для чего используют электромагнитные захватные устройства?
3. Перечислить варианты сменных механизмов захватных устройств.
4. Характеризовать варианты сменных механизмов захватных устройств.

5. Какие требования предъявляются к схватам роботов, работающих в гибких автоматизированных производствах?
6. Указать особенности конструкции байонетного соединения.
7. Привести особенности конструкции адаптивных захватных устройств.

Литература

Основная:

1. Захватные устройства и инструменты промышленных роботов : учебное пособие / Ю.Г. Козырев. — М. : Кнорус, 2011. — 312 с.: ил.
2. Роботизированные технологические комплексы и гибкие производственные системы в машиностроении. Альбом схем и чертежей. Под общ. Редакцией Соломенцева Ю.М.- М.:Машиностроение, 1989. – 120с.
3. Захватные устройства промышленных роботов. Учебное пособие / К.А. Украженко, Ю.В. Янчевский, А.А. Кулебякин, А.Ю. Торопов. – Ярославль : Изд-во ЯГТУ, 2007. - 83 с. ISBN 5-230-20645-4
4. Челпанов И.Б., Колпашников С.Н. Схваты промышленных роботов. – Л.:Машиностроение, 1989,-287с.

Дополнительная:

5. Промышленные роботы: основные типы и технические характеристики: [Электронный ресурс] : [учеб. пособие] / Ю.Г.Козырев. – М.: КНОРУС, 2017.- 560с. - 1 файл. - Режим доступа: <http://ed.donntu.org/books/19/cd9434.pdf>. - Загл. с экрана.
Учебно-методические издания, разработанные в ГОУВПО ДонНТУ:
6. Горобец И.А. Промышленная робототехника. Механические системы манипуляторов .- Донецк, ДонНТУ, 2001.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РОБОТА №6

Точность позиционирования промышленного робота

Цель работы: изучение вопросов точности позионирования промышленных роботов

Задачи работы:

- 1 Ознакомление с теоретическими положениями точности позионирования ПР.
- 2 Определение взаимосвязи точности позионирования ПР и погрешности установки заготовки в приспособления технологического оборудования.
- 3 Изучение особенностей расчета погрешности позионирования ПР.

6.1 Основные теоритические положения

Точность позионирования промышленного робота — одна из важнейших его характеристик, определяющая возможность его использования для автоматизации производственного процесса и область применения.

Количественной величиной точности позионирования является **ошибка (погрешность) позионирования**, под которой будем понимать разницу между фактическим положением условной точки рабочего органа и точкой, заданной программой [1,2,5].

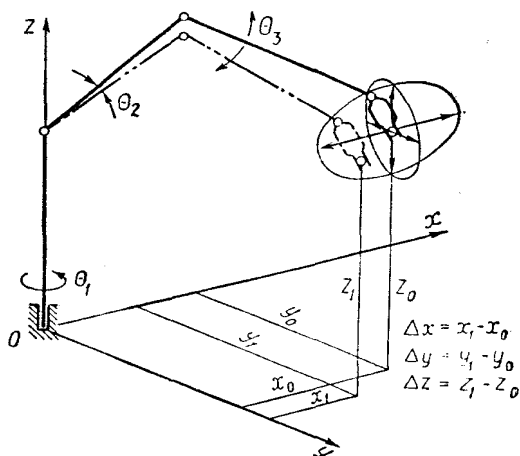


Рис. 6.1 Точность позионирования манипулятора.

Ошибки позионирования манипулятора любой компоновки могут выражаться линейными величинами Δx , Δy и Δz (рис. 6.1). Очевидно, что для рычажной и цилиндрической компоновок манипулятора ошибки позионирования можно представить как угловые ($\Delta\theta$) в том случае, если рука робота поворачивается на некоторый угол θ .

Кроме ошибок позионирования могут возникать ошибки ориентирования рабочего органа в пространстве.

Рассмотрим основные причины ошибок позионирования рабочего органа ПР.

Основными причинами ошибок позионирования рабочего органа ПР являются:

1. **Ошибки за счет устройств управления.** Движение рабочего органа ПР определяется работой устройства управления, следовательно,

ошибки управления неизбежно приведут к ошибкам положения рабочего органа в пространстве.

2. **Ошибки за счет приводов.** Источником ошибок позиционирования промышленного робота может служить привод. Ошибки привода возникают в результате неточной остановки движущегося звена (например, поршня пневматического или гидравлического цилиндра), неточности работы электромеханических конечных выключателей, дискретности шаговых механизмов и, наконец, неточности остановки в заданном положении якоря электродвигателя.
3. **Ошибки за счет технологических погрешностей изготовления элементов и узлов манипулятора** зависят от технологии изготовления механических частей манипулятора и оборудования. В результате различного рода погрешностей фактические размеры звеньев, определяющие положение рабочего органа в пространстве, будут отличаться от идеальных (расчетных). Истинные размеры могут быть определены путем измерения изготовленной конструкции и учтены в расчетах. Однако такой путь целесообразен лишь в редких случаях, когда речь идет об уникальных, высокоточных роботах. Обычно же приходится определять ожидаемую точность разрабатываемой конструкции, опираясь на ту информацию, которая содержится в рабочих чертежах.
4. **Ошибки, обусловленные упругими свойствами кинематических звеньев манипулятора.** Эта группа ошибок позиционирования робота определяется тем, что в процессе его работы манипулятор оказывается разомкнутой системой. Манипулятор образует упруго сочлененную из нескольких звеньев консоль с большим вылетом и приобретает значительную податливость. Эта группа причин в ряде случаев имеет большой удельный вес в общем балансе выходной ошибки позиционирования.
5. **Погрешности позиционирования, зависящие от условий эксплуатации промышленного робота, можно разделить на несколько типов.**

- погрешности, вызванные нестабильностью условий смазывания трущихся поверхностей. Это погрешности такого же типа, как и в других механизмах и машинах, и зависят от конкретного типа смазки, температуры окружающей среды, степени загрязнения трущихся поверхностей, изменения вязкости смазки во времени и т. д.

- погрешности, вызванные изменением линейного и кругового перемещений робота. Это легко можно проиллюстрировать на примере

вращательного движения руки робота. Совершенно очевидно, что при увеличении радиуса R поворота руки и при постоянной угловой погрешности $\Delta\alpha$ погрешность Δl будет увеличиваться прямо пропорционально увеличению радиуса. Заметим, что для малых углов $\Delta\alpha$ дугу Δl можно считать прямой.

- погрешности, вызванные изменением массы удерживаемого груза. Номинальной грузоподъемностью промышленного робота считается такая грузоподъемность, при которой обеспечиваются установленные значения эксплуатационных характеристик. При увеличении массы переносимого изделия, особенно если она выше номинальной, погрешность позиционирования резко увеличивается, а точность позиционирования - уменьшается. Это объясняется изменением динамических характеристик системы, переходных процессов, увеличением вибрации и т. д.
- Ошибки позиционирования, вызываемые ошибками работы устройств управления, приводов, технологическими погрешностями и упругими свойствами кинематических звеньев, можно считать независимыми случайными величинами с известным законом распределения.

6. Ошибки позиционирования за счет неточности изготовления и сборки. Предположение о том, что точность позиционирования промышленного робота определяется только ошибкой его позиционирования, а изделие изготовлено и установлено абсолютно точно, является частным случаем системы «робот — инструмент — деталь» (РИД). В действительности существуют и другие ошибки, существенно влияющие на точность позиционирования.

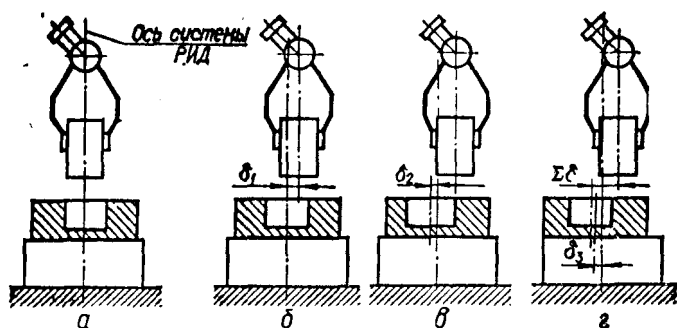


Рис. 6.2 - Ошибки позиционирования: а – идеальный случай; б – ошибка позиционирования робота; в – ошибка изготовления детали; г – ошибка установки детали.

В производственной практике предприятий машиностроительного профиля часто имеют место ошибки изготовления заготовки. Допустим, что необходимо совместить деталь, которую подает робот, с отверстием, имеющимся в корпусной детали. Следует учитывать допуск на отклонение центра отверстия, который установлен чертежом и

зависит от точности обработки отверстия на конкретном станке. Вероятность того, что центр отверстия точно совпадает с заданным, ничтожно мала.

На рис. 6.2, а показан идеальный случай, когда оси всех трех элементов системы РИД совпадают и сборка легко осуществляется при движении захватного устройства вниз. На рис. 6.2, б показано положение ЗУ (инструмента), когда он отклонился от оси РИД вправо (или влево) на величину δ_1 . Это и есть **ошибка позиционирования робота**. На рис. 6.2, в показан случай, когда, кроме того, деталь изготовлена неточно. Сдвиг δ_2 оси отверстия от оси изделия представляет собой **ошибку изготовления изделия**. И, наконец, на рис. 6.2, г показано положение, когда изделие по отношению к основанию установлено неточно. Эта ошибка обозначена δ_3 . На всех рисунках для наглядности ошибки расположены так, что складываются по величине и составляют максимальную ошибку:

$$\sum \delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3, \quad (6.1)$$

Перечисленные ошибки — случайные, независимые друг от друга и имеют вероятностный характер.

Ошибки изготовления и позиционирования (установки) изделия также подчиняются нормальному закону распределения:

Для строгости изложения и упрощения математических преобразований будем считать, что есть всего две ошибки, две независимые случайные величины: P_p — вероятность ошибки робота; P_u — суммарная вероятность ошибки изготовления изделия и его размещения.

Так как одна из составляющих может быть равна 0,

Тогда:

$$P_p(x) = \frac{1}{\sigma_p \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_p)^2}{2\sigma_p^2}}; \quad (6.2)$$

$$P_u(x) = \frac{1}{\sigma_u \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_u)^2}{2\sigma_u^2}}; \quad (6.3)$$

где σ_p и σ_u — средние квадратические отклонения робота и изделия соответственно.

7. Ошибки позиционирования за счет люфтов в кинематической схеме манипулятора. В достаточно сложных механизмах имеются люфты, которые появляются за счет зазоров, если не были приняты

специальные меры по их устранению. Эти люфты в кинематических парах суммируются и существенно ухудшают точность работы механизма.

Таким образом, погрешность позиционирования, допустимая на конечном звене (максимально допустимая погрешность), определяется требованиями к точности выполнения основной технологической операции или максимально возможным отклонением детали от базирующих поверхностей приспособления, фиксирующего деталь в рабочей зоне обрабатывающей машины В каждом конкретном случае линейная $\pm\Delta$ мм и угловая $\pm\alpha^\circ$ составляющие погрешности позиционирования конечного звена ПР могут быть определены расчетом.

Например, при загрузке центровых и патронных станков деталями типа тел вращения отклонение оси симметрии детали от оси шпинделя станка не должно превышать значения d_0 , при котором еще гарантируются правильный зажим и надежное позиционирование детали в патроне или центрах станка (рис. 6.3). В противном случае центры станка не попадают в центровые отверстия вала, а при закреплении в патроне деталь может быть зажата кулачками с существенным смещением относительно оси шпинделя станка [5]. Если фактическая величина смещения оси детали превышает допустимую, то обработка невозможна, поскольку либо не будет обеспечена требуемая точность обработки, либо деталь выскочит из зажимного приспособления.

Связь между составляющими погрешности позиционирования и допустимой величиной смещения оси детали относительно оси шпинделя для центровых и патронных станков выразится зависимостями:

$$\Delta \leq d_0 - l_i * \operatorname{tg}(\alpha) \quad (6.4)$$

$$\alpha \leq \operatorname{arctg}(2(d_0 - \Delta)) / l_{\max} \quad (6.5)$$

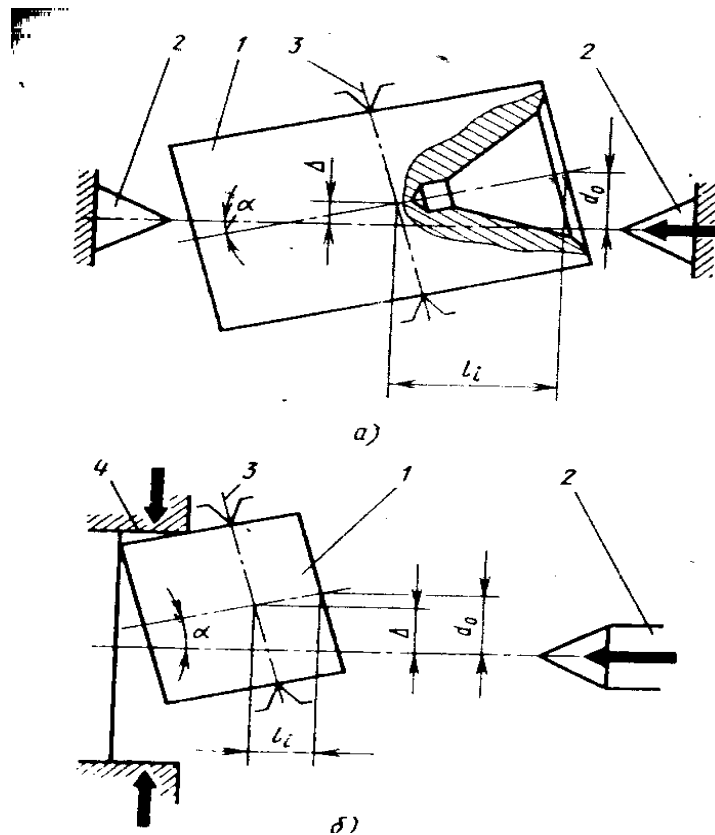


Рис. 6.3 - Схема для расчета погрешностей позиционирования конечного звена промышленного робота при загрузке вала в центральной (а) и фланца в патронный (б) станок:

- 1 – деталь;
- 2 - центры станка;
- 3 - точки базирования деталей в захватном устройстве робота;
- 4 – губки патронов станка.

6.2. Вопросы для самоконтроля

- 1 Погрешности позиционирования, зависящие от условий эксплуатации ПР
- 2 Ошибки позиционирования за счет неточности изготовления и сборки .
- 3 Погрешности позиционирования за счет люфтов в кинематической схеме манипулятора .
- 4 Чем предопределяется точность позиционирования ПР на стадии выбора?
- 5 Связь точности позиционирования и погрешности установки заготовки в приспособлении технологического оборудования?

Литература

Основная

1. Промышленные роботы: основные типы и технические характеристики: [Электронный ресурс] : [учеб. пособие] / Ю.Г.Козырев. – М.: КНОРУС, 2017.- 560с. - 1 файл. - Режим доступа: <http://ed.donntu.org/books/19/cd9434.pdf>
- Загл. с экрана.
2. Моисеев, Ю. И. Применение промышленных роботов для загрузки металлообрабатывающего оборудования [Электронный ресурс] : [учеб. пособие] / Ю. И. Моисеев. – Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2013. – 170 с. - 1 файл. - Режим доступа: <http://ed.donntu.org/books/19/cd9444.pdf>
. - Загл. с экрана.

Дополнительная:

3. Робототехнические мехатронные системы: [Электронный ресурс] : [учебник] / О.Д.Егоров, Ю.В.Подураев, М.А.Буйнов. – ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2015. – 326с. - 1 файл. - Режим доступа: <http://ed.donntu.org/books/17/cd6752.pdf> - Загл. с экрана.
4. Лукинов А.П. Проектирование мехатронных и робототехнических устройств: [Электронный ресурс] : [учеб. пособие].-СПб.:Издательство «Лань», 2012. -608с. – - 1 файл. - Режим доступа: <http://ed.donntu.org/books/17/cd8070.pdf>. - Загл. с экрана.
5. Горобец И.А. Промышленная робототехника. Механические системы манипуляторов .- Донецк, ДонНТУ, 2001.
6. Спыну Г.А. Промышленные роботы. Конструирование и применение: Учебное пособие, 2-ое издание – К.: Высшая школа, 1991. – 311с.
Роботизированные технологические комплексы и гибкие производственные системы в машиностроении. Альбом схем и чертежей. Под общ. Редакцией Соломенцева Ю.М.- М.:Машиностроение, 1989. – 120с.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РОБОТА №7

Привод промышленных роботов

Цель работы: изучение особенностей выбора привода промышленных роботов

Задачи работы:

- 1 Ознакомление с теоретическими положениями точности позиционирования ПР.
- 2 Определение взаимосвязи точности позиционирования ПР и погрешности установки заготовки в приспособления технологического оборудования.
- 3 Изучение особенностей расчета погрешности позиционирования ПР.

7.1 Классификация приводов

Тип и конструкция привода влияет на эксплуатационные показатели, габаритные размеры, потребление энергии, уровень шумов, возможность эксплуатации роботов в различных средах.

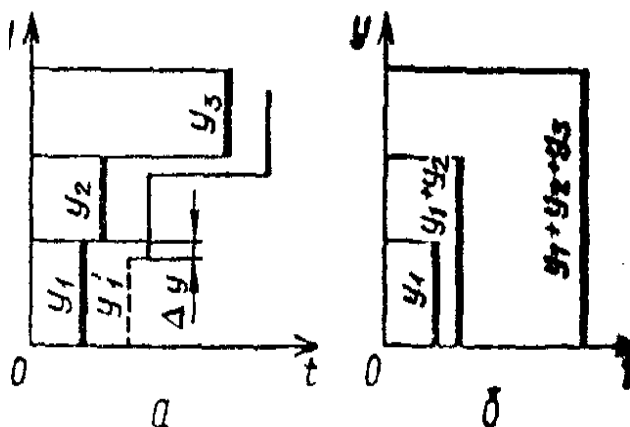


Рисунок 7.1- Принцип относительного (а) и абсолютного (б) отсчета координат.

По виду используемой энергии приводы разделяют на

- пневматические,
- гидравлические,
- электромеханические
- комбинированные.

Один из важных параметров привода промышленного робота — его способ отсчета координат. Существуют два способа отсчета координат (рис.

7.1) — **относительный** (по приращениям) и **абсолютный** (эти понятия относятся главным образом к дискретным приводам).

При *относительном* способе (рис. 7.1,а) отрезки y_1 , y_2 и y_3 траектории пропорциональны соответствующим отсчетам импульсного датчика. Если на одном из участков появится ошибка Δu и перемещение произойдет на величину y_1 , то эта ошибка скажется и на последующих участках отработки программы.

Отличие *абсолютного* отсчета координат, (рис. 7.1, б) заключается в том, что датчик обратной связи всегда дает отсчет перемещения от начала координат. Для этого применяют так называемые кодовые датчики обратной связи. Если на одном из участков появится ошибка, то она не скажется на дальнейшей отработке программы, так как отсчет идет всегда от начала координат.

К приводам с относительным отсчетом координат (по приращениям) относится шаговый привод, с абсолютным — большинство электроприводов с обратной связью по положению.

Выбор типа привода — часть общей задачи проектирования и создания промышленного робота новой конструкции. При этом необходимо учитывать много различных факторов и соображений:

— характер нагрузки на рабочий орган манипулятора и его промежуточные звенья;

— кинематические характеристики манипулятора (необходимые угловые и линейные перемещения, скорости, ускорения, законы движения рабочего органа и переходные процессы разгона и торможения);

— число точек и точность позиционирования, или точность воспроизведения криволинейной траектории, и точность стабилизации контурной скорости;

— условия эксплуатации робота (характеристики окружающей среды — давление воздуха, температуру, влажность, пожароопасность, загрязнение), а также механические воздействия, необходимый ресурс, желательный КПД, и другие факторы.

Определенных границ использования приводов различного типа не существует. Пневматические приводы предпочтительно применять для простых роботов с цикловым управлением и небольшой грузоподъемностью (до 10 кг). Для роботов средней и большой грузоподъемности, как правило, используют гидропривод. В последние годы все более широко применяется электромеханический привод. Выбор типа привода во многом определяется существующим или предполагаемым к использованию устройством управления.

Применение приводов в робототехнике обусловлено рядом специфических особенностей и требований.

1. Современные промышленные роботы имеют большое количество управляемых координат (от 3 до 7), сложную кинематическую структуру, каждая из координат управляется отдельным приводом.
2. Необходимость обеспечения группового управления приводами координат.
3. Обеспечение высокой точности позиционирования по каждой координате при напряженном динамическом режиме работы и большом количестве кинематических пар.
4. Широко изменяемый диапазон нагрузок на привод.
5. Требования по минимальным габаритным размерам и массам.
6. Необходимость длительной работы в неподвижном, заторможенном состоянии.
7. Большой ресурс работы и высокая надежность.

7.2 Пневматический привод

Пневматические приводы роботов широко применяются в простейших роботах с цикловым устройством управления. По статистике около 40% всех моделей промышленных роботов снабжены пневматическим приводом. Пневматические приводы, как правило, применяют только для роботов небольшой грузоподъемности — до 10 кг.

Основные преимущества пневматических приводов:

- простота и надежность конструкции;
- высокая скорость выходного звена (до 1000 мм/с при линейном перемещении, до 60 об/мин при вращении);
- использование сжатого воздуха в качестве рабочего тела, что обеспечивает экологическую чистоту всех приводов робота;
- возможность использования сжатого воздуха из заводской сети с давлением 0,5...0,63 Мпа;
- высокая точность позиционирования при работе по жестким упорам;
- возможность применения в агрессивной и пожароопасной среде;
- высокий коэффициент полезного действия (до 0,8);
- простота компоновки элементов;
- низкая стоимость конструкции и малые затраты на обслуживание.

Недостатки пневматического привода:

- невозможность осуществить принцип программного перемещения без упора (исключение — цифровые пневмоприводы);
- нестабильность скорости выходного звена при изменении нагрузки (вследствие сжимаемости воздуха);
- ограниченность числа точек позиционирования (чаще всего две) в приводах с цикловым управлением;

— увеличение числа точек позиционирования требует применения специальных конструкций позиционирующих устройств;

— необходимость демпфирования движения выходного звена привода в конце хода.

— наличие шума при работе.

Наиболее широко применяется силовое исполнительное устройство — цилиндр двустороннего действия (рис. 7.2). С помощью поршня можно осуществить как поступательное линейное перемещение по соответствующей координате манипулятора, так и вращательное, если установить поворотные пневмодвигатели, в которых используется тот же принцип поршня. На рис. 7.2 поршень цилиндра показан в момент движения вправо. Положение поршня отмечается текущей координатой x , отсчитываемой от условного нуля; X_0 — начальная координата поршня. Она характеризует минимальный объем рабочей полости в исходном положении поршня.

$$X_0 = V_P \text{ MIN} / F = V_0 + V_P \cdot T / F, \quad (7.1)$$

где F — эффективная площадь поршня; V_0 — объем вредного пространства цилиндра со стороны рабочей полости; $V_P \cdot T$ — расчетный объем подводящего воздухопровода на участке от рабочей полости до воздухораспределителя. Учитываются также V_0B — объем вредного пространства полости выхлопа; $V_{P.g.v}$ — расчетный объем выхлопного трубопровода; $F.v$ — эффективная площадь поршня в полости выхлопа; m — приведенная к штоку масса подвижных частей координаты.

Рассмотрим случай, когда поршень под действием поступающего слева воздуха движется направо со скоростью

$x = dx/dt$ (мгновенное значение), преодолевая силу сопротивления R . Величина R включает в себя силу трения, полезную нагрузку, вес подвижных частей (учитываемый в случае, если пневмоцилиндр расположен вертикально или под некоторым углом к горизонту).

Каждому моменту движения соответствует определенное состояние воздуха в полостях цилиндра. Оно характеризуется:

— давлением p и p_v ,

— температурой T и T_v .

— удельным весом γ и γ_v .

Рабочая полость во время движения соединена с источником питания через воздухопровод с эффективной площадью сечения f_v , а полость выхлопа — с атмосферой через выхлопной воздухопровод с эффективной площадью сечения $f_{v.э}$. На схеме также показаны: диаметр поршня D ; диаметр штока d ; длина хода S и сигналы переключения воздухораспределителя Y_1 и Y_2 .

Время перемещения поршня из одного крайнего положения в другое определяется нахождением периода наполнения минимального расчетного

объема рабочей полости $V_p \min$ от атмосферного давления p_a до давления движения p_d и период опорожнения расчетного объема полости выхлопа $V_p.v$ от давления p_{max} до давления p_v в конце выхлопа. Если найденные значения времени не равны между собой, то принимают большее из них, т. е. время процесса, лимитирующего движение поршня. Необходимые для расчета этих процессов давления движения находят из условия равновесия сил, действующих на поршень привода в момент начала движения:

$$p_d F - p_v F_v - R = 0 \quad (7.2)$$

В уравнении два неизвестных, значит оно имеет множество решений, из которых только одно правильное. Решают это уравнение методом подбора.

Процесс движения описывается системой дифференциальных уравнений, включающей уравнение движения поршня и два уравнения, которые характеризуют изменение давлений в полостях:

$$m d^2x/dt^2 = p_d F - p_v F_v - R; \quad (7.3)$$

$$dp/dt = k/(x+x_0) [f_3 \varepsilon K_{pm} \varphi(\sigma) \sqrt{(J T_m)} / F - p dx/dt]; \quad (7.4)$$

$$dp_v/dt = k/(S+x_0 v-x) [p_v dx/dt - f_v \varepsilon K_{pv} \varphi(\sigma) \sqrt{(J T_v)} / F_v], \quad (7.5)$$

где $K = \sqrt{2k/(k-1)}$; p_m - давление питания, p_v - давление выхлопа, $\varphi(\sigma)$ - функция расхода; T_m - температура воздуха на входе.

Эти уравнения не учитывают теплообмен с окружающей средой, а также утечки и перетечи воздуха из полостей привода.

Проведя некоторые преобразования, можно записать систему в виде, удобном для интегрирования:

$$x = (pF - p_v F_v - R) / m \quad (7.6)$$

$$p = k/(x+x_0) [f_3 \varepsilon K_{pm} \varphi(\sigma) \sqrt{(J T_m)} / F - p x] \quad (7.7)$$

$$p_v = k/(S+x_0 v-x) [p_v x - f_v \varepsilon K_{pv}^{(3k-1)/2k} \varphi(\sigma) \sqrt{(J T_m)} / F_v p_m^{(k-1)/2k}] \quad (7.8)$$

В общем виде система уравнений решения не имеет. Ее можно решить только численным интегрированием с применением ЭВМ.

Для вращательного движения используется поворотный пневмодвигатель (рис.7.3). Расчет такого механизма проводится по изложенной методике с некоторыми упрощениями, так как обе рабочие полости цилиндра совершенно одинаковы.

7.3 Гидравлический привод

Гидравлические приводы применяются для роботов, средней, большой и сверхбольшой грузоподъемности.

Широкое распространение гидропривода в робототехнике обусловлено следующими его **достоинствами**:

- использование в качестве рабочего тела несжимаемой жидкости. Это позволяет осуществить управление по заданной программе, получить высокую стабильность скорости выходного звена при изменении нагрузки в широком диапазоне и высокую точность позиционирования;

- бесступенчатость регулирования скорости выходного звена;

- большой коэффициент усиления по мощности и большие передаваемые усилия;

- относительно малая масса исполнительных устройств;

- большой опыт разработки и эксплуатации гидроприводов в различных областях техники;

- широкая номенклатура элементов гидроприводов, выпускаемых промышленностью.

Недостатки гидравлических приводов:

- использование в качестве рабочего тела жидкости требует создания специальных насосно-аккумуляторных установок (НАУ);

для сохранения мобильности и автономности роботов эти установки должны монтироваться в конструкции робота. Это резко увеличивает его массу;

- использование рабочей жидкости на нефтяной основе исключает возможность применения роботов с таким приводом в вакууме (космосе), в пожаро- и взрывоопасной среде;

- ресурс рабочей жидкости ограничен, что приводит к частой замене всего объема жидкости, фильтров и т. д.;

- коэффициент полезного действия гидропривода меньше, чем у пневмопривода;

- применение в качестве рабочего тела различных масел, вязкость которых зависит от температуры, требует предварительного прогрева всей системы; кроме того, с изменением температуры жидкости в процессе работы изменяется скорость;

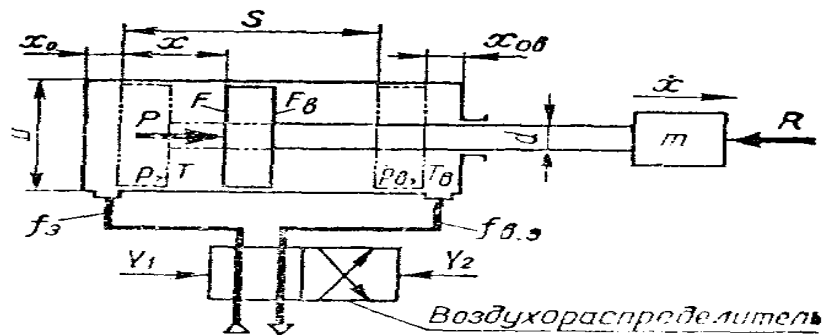


Рисунок 7.2- Схема пневматического цилиндра двустороннего действия

— возможность подтекания сальниковых уплотнений и других устройств при эксплуатации.

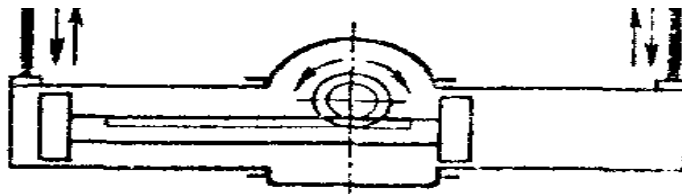


Рисунок 7.3- Схема поворотного пневмодвигателя

Основной исполнительный орган гидравлического привода — гидроцилиндр. Размеры гидроцилиндров выбирают на основании расчета. Исходными данными для этого являются:

- принятое давление,
- заданная технологическая нагрузка,
- требуемая длина хода,
- максимальная скорость движения.

При расчете определяют :

- размеры сечений трубопроводов для подвода и отвода рабочей жидкости,
- условные проходы распределительных и регулирующих устройств,
- потребные расходы рабочей жидкости.

Быстродействие, действительные скорости движения и развиваемые усилия определяют в динамическом расчете

На характер движения исполнительных устройств влияет работа аппаратуры управления и вспомогательных устройств.

Эта аппаратура включает в себя (рис. 7.4): гидрозолотник 1; манометр 2; гидроаккумулятор 3; регулируемый дроссель 4; сливной бак 5; сливной трубопровод 6; заборный трубопровод 7; электродвигатель гидронасоса 8;

гидронасос 9; регулируемый предохранительный клапан 10; масляный фильтр 11. Гидроаккумулятор необязательно входит в состав насосноаккумуляторной установки.

Расчет гидросистемы с цилиндром можно провести по упрощенной методике.

Для сообщения исполнительному органу движения вправо нужно создать на поршне цилиндра такую силу P , которая могла бы преодолеть сумму полезных сил и вредных сопротивлений:

$$P=R+T_H+T_{ш}+T_{п}+T_O+T_{и}=R+\sum T, \quad (7.9)$$

где R — нагрузка на шток, возникающая при перемещении деталей механизма манипулятора; T_H — сила трения нагрузки, приведенная к штоку; $T_{ш}$ — сила трения штока в уплотнении; $T_{п}$ — сила трения поршня в корпусе цилиндра; T_O — сила, возникающая под действием давления p_c масла в обратной полости цилиндра; $T_{и}$ — сила инерции, возникающая при разгоне рабочего органа работа;

$\sum T$ — суммарная сила сопротивления.

Для создания силы P в левой полости цилиндра необходимо создать рабочее давление P_p , следовательно,

$$P=p_p F_1=p_p \pi D^2/4 \quad (7.10)$$

где D — диаметр цилиндра.

Зная полезные силы и вредные сопротивления, можно определить давление в цилиндре:

$$P_p=(R+\sum T)/F_1 \quad (7.11)$$

Как правило, нагрузка R известна, а силы сопротивлений нужно определить.

Узнав рабочее давление в цилиндре, можно определить и давление p_n , которое должен развить насос:

$$p_n=p_p+\Delta p \quad (7.12)$$

Здесь Δp — потери давления на пути от насоса к цилиндру:

$$\Delta p=\Delta p_{т}+\Delta p_{к}+\Delta p_{г} \quad (7.13)$$

где $\Delta p_{т}$, $\Delta p_{к}$, $\Delta p_{г}$ - потери давления в трубопроводах, клапанах и гидрораспределителе соответственно.

Зная давление p_p , можно определить также толщину стенок цилиндра.

Чтобы поршень развил скорость $v(x)$ в цилиндре, необходимо подать определенный объем жидкости (воздуха):

$$Q=Fv \quad (7.14)$$

Максимальную скорость перемещения рабочего органа робота или наибольший объем масла определяют из формулы

$$Q_{\max}=Fv_{\max} \quad (7.15)$$

По этому объему выбирают производительность насоса:

$$Q_n=Q_{\max}/\eta_0 \quad (7.16)$$

где η_0 — объемный КПД гидросистемы.

Определив Q_n и зная p_n , выбирают насосную станцию .

На динамические характеристики гидравлических исполнительных устройств влияют аппаратура управления и вспомогательные устройства (пневмогидравлические аккумуляторы).

Гидроаккумулятор выполняет две функции:

- обеспечивает дополнительную подачу рабочей жидкости в систему в те моменты ее работы, когда потребление жидкости резко возрастает, например, при одновременном включении нескольких исполнительных устройств (приводов координат),
- выполняет роль демпфера, гасящего резкие колебания давления при переключении распределителей.

Помимо цилиндра в гидросистемах имеются предохранительные клапаны, регуляторы скорости, гидромоторы различных типов, гидроусилители и т. д.

7.4 Вопросы для самоконтроля

1. Как подразделяются приводы по виду используемой энергии?
2. Какие способы отсчета координат в роботах Вы знаете?
3. Указать отличия способов отсчета координат в ПР.
4. Какие факторы необходимо учитывать при выборе типа приводов?
5. Указать преимущества и недостатки пневматических приводов.
6. Привести схему пневматического привода и указать уравнение равновесия сил.
7. Привести варианты схем вращательного пневмопривода.
8. Указать преимущества и недостатки гидравлических приводов.
9. Привести гидравлическую схему ПР с 2 гидроцилиндрами.
10. По каким критериям определяют производительность гидравлического насоса привода ПР?

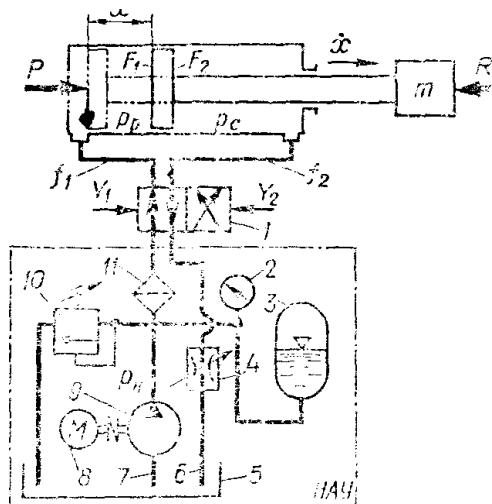


Рисунок 7.4 - Схема гидравлической установки

Литература

Основная:

1. Промышленные роботы: основные типы и технические характеристики: [Электронный ресурс] : [учеб. пособие] / Ю.Г.Козырев. – М.: КНОРУС, 2017.- 560с. - 1 файл. - Режим доступа: <http://ed.donntu.org/books/19/cd9434.pdf> - Загл. с экрана.

Дополнительная:

2. Робототехнические мехатронные системы: [Электронный ресурс] : [учебник] / О.Д.Егоров, Ю.В.Подураев, М.А.Буйнов. – ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2015. – 326с. - 1 файл. - Режим доступа: <http://ed.donntu.org/books/17/cd6752.pdf> - Загл. с экрана.

3. Роботизированные технологические комплексы и гибкие производственные системы в машиностроении. Альбом схем и чертежей. Под общ. Редакцией Соломенцева Ю.М.- М.:Машиностроение, 1989. – 120с.

4. Горобец И.А. Промышленная робототехника. Механические системы манипуляторов.- Донецк, ДонНТУ, 2001.

Список литературы

1. Промышленные роботы: основные типы и технические характеристики: [Электронный ресурс] : [учеб. пособие] / Ю.Г.Козырев. – М.: КНОРУС, 2017.- 560с. - 1 файл. - Режим доступа: <http://ed.donntu.org/books/19/cd9434.pdf> - Загл. с экрана.
2. Моисеев, Ю. И. Применение промышленных роботов для загрузки металлообрабатывающего оборудования [Электронный ресурс] : [учеб. пособие] / Ю. И. Моисеев. – Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2013. – 170 с. - 1 файл. - Режим доступа: <http://ed.donntu.org/books/19/cd9444.pdf> . - Загл. с экрана.
Дополнительная:
3. Робототехнические мехатронные системы: [Электронный ресурс] : [учебник] / О.Д.Егоров, Ю.В.Подураев, М.А.Буйнов. – ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2015. – 326с. - 1 файл. - Режим доступа: <http://ed.donntu.org/books/17/cd6752.pdf> - Загл. с экрана.
4. Лукинов А.П. Проектирование мехатронных и робототехнических устройств: [Электронный ресурс] : [учеб. пособие].-СПб.:Издательство «Лань», 2012. -608с. – - 1 файл. - Режим доступа: <http://ed.donntu.org/books/17/cd8070.pdf>. - Загл. с экрана.
5. Роботизированные технологические комплексы и гибкие производственные системы в машиностроении. Альбом схем и чертежей. Под общ. Редакцией Соломенцева Ю.М.- М.:Машиностроение, 1989. – 120с.
6. Горобец И.А. Промышленная робототехника. Механические системы манипуляторов .- Донецк, ДонНТУ, 2001.
7. Захватные устройства промышленных роботов. Учебное пособие / К.А. Украженко, Ю.В. Янчевский, А.А. Кулебякин, А.Ю. Торопов. – Ярославль : Изд-во ЯГТУ, 2007. - 83 с. ISBN 5-230-20645-4
8. Разработка и оформление технической документации. Учебное пособие. Сост.: Михайлов А.Н., Лукичев А.В, Горобец И.А и др. – Донецк, ДонНТУ, 2003. – 60с.
9. Захватные устройства и инструменты промышленных роботов : учебное пособие / Ю.Г. Козырев. — М. : Кнорус, 2011. — 312 с.: ил.
10. Челпанов И.Б., Колпашников С.Н. Схваты промышленных роботов. – Л.:Машиностроение, 1989,-287с.
11. Спыну Г.А. Промышленные роботы. Конструирование и применение: Учебное пособие, 2-ое издание – К.: Высшая школа, 1991. – 311с.
Роботизированные технологические комплексы и гибкие производственные системы в машиностроении. Альбом схем и чертежей. Под общ. Редакцией Соломенцева Ю.М.- М.:Машиностроение, 1989. – 120с.
12. ГОСТ 2.770-68 (2000) ЕСКД. Обозначения условные графические на схемах. Элементы кинематики.

13. ГОСТ 2.703-2011. ЕСКД. Правила выполнения кинематических схем.
14. ГОСТ 2.781-96 ЕСКД. Обозначения условные графические. Аппараты гидравлические и пневматические, устройства управления и приборы контрольно-измерительные
15. Схиртладзе А.Г., Иванов В.И., Кареев В.Н. Гидравлические и пневматические системы. — Москва: ИЦ МГТУ «Станкин», «Янус-К», 2003. — С. 544.
16. Промышленные роботы и манипуляторы с ручным управлением: Каталог/ под редакцией Ю.Г.Завгороднева. - М.: 1986. - 131 с.
17. Козырев Ю.Г. Промышленные роботы: Справочник – М.: Машиностроение”, 1988 – 392с.
18. Bruno Siciliano. Springer Handbook of Robotics - Berlin; Heidelberg, 2008 - 1611s.