МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Курганский государственный университет»

Кафедра «Автоматизация производственных процессов»

КОНСТРУИРОВАНИЕ МЕХАТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Методические указания к комплексу лабораторных и практических работ
по дисциплине «Конструирование мехатронных устройств»

для студентов направления подготовки

15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»

(профиль «Автоматизация технологических процессов и производств
(машиностроение)»)

Курган 2018

Кафедра: «Автоматизация производственных процессов».

Дисциплина: «Конструирование мехатронных устройств».

Составил: канд.техн.наук, доцент Е.К. Карпов.

Утверждены на заседании кафедры « 21» декабря 2017 г.

Рекомендованы методическим советом университета «12» декабря 2016 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ……..4

1. Мехатронный узел – расчёт, сборка, программирование и устранение неисправностей……4

2. Программирование и наладка трёхкоординатного станка с микроконтроллерным управлением…….….7

3. Составление сборочного чертежа мехатронного узла……9

4. Определение геометрических параметров манипулятора для перемещения и позиционирования заготовок на механообрабатывающем производстве……..…11

5. Решение прямых и обратных задач кинематики манипуляторов…….20

6. Мехатронные узлы как часть мехатронной системы. Согласование различных частей для выполнения целевой функции……...30

7. Расчёт траектории движения робота-манипулятора и его программирование для автоматизации операций загрузки и выгрузки заготовок в зону механообработки…….…..30

8. Применение технического зрения для геометрической и цветовой идентификации пространственных объектов…….……30

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ……31

ВВЕДЕНИЕ

Целью освоения дисциплины «Конструирование мехатронных устройств» является приобретение студентами знаний об основных принципах синтеза мехатронных устройств и их применении, структуре, интеграции, иерархии и методах управления. Изучение робототехнических систем, состава, классификации мехатронных комплексов, прямой и обратной задачи кинематики манипуляторов роботов. Формирование навыков составления сборочных чертежей мехатронных узлов и конструирования деталей и узлов мехатронных и робототехнических систем с использованием современных технических средств и программных продуктов.

Освоение данных методических указаний дополнит теоретические материалы лекционного курса дисциплины в области изучения конструкции, компонентного состава, характеристик и особенностей эксплуатации мехатронных устройств при автоматизации технологических процессов общепромышленного и отраслевого применения, методик их синтеза и расчета при проектировании автоматизированных и автоматических систем управления технологическими объектами.

1. Мехатронный узел - расчёт, сборка, программирование и устранение неисправностей

Мехатронный узел включает в себя вычислительное устройство с программой управления. К нему подключены аналоговые и цифровые датчики для сбора информации о состоянии объекта управления и самого устройства, а также исполнительные устройства, такие как электроприводы, пневматические или гидравлические приводы.

Цель занятия состоит в сборке модели простого мехатронного устройства, выполняющего функции контроллера одной из осей станка с числовым программным управлением: задание и контроль скорости привода, защита от физического разрушения объекта посредством концевых выключателей, предоставление оперативной информации на верхний уровень управления или человеку-оператору.

Далее приводятся примеры программ и электрических схем, используя которые, можно выполнить задание. Дополнительная информация содержится в методических указаниях к комплексу лабораторных работ по Основам мехатроники.

Управление скоростью мотора с помощью потенциометра

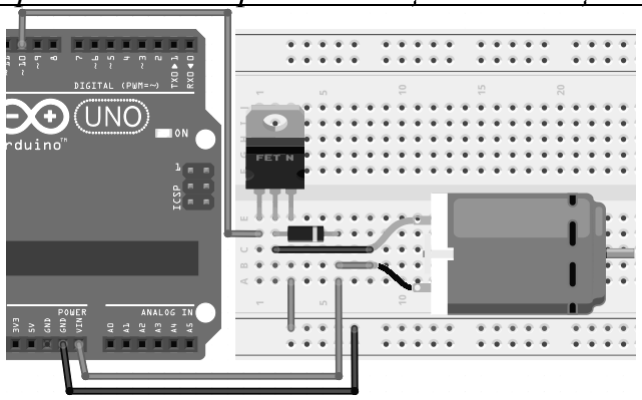


Рисунок 1 – Схема подключения микромотора

Текст программы управления скоростью мотора с помощью потенциометра

```
void setup()
{
  pinMode(10, OUTPUT); //Контакт подключения микромотора
}

void loop()
{
  int val = analogRead(A0) / 4; //Читаем значение потенциометра с A0 в
                                //переменную и согласуем её для АЦП-ЦАП
  analogWrite(10, val); //Вращаем микромотор со скоростью из переменной
}
```

Управление двухстрочным шестнадцатисимвольным дисплеем LCD 1602

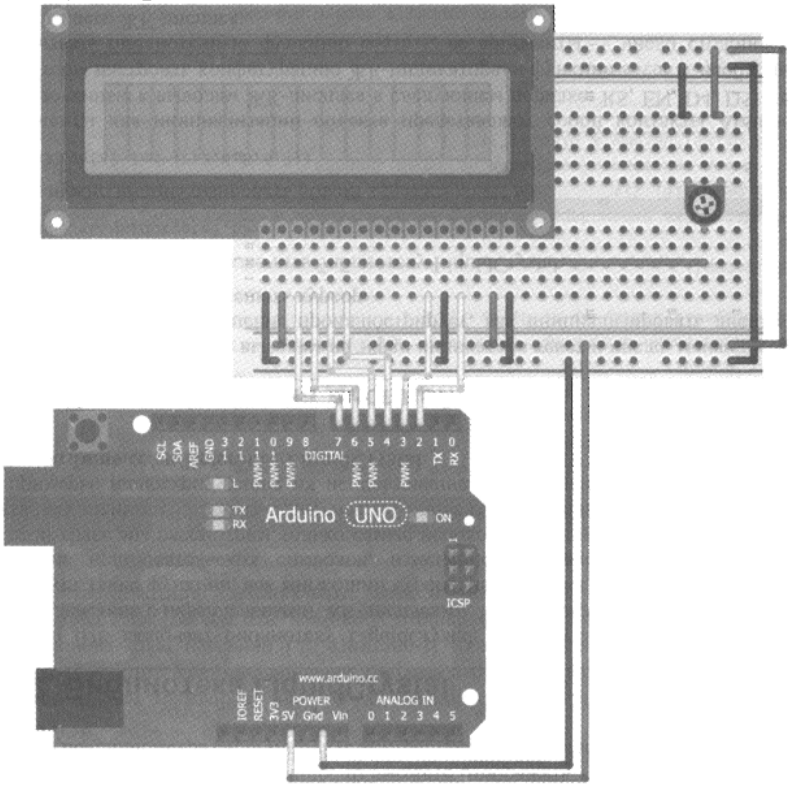


Рисунок 2 – Схема подключения дисплея с потенциометром уровня яркости

Текст программы секундного счётчика

```
#include <LiquidCrystal.h> //Подключение библиотеки мониторов

int time = 0; //Создание переменной счётчика, равного нулю
LiquidCrystal lcd(2,3,4,5,6,7); //Задание контактов подключения дисплея

void setup()
{
  lcd.begin(16,2); //Определение двухстрочного 16-символьного дисплея
  lcd.print("Display test"); //Вывод текста на дисплей
}
```

```
void loop()
{
  lcd.setCursor(0,1); //Установка курсора на первый символ второй строки
  lcd.print(time); //Вывод значения переменной
  delay(1000); //Задержка 1000 миллисекунд
  time++; //Инкрементирование переменной
}
```

Пример обработчика прерываний

Соберите схему с кнопкой и светодиодом (для диода используйте сопротивление 100 Ом, для кнопки – 10 кОм).

```
volatile int state = LOW; //квалификатор перед переменной используется
                          //чтобы её можно было изменить из обработчика
                          //прерывания
void setup()
{
  pinMode(13, OUTPUT);
  attachInterrupt(0, blink, RISING); //настройка обработчика прерывания на
        //нулевую линию (второй контакт); вызываемая прерыванием
        // функция – blink; прерывание срабатывает при переходе сигнала
        // на контакте с LOW на HIGH
}

void loop()
{
  digitalWrite(13, state); //запись значения переменной state на светодиод
}

void blink() //функция, вызываемая прерыванием
{
  state = !state; //инверсия значения переменной
}
```

Электрическая схема с кнопкой и диодом

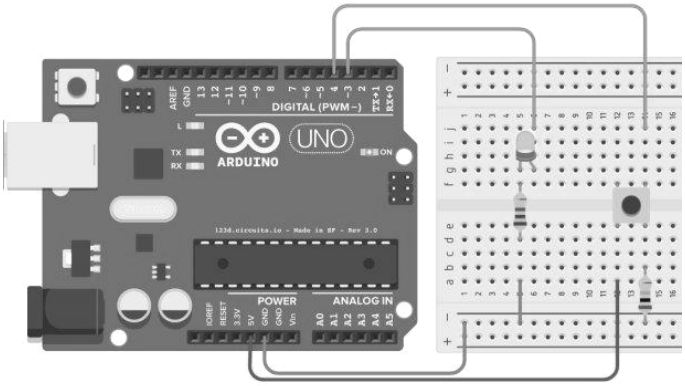


Рисунок 3 – Схема с одной кнопкой и одним диодом

Мигание диодом по нажатию кнопки. Текст программы:

```
void setup() {
  pinMode(3, OUTPUT); // Третий контакт контроллера – выход (диод)
  pinMode(4, INPUT); // Четвёртый контакт контроллера – вход (кнопка)
}

void loop() {
  int a = digitalRead(4); // Чтение сигнала с кнопки в переменную
  digitalWrite(3,a); // Подача значения переменной на диод
}
```

Задание: в группах соберите схему мехатронного узла, состоящую из микроконтроллера, двух кнопок-прерываний, микропривода, потенциометра и LCD-монитора. Напишите к ней программу, реализующую следующие функции: - скорость и направление вращения микромотора зависит от значения, считываемого микроконтроллером с потенциометра;

- при нажатии на кнопки происходит срабатывание одного из прерываний и останов мотора;

- на монитор постоянно выводится информация о скорости вращения мотора, если он остановлен, то выводится сообщение об этом. Срабатывание каждого из прерываний сопровождается сообщением с номером сработавшего из них.

Начертите блок-схему алгоритма работы программы и её модификацию в соответствии с вариативной частью задания от руки или с использованием компьютера.

Вариативная часть задания уточняется у преподавателя для защиты работ студентами:

- модифицируйте работу таким образом, чтобы датчики были нормально-замкнутыми. В чём преимущества такого способа подключения?

- модифицируйте схему таким образом, чтобы оба датчика находились на одном прерывании, но после останова определялся тот из них, который сработал;

- подключите в схему датчик скорости вращения микромотора и выводите её значение на монитор. Модифицируйте программу так, чтобы в случае фактического останова мотора, выводилось соответствующее сообщение на монитор.

2. Программирование и наладка трёхкоординатного станка с микроконтроллерным управлением

Шаговые двигатели широко применяются в простых 2-х и 3-х осевых станках, принтерах и 3D-принтерах. Их особенностью является возможность совершения поворота обычно на 1.8°, т.е. – 200 шагов на оборот. Это позволяет строить автоматизированные устройства, в которых допускается проверять только одну из концевых точек положения исполнительного устройства, и от неё вычислять перемещения, контролируя произведённое количество шагов

приводами в том или ином направлении. Далее приводится программа для управления таким приводом при помощи Arduino с соответствующей платой расширения.

Программа вращения шагового двигателя на 500 шагов в одну, а затем в другую сторону

```
#define EN 8
#define X_DIR 5
#define X_STEP 2
int Count = 0;
boolean Direction = LOW;

void setup()
{
  pinMode(EN, OUTPUT);
  pinMode(X_DIR, OUTPUT);
  pinMode(X_STEP, OUTPUT);
  digitalWrite(EN, LOW);
}

void loop() {
  Count++;

  if (Count >= 500)
  {
    Direction = !Direction;
    digitalWrite(X_DIR, Direction);
    Count = 0;
  }

  digitalWrite(X_STEP, HIGH);
  delay(1);
  digitalWrite(X_STEP, LOW);
  delay(1);
}
```

Задания: 1) используя код программы, приведённый выше, соберите мехатронное устройство перемещения каретки винтовой передачей. Оно будет состоять из микроконтроллера, платы расширения для управления шаговыми двигателями с одним драйвером, шагового двигателя и механической части – оси одного из макетов станков. Рассчитайте количество шагов, которое необходимо совершить двигателю, чтобы переместить гайку на 10 мм. Формулы расчёта запишите;

2) проверьте величины перемещений по осям трёхкоординатного станка с микроконтроллерным управлением и скорректируйте его программу таким образом, чтобы их точность повысилась.

3. Составление сборочного чертежа мехатронного узла

ГОСТ 2.102-68 для всех отраслей промышленности устанавливает следующий вид конструкторской документации – “сборочный чертеж”. Это документ, содержащий изображение изделия и другие данные, необходимые для его сборки (изготовления) и контроля. Сборочный чертеж выполняется в соответствии с ГОСТ 2.109-73.

Сборочные чертежи выполняются на изделия, состоящие из двух и более деталей. Наличие сборочных чертежей позволяет правильно производить сборку и разборку изделия и его составных частей, а также пользоваться этими чертежами при эксплуатации и ремонте. Они должны содержать изображение сборочной единицы в необходимом и достаточном количестве видов, разрезов и сечений для того, чтобы можно было установить:

- устройство и принцип работы изделия;
- количество и форму деталей, входящих в сборочную единицу;
- взаимодействие и способы соединения деталей между собой;
- обработку, выполняемую в процессе сборки или после нее (совместное сверление, притирка и т.п.);
- габаритные, установочные, присоединительные, а также необходимые справочные размеры;
- номера позиций составных частей, входящих в изделие.

Детали подвижные, занимающие в эксплуатационных условиях в изделиях различные положения и сопрягающиеся с неподвижными деталями, изображаются в крайних положениях штрихпунктирной линией с двумя точками с нанесением соответствующих размеров (рисунок 4).

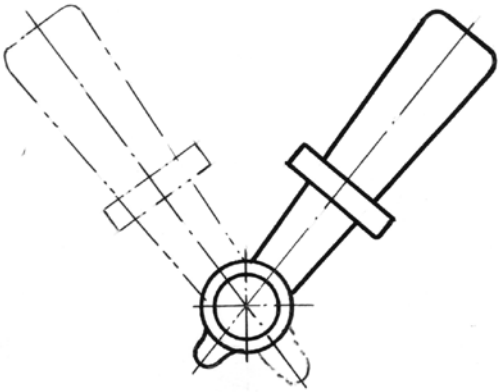


Рисунок 4 – Изображение подвижных деталей на сборочном чертеже

На сборочном чертеже изделия допускается помещать изображение пограничных изделий и размеры, определяющие их взаимное расположение. Контуры обстановки выполняют тонкими сплошными линиями упрощенно и приводят необходимые данные для определения места установки, методов крепления и присоединения изделия.

Сборочные чертежи рекомендуется выполнять упрощенно в соответствии с требованиями ЕСКД и ГОСТ 2.109-73. На сборочном чертеже допускается не показывать:

- фаски, скругления, углубления, выступы и другие мелкие элементы;

- зазоры между стержнем и отверстием;

- крышки, кожухи, маховики и другие составные части изделия, если необходимо показать закрываемые ими другие части изделия.

Смежные детали в разрезах и сечениях выделяют разной по направлению и плотности штриховкой, одинаковой для каждой детали на всех изображениях, или сдвигают линии штриховки в одном сечении по отношению к другому.

Не рассекают и не штрихуют в продольных разрезах такие детали, как вал, оси, стержни, шарики, болты и т.д., если они не имеют внутренних полостей, а также шайбы и гайки.

Сварное, паяное, клееное изделие из однородного материала в сборе с другими изделиями в разрезах и сечениях штрихуют как монолитное тело в одну сторону, изображая границы между деталями сплошными основными линиями.

Разрешается на видах или в плоскости разреза показывать не все крепежные детали, если они однотипны: изображается одно крепежное соединение или отверстие, а вместо остальных наносятся лишь осевые линии.

Изделия из прозрачного материала показывают непрозрачными.

Подшипники качения изображают упрощенно и условно по ГОСТ 2.420-69, не указывая конструкции и типа подшипника, а вычерчивая сплошными основными линиями его контур, пересеченный по диагоналям сплошными тонкими линиями. Для наглядности допускается и более подробное изображение подшипника, но без фасок, галтелей и сепараторов (рисунок 5).

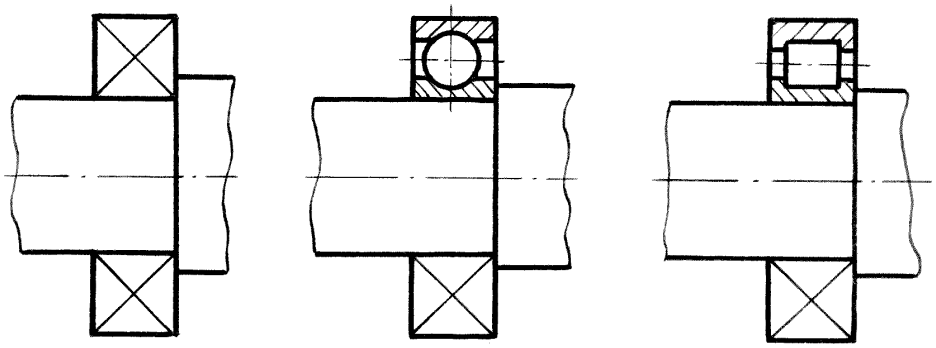


Рисунок 5 – Изображение подшипников на сборочном чертеже

Размеры проставляются на видных местах, по возможности вне контура изображений, при этом необходимо учитывать размещение номеров деталей (позиций) и выносных линий к ним, избегать пересечения линий.

На сборочном чертеже наносят следующие размеры:

1) габаритные (длина, ширина или наибольший диаметр, высота), которые указывают пространство, занимаемое изделием;

2) установочные и присоединительные размеры, определяющие установку изделия или присоединение к нему других изделий;

3) монтажные и конструктивные размеры, указывающие взаимное расположение деталей в сборочной единице;

4) эксплуатационные размеры, характеризующие работу сборочной единицы;

5) справочные размеры;

Все составные части сборочной единицы нумеруют в соответствии с номерами позиций, указанных в спецификации. Номера позиций наносят на полках линий-выносок, проводимых от изображений составных частей. Одним концом линия-выноска должна заходить на изображение указываемой составной части изделия и заканчиваться точкой, другим концом – соединяться с горизонтальной полкой.

Линии-выноски не должны пересекать изображения других составных частей изделия, пересекаться между собой и пересекать (по возможности) размерные и выносные линии, быть параллельными линиям штриховки.

Спецификация является основным конструкторским документом, определяющим состав сборочной единицы, комплекса, комплекта. Согласно ГОСТ 2.108-68, выполняют ее на отдельных листах формата А4 по форме 1 (заглавный лист) и 1А (последующие листы).

В общем случае спецификация состоит из разделов, располагаемых в такой последовательности: документация, комплексы, сборочные единицы, детали, стандартные изделия, прочие изделия, материалы, комплекты. Наличие тех или иных разделов определяет состав изделия.

Документация – основной комплект конструкторских документов (сборочный чертеж и схема деления изделия на составные части).

Сборочные единицы – сборочные единицы, входящие в специфицируемое изделие.

Детали – детали, непосредственно входящие в изделие, т.е. не входящие в состав перечисленных выше сборочных единиц.

Стандартные изделия – изделия, примененные по государственным, республиканским, отраслевым стандартам и стандартам предприятий (для изделий вспомогательного производства).

Материалы – материалы, непосредственно входящие в специфицируемое изделие, т.е. не входящие в состав сборочных единиц изделия.

Задание: выполните сборочный чертёж мехатронного узла на формате А3 от руки или с использованием программные пакетов автоматизированного проектирования и черчения. На чертеже должны быть изображены основные компоненты узла, обозначены их позиции, нанесены необходимые размеры, подвижные части устройства должны быть показаны в крайних положениях штрихпунктирной линией с двумя точками с нанесением соответствующих размеров. Мехатронное устройство для данной работы может быть выбрано самостоятельно или вместе с преподавателем, но перед выполнением её необходимо утвердить на практическом занятии.

4. Определение геометрических параметров манипулятора для перемещения и позиционирования заготовок на механообрабатывающем производстве

Манипулятор – это кинематическая цепь, образованная последовательным или последовательно-параллельным соединением тел,

называемых кинематическими звеньями, и предназначенная для преобразования движения этих звеньев в требуемое (заданное) движение схвата. При этом кинематические звенья соединяются друг с другом подвижно с помощью кинематических пар.

Кинематическая цепь, образующая манипулятор, имеет два оконечных звена: одно из них будет являться основанием – стойкой (ему присваивается нулевой номер), а другое оконечное звено оснащается схватом. Этому оконечному звену присваивается последний n-й номер, равный при последовательном соединении звеньев числу подвижных звеньев манипулятора.

Кинематическое звено – совокупность жестко соединенных друг с другом тел, входящих в состав механизма, в данном случае в состав манипулятора.

Кинематическая пара – подвижное соединение двух кинематических звеньев, допускающее их вполне определенное движение относительно друг друга.

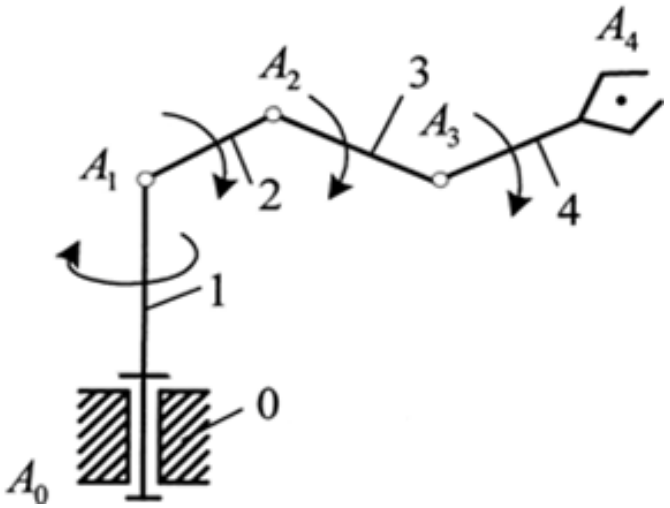


Рисунок 6 – Манипулятор на основе разомкнутой цепи

Элементы кинематической пары – поверхности, линии или точки, по которым соприкасаются звенья, образующие данную кинематическую пару.

Кинематическая цепь – это совокупность кинематических звеньев, подвижно соединенных друг с другом с помощью кинематических пар.

Если в кинематической цепи есть кинематические звенья, входящие в одну кинематическую пару, то такая цепь называется разомкнутой, а если же каждое звено входит, как минимум, в две кинематических пары, то это замкнутая кинематическая цепь.

Манипулятор может быть образован как на основе разомкнутой кинематической цепи (рисунок 6) с последовательным соединением звеньев, так и на основе замкнутой кинематической цепи (рисунок 7) с последовательно-параллельным соединением звеньев (роботы с параллельной кинематикой, в частности, гексаподы на основе платформы Стюарта).

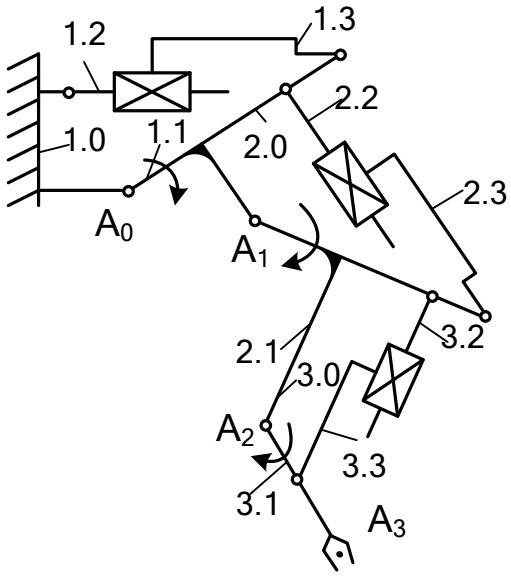


Рисунок 7 – Манипулятор с параллельной кинематикой

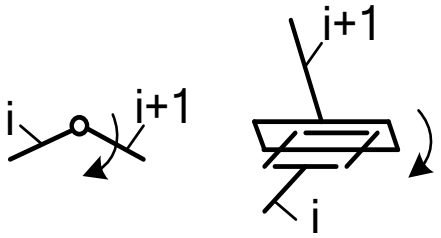
От характера кинематических пар и от их взаимного расположения в манипуляторе зависят законы преобразования движения.

Кинематические пары допускают вполне определенные движения образующих их звеньев относительно друг друга. Эта определенность достигается теми ограничениями, которые создают пары геометрией своих элементов.

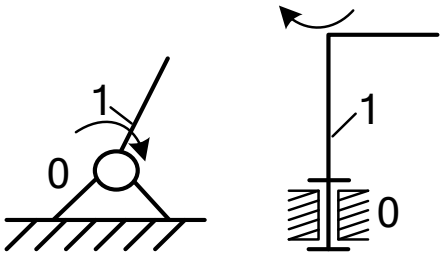
Пары классифицируют по классам, номер которого равняется числу ограничений (числу условий связи), накладываемых данной парой.

В манипуляторах промышленных роботов чаще всего используют кинематические пары пятого класса. Далее приведены их условные обозначения.

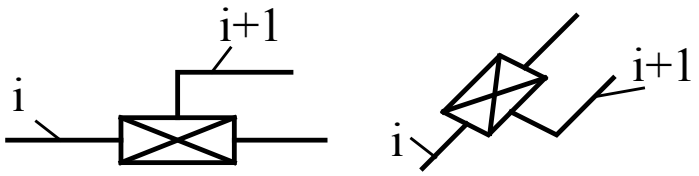
Вращательная пара, соединяющая подвижные звенья



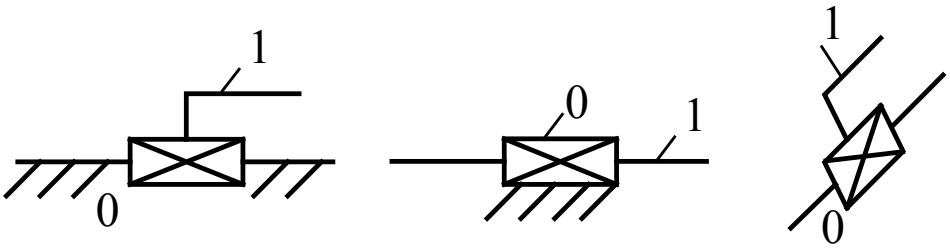
Вращательная пара, соединяющая неподвижное звено (стойку) с подвижным



Поступательная пара, соединяющая подвижные звенья



Поступательная пара, соединяющая неподвижное звено (стойку) с подвижным



Одной из главных характеристик манипулятора является его число степеней свободы.

Для произвольной кинематической цепи следует использовать формулу Сомова – Малышева.

$$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1 = 6n - \sum_{i=1}^{i=5} ip_i ,$$

где p_i – число кинематических пар i-го класса.

Для манипуляторов с кинематическими парами 5- го класса

$$W=6n–5p_5.$$

Например, для манипулятора, представленного на рисунке 6:

$$W=6*4–5*4=24–20=4.$$

Так как в манипуляторе с последовательной кинематикой каждому подвижному звену соответствует одна кинематическая пара пятого класса, то $n=p_5$. Следовательно, $W=6n–5n=n$ или $W=p_5$, то есть число степеней подвижности в таких манипуляторах равно числу подвижных звеньев и числу кинематических пар.

Использование в манипуляторах в основном одноподвижных вращательных или поступательных пар 5-го класса связано с тем, что для определенности движения одного звена относительно другого в случае, если они подвижно соединены парой 5-го класса требуется задание одного перемещения (рисунок 8), что легко реализуется современными двигателями, которые приводят в движение либо вал (электродвигатели), либо шток (пневмо- и гидродвигатели).

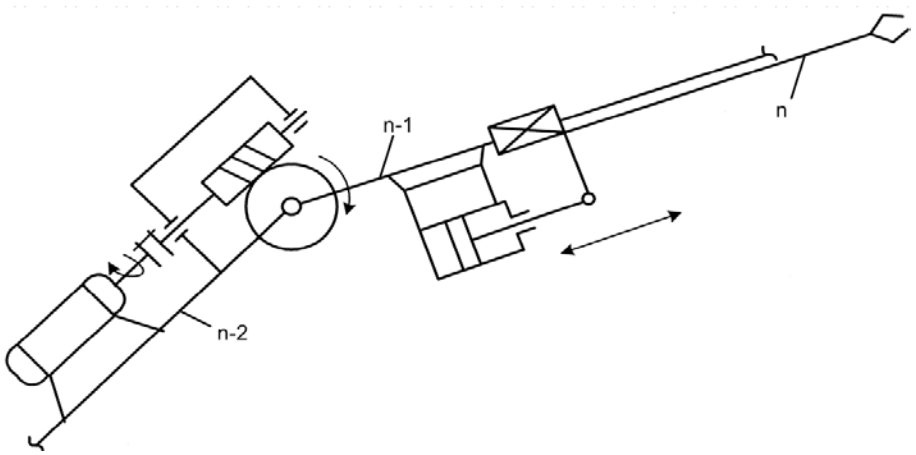


Рисунок 8 – Схема расположения приводов на звеньях манипулятора

Для обеспечения пространственного движения схвата в общем случае достаточно трех переносных степеней подвижности робота, расположенных относительно друг друга определенным образом. Основными минимально необходимыми условиями обеспечения пространственного движения схвата в манипуляторе, образованного парами 5-го класса, являются:

1) наличие двух вращательных пар с непараллельными осями (обычно оси в этом случае перпендикулярны друг другу) и третьей вращательной или поступательной пары, обеспечивающей изменение радиуса сферы (рисунок 9 а);

2) наличие двух вращательных пар с параллельными осями и третьей поступательной пары, направляющая которой неперпендикулярна осям вращательных пар, или вращательной пары, ось которой непараллельна осям предыдущих пар (рисунок 9 б);

3) наличие двух поступательных пар с непараллельными направляющими и одной вращательной пары (рисунок 9 в), ось которой неперпендикулярна плоскости, образованной осями направляющих поступательных пар, или поступательной пары, направляющая которой непараллельна названной плоскости (обычно направляющие перпендикулярны друг другу, а ось вращательной пары параллельна плоскости).

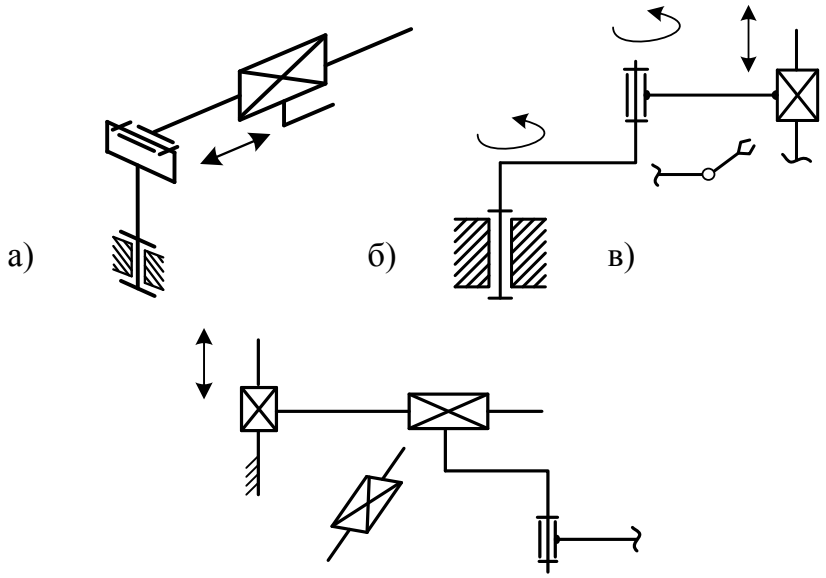
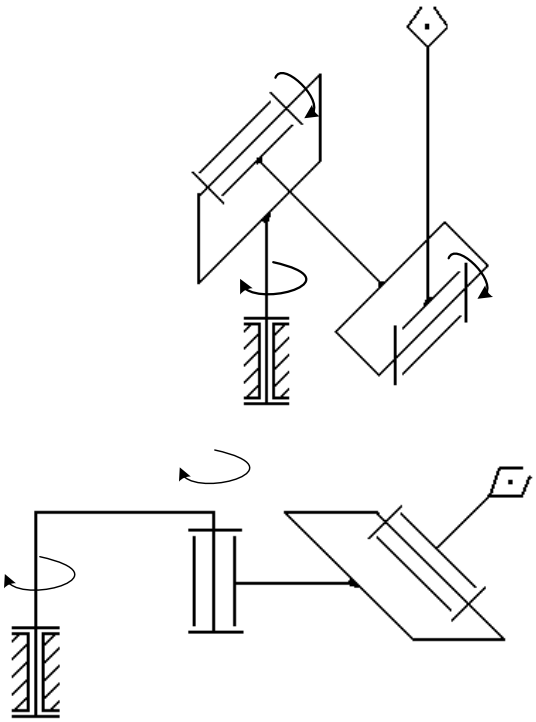


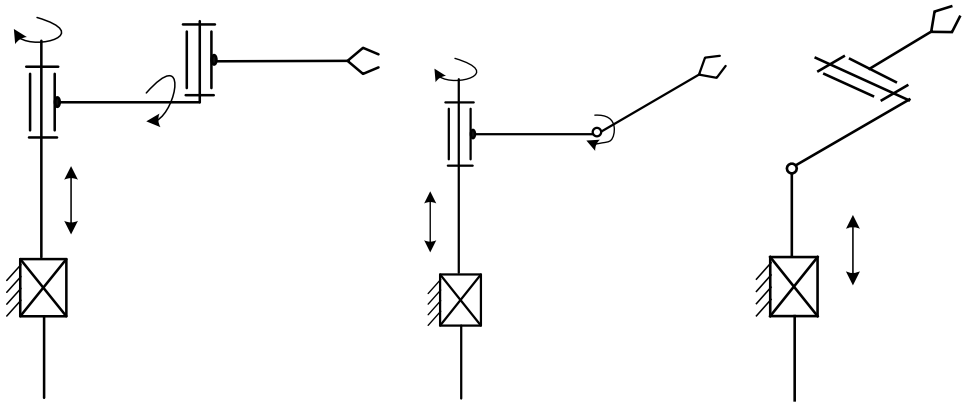
Рисунок 9 – Переносные движения манипулятора

Далее приводятся основные манипуляционные системы, обеспечивающие переносные движения схвата манипулятора при различной последовательности использования вращательных и поступательных кинематических пар.

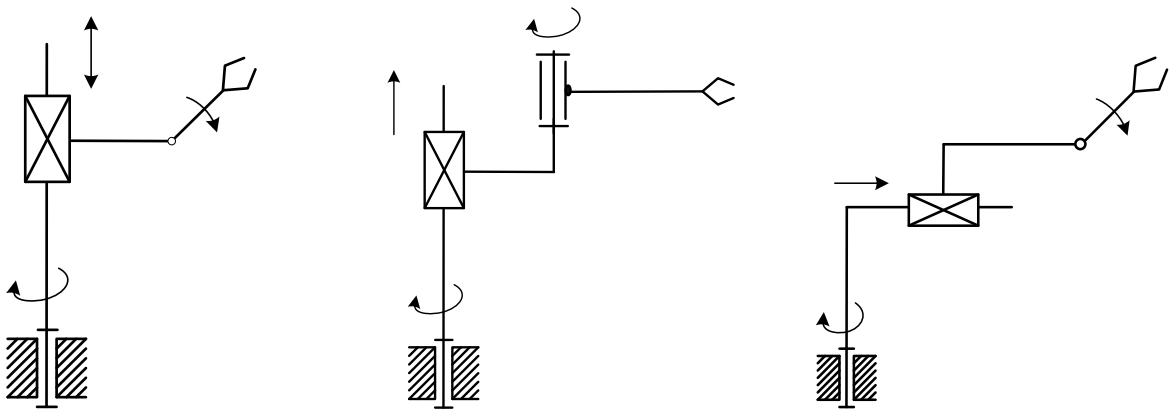
1) Вращательная – вращательная – вращательная



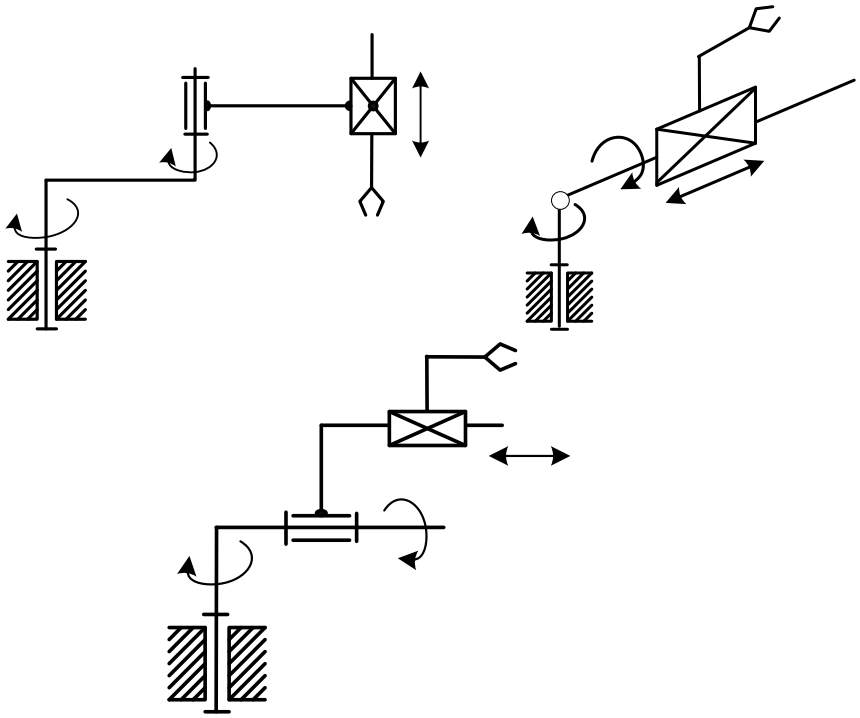
2) Поступательная – вращательная – вращательная



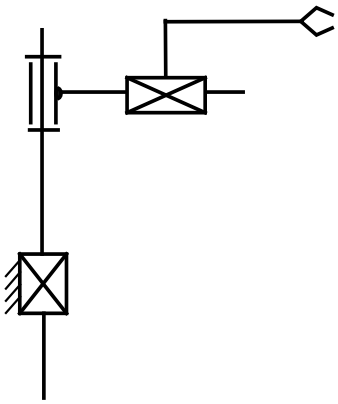
3) Вращательная – поступательная – вращательная



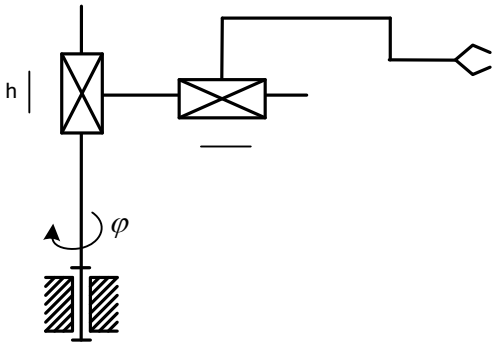
4) Вращательная – вращательная – поступательная



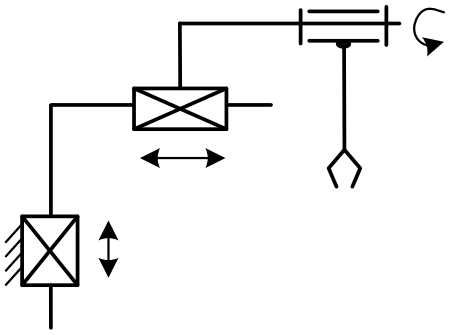
5) Поступательная – вращательная – поступательная



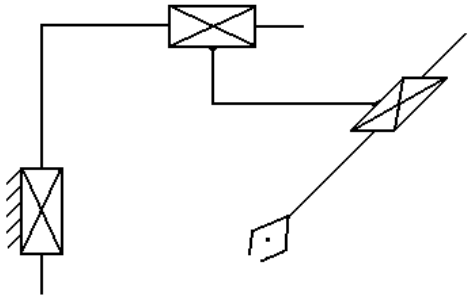
6) Вращательная – поступательная – поступательная



7) Поступательная – поступательная – вращательная



8) Поступательная – поступательная – поступательная



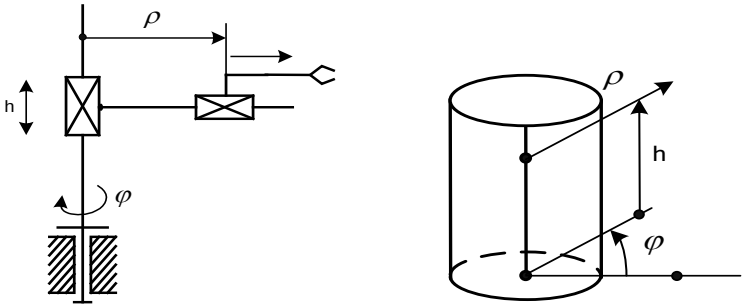
Перестановка поступательной и вращательной пары в некоторых случаях не влияет на форму рабочей зоны, например схемы 2 и 3 имеют одинаковые рабочие зоны. Не все из показанных выше примеров обеспечивают абсолютно разные рабочие зоны. На динамику манипулятора перестановка пар различных типов оказывает существенное влияние, а следовательно, и на характер управляющих воздействий. Более предпочтительной по энергетическим затратам является схема 4, так как для вертикального перемещения груза в этой схеме не требуется перемещение промежуточных звеньев.

Схемы 1, 4, 6, 8 являются наиболее распространенными и по ним выполнено большинство промышленных роботов.

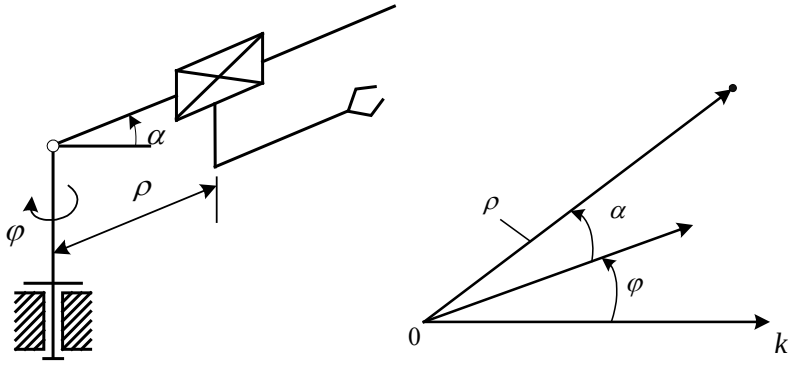
Переносные степени подвижности удобно классифицировать по системе координат, которую обеспечивает та или иная комбинация кинематических пар манипулятора.

Различают четыре основные системы координат манипуляторов:

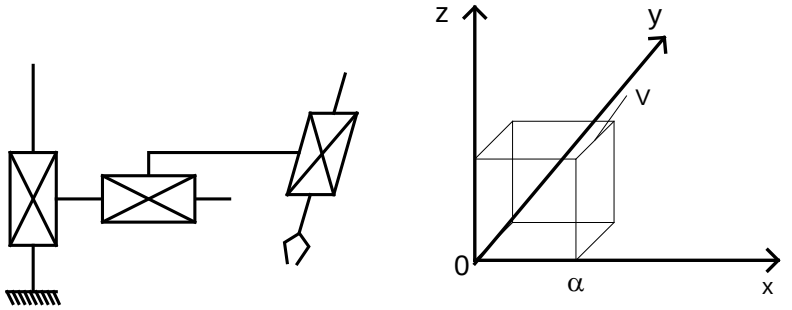
1) Цилиндрическая:



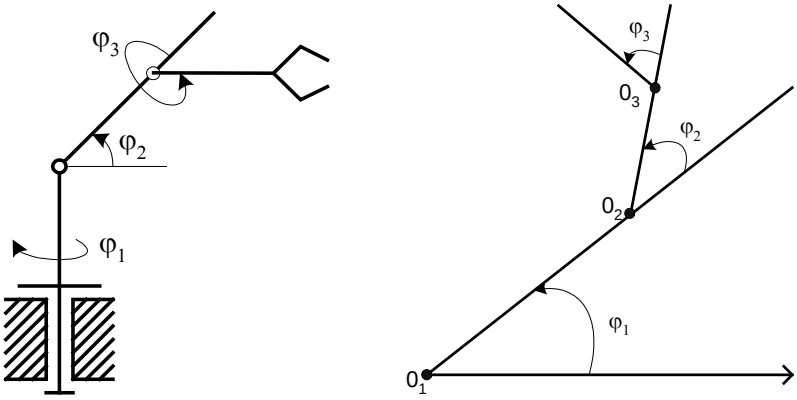
2) Сферическая:



3) Прямоугольная:



4) Ангулярная (угловая):

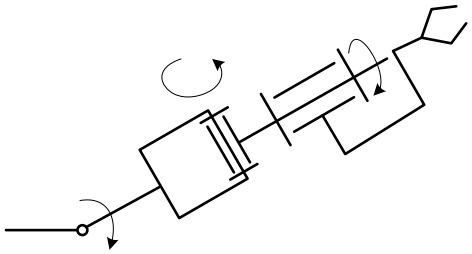


Если в заданной точке рабочего пространства манипулятора его схват должен иметь вполне определенную ориентацию, то манипулятор необходимо снабдить тремя ориентирующими степенями подвижности. Хотя в промышленных роботах обычно обходятся одной-двумя ориентирующими степенями подвижности.

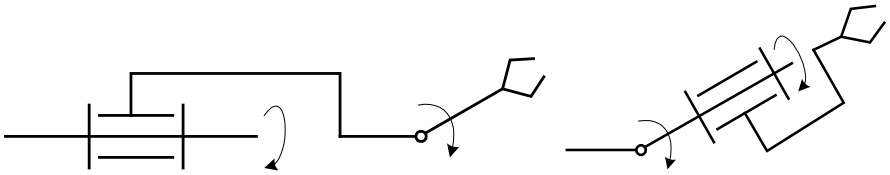
Чтобы не вносить помехи в положение схвата или свести их к минимуму, ориентирующие степени подвижности делают так, чтобы они как можно меньше перемещали схват.

Основные манипуляционные системы, обеспечивающие ориентирующие движения схвата.

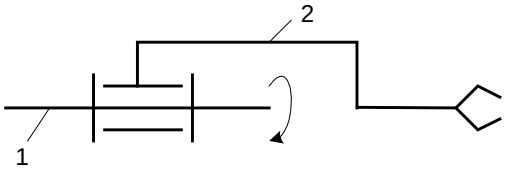
1) Обеспечение полной пространственной ориентации схвата:



2) Ротация с дополнительным пространственным движением схвата:



3) Ротация схвата:



4) Без ориентирующих степеней подвижности (в этом случае оборудование расставляется так, чтобы рука робота оказывалась в требуемом относительно него положении).

Задание: изучите выданные вам модели роботов-манипуляторов определите системы координат, вычертите кинематические последовательности, манипуляционные схемы и сделайте чертежи их общего вида.

5. Решение прямых и обратных задач кинематики манипуляторов

Решение прямой задачи кинематики манипуляторов при позиционном (цикловом) управлении.

Позиционное управление обеспечивает движение схвата от одной фиксированной точки к другой с остановкой в каждой точке. Поэтому с теоретической точки зрения достаточно рассмотреть движение между двумя соседними точками, которые можно назвать: одну начальной, в которой схват находится в данное время, другую – конечной, куда схват должен переместиться.

При позиционном управлении таких точек более двух: 3,4,…N.

Цикловое управление является частным случаем позиционного. При цикловом управлении задаются две точки позиционирования, находящиеся, как правило, на значительном расстоянии друг от друга: место хранения заготовок

– рабочая зона станка. Примем, что для решения прямой задачи при позиционном управлении известны координаты начальной и конечной точек схвата в неподвижной системе координат, связанной с неподвижным (нулевым) звеном манипулятора. Будем также считать, что известны значения обобщённых координат, соответствующих начальному и конечному положениям схвата. Например, для двухподвижного манипулятора (рисунок 10) должны быть известны значения:

$$q_1^н = \Theta_1^н;\ q_1^к = \Theta_1^к;\ q_2^н = \Theta_2^н;\ q_2^к = \Theta_2^к.$$

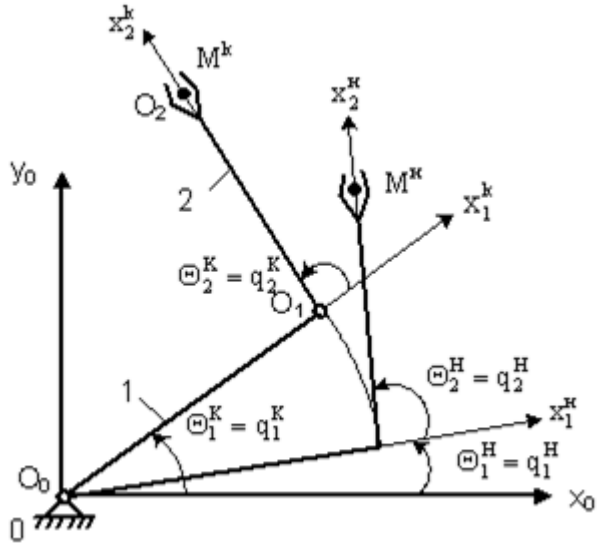


Рисунок 10 – Двухподвижный манипулятор

Прямая задача кинематики в этом случае разделяется на две подзадачи:

Первая подзадача: планирование траекторий в пространстве обобщенных координат. Эта подзадача сводится к определению положения одного звена относительно предшествующего ему звена, то есть к определению обобщенных координат в функции времени:

$$q_i = q_i(t),\ (i=1,\ldots,n).$$

Вторая подзадача заключается в определении траектории движения схвата и его ориентации в пространстве (при необходимости и всех других характерных точек звеньев) при его движении от начальной точки к конечной.

Решение первой подзадачи начинается с выбора общего вида закона движения звеньев по обобщенной координате.

Наибольшее распространение получили два закона движения: прямоугольный и синусоидальный законы движения (название дано по виду диаграмм ускорений).

Для прямоугольного закона характерно минимально возможные при данной длительности интервалов разгона и торможения значения ускорений, следовательно, и сил инерций при движении одного звена относительно другого. Однако в начале и конце интервалов разгона и торможения возникают так называемые «мягкие» удары, связанные с мгновенным изменением в

указанные моменты инерционных воздействий (сил или моментов сил инерций).

При движении i-го звена относительно (i-1)-го по прямоугольному закону i-е звено на интервале t_p разгоняется под действием прилагаемого усилия, развивающего постоянное ускорение $\ddot{q}_i$. При достижении скорости $\dot{q}_i^{П}$ ускорение принимает значение, равное 0, а усилие привода тратится на преодоление сил трения.

На интервале торможения работают устройства торможения, которые развивают силовое воздействие для обеспечения отрицательного ускорения $\ddot{q}_i^{T}$.

Длительности интервалов разгона t_{pi}, движения с постоянной скоростью $t_{Пi}$ и торможения t_{Ti} связаны зависимостью $t_{pi} + t_{Пi} + t_{Ti} = T$, где T – заданное время движения от начальной точки к конечной. Поэтому произвольно можно назначать лишь длительности двух интервалов, например: t_{pi} и t_{Ti}. Для обеспечения наибольшего быстродействия робота следует принять $t_{pi} = t_{Ti} = 0{,}5T$. В этом случае в первую половину интервала движение i-го звена будет равноускоренным, а во вторую – равнозамедленным.

Так как в конце интервала разгона и в начале интервала торможения скорость i-го звена одинакова, то $\ddot{q}_i^{p} \cdot t_{pi} = \ddot{q}_i^{T} t_{Ti}$, значит $\ddot{q}_i^{T} = q_i^{p} \cdot t_{pi} / t_{Ti}$.

При выбранных длительностях интервалов разгона и торможения необходимо найти такую величину ускорения $\ddot{q}_i^{p}$, при которой бы звено за заданное время T переместилось из начальной точки в конечную.

По графику перемещения i-го звена (рисунок 11) можно записать уравнение связи:

$$0{,}5\ddot{q}_i^{p} t_{pi}^2 + \ddot{q}_i^{p} \cdot t_{pi} \cdot t_{Пi} + 0{,}5\ddot{q}_i^{T} t_{Ti}^2 = q_i^{k} - q_i^{н},$$

где $\ddot{q}_{in} = \ddot{q}_i^{p} \cdot t_{pi} \cdot t_{Пi}$, (i = 1,…,n).

Откуда с учетом зависимости $\ddot{q}_i^{T} = q_i^{p} \cdot t_{pi} / t_{Ti}$ получается

$$\ddot{q}_i^{p} = (q_i^{k} - q_i^{н}) / \left[\left(0{,}5t_{pi} + t_{Пi} + 0{,}5t_{Ti} \right) \cdot t_{pi} \right].$$

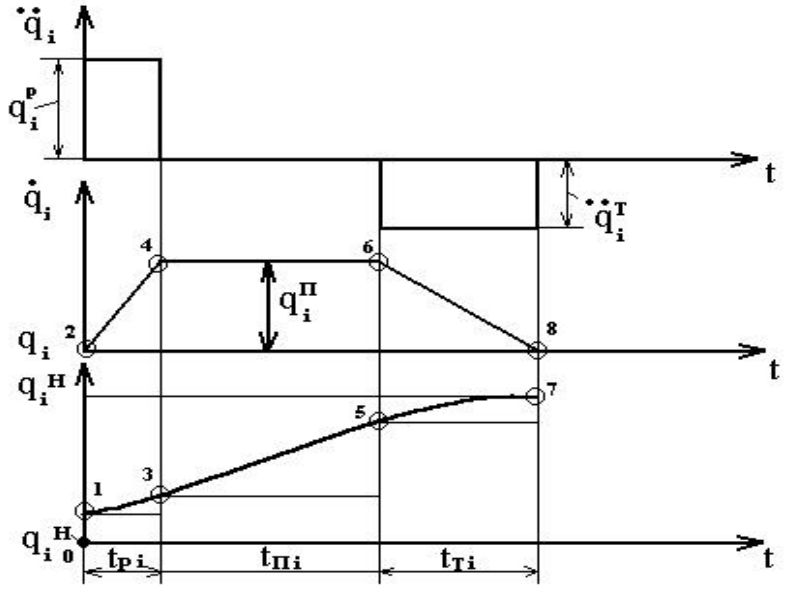


Рисунок 11 – Закон движения – прямоугольное ускорение

После определения обобщенных ускорений $\ddot{q}_i^{\,р}$ и $\ddot{q}_i^{\,Т}$ по известным из физики зависимостям можно определить обобщенные скорости $\dot{q}_i$ и обобщенные координаты i-го звена в любой момент времени:

– участок разгона $(0 \le t \le t_{pi})$

$$\dot{q}_i = \ddot{q}_i^{\,р} \cdot t; \quad q_i = q_i^{н} + 0{,}5\ddot{q}_i^{\,р}\, t^2;$$

– участок движения с постоянной обобщенной скоростью $(t_{pi} < t \le t_{pi} + t_{Пi})$

$$\dot{q}_i = \ddot{q}_i^{\,р} \cdot t_{pi} = const; \quad q_i = q_i^{н} + 0{,}5\ddot{q}_i^{\,р} \cdot t_{pi}^2 + \ddot{q}_i^{\,р} \cdot t_{pi} \cdot (t - t_{pi});$$

– участок торможения $(t_{pi} + t_{Пi} < t \le T)$;

$$\dot{q}_i = \ddot{q}_i^{\,р} \cdot t_{pi} - \ddot{q}_i^{\,Т} \cdot (t - t_{pi} - t_{Пi});$$

$$q_i = q_i^{н} + 0{,}5\ddot{q}_i^{\,р} \cdot t_{pi}^2 + \ddot{q}_i^{\,р} \cdot t_{pi} \cdot t_{Пi} + \ddot{q}_i^{\,р} \cdot t_{pi} \cdot (t - t_{pi} - t_{Пi}) - 0{,}5\ddot{q}_i^{\,Т} \cdot (t - t_{pi} - t_{Пi})^2.$$

Итак, получены зависимости $q_i = q_i(t)$, при $0 \le t \le T$, (i=1,…,n), подставляя которые в формулу

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = T_{0,1} \cdot T_{1,2} T_{2,3} \cdots T_{n-1,n.}$$

можно определить траекторию схвата.

Полученный закон движения представляет собой простейший пример использования сплайн-функций для описания относительного движения звеньев по обобщенной координате. При рассмотрении полученной функции именно как сплайн-функции, то есть кусочно-непрерывной функции, составленной из нескольких отрезков некоторых непрерывных функций: график требуемой функции должен пройти через восемь фиксированных точек (рисунок 11), которые можно использовать в качестве условий проектирования закона движения. Для их удовлетворения надо в аналитическом выражении иметь восемь свободных коэффициентов. Тогда:

– для 1-го участка $0 \le t \le t_р$ $\quad q_i^р(t) = a_2 t^2 + a_1 t + a_0$;
– для 2-го участка $t_р < t \le t_р + t_П$ $\quad q_i^п(t) = b_1 t + b_0$;
– для 3-го участка $t_р + t_п < t \le T$ $\quad q_i^Т(t) = c_2 t^2 + c_1 t + c_0$.

Сформулированные граничные условия:

$t = 0$; $\quad 1)\, q^р(0) = q^н$; $\; 2)\, \dot{q}^р(0) = 0$;

$t = t_р$; $\quad 3)\, q^р(t_р) = q^П(t_П)$; $\; 4)\, \dot{q}^р(t_р) = \dot{q}^П(t_р)$;

$t = t_р + t_П$; $\quad 5)\, q^П(t_р + t_П) = q^Т(t_р + t_П)$; $\; 6)\, \dot{q}^П(t_р + t_П) = \dot{q}^Т(t_р + t_П)$;

$t = T$; $\quad 7)\, q^Т(T) = q^k$; $\; 8)\, \dot{q}^Т(T) = 0$.

Подставляя значения обобщенных координат, скоростей и ускорений на границах участков в полиномы, выражающие законы движения, и в их производные, после преобразований и решения соответствующей системы уравнений получается следующее:

$$\dot{q}^П = b_1 = \frac{q^к - q^н}{0{,}5t_р + t_П + 0{,}5t_Т}; \quad \ddot{q}^р = 2a_2 = \frac{b_1}{t_р} = \frac{q^к - q^н}{(0{,}5t_{рi} + t_{Пi} + 0{,}5t_{Тi})t_{рi}}.$$

Из чисто формальных соображений получены те же самые основные зависимости.

Следует обратить внимание, что по различным степеням подвижности значения интервалов разгона, движения с постоянной скоростью и торможения в общем случае могут быть различны.

Для обеспечения более плавной безударной работы привода i-го звена используют законы движения, в которых ускорение плавно изменяется от нуля в начале интервала разгона до некоторой максимальной величины, а затем плавно убывает до нуля.

Одним из наиболее распространенных законов такого типа является синусоидальный закон (рисунок 12).

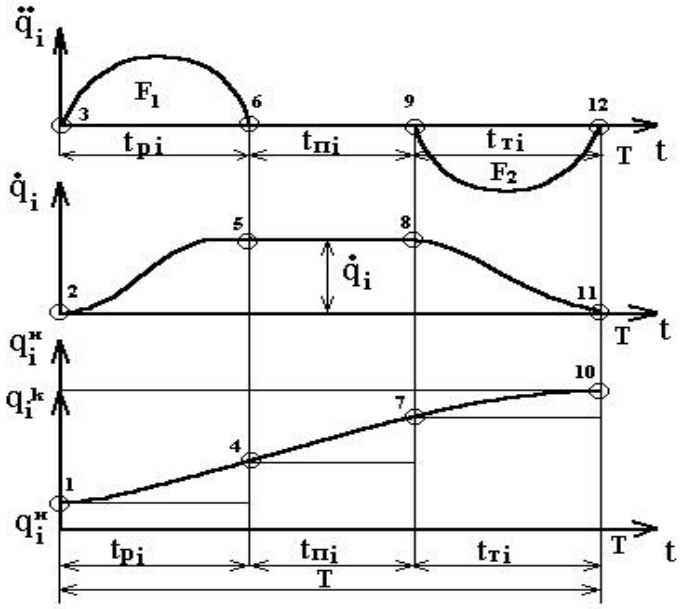


Рисунок 12 – Синусоидальный закон движения

Для установления зависимостей между длительностями интервалов, величинами обобщенных ускорений, скоростей и перемещений здесь удобно использовать диаграмму обобщенных скоростей $\dot{q}_i(t)$:

$$\dot{q}_i(t)=\begin{cases} 0{,}5\dot{q}_i^{\,П}\left[1-\cos\dfrac{\pi\cdot t}{t_{pi}}\right] & при\ 0\le t\le t_{pi}; \\ \dot{q}_i^{\,П} & при\ t_{pi}<t\le t_{pi}+t_{ni}; \\ 0{,}5\dot{q}_i^{n}\left[1+\cos\dfrac{\pi\left(t-t_{pi}-t_{Пi}\right)}{T-t_{pi}-t_{Пi}}\right] & при\ t_{pi}+t_{ni}<t\le T. \end{cases}$$

Интегрируя эту зависимость от 0 до T и приравнивая результат к перемещению по обобщенной координате q_i, равному q_i^k-$q_i^н$, находится постоянная интегрирования $\dot{q}_i^{\,П}=\text{const}$, а после этого и зависимость $q_i(t)$.

Дифференцируя выражение для обобщенной скорости $\dot{q}_i(t)$, определяются обобщенные ускорения $\ddot{q}_i(t)$.

Полученные законы движения являются, по сути, сплайн-функциями, то есть функциями, составленными из отрезков нескольких простейших функций, имеющих касание друг с другом того или иного порядка. При необходимости можно самим сконструировать подходящий закон движения.

С учетом того, что в каждой матрице $T_{i-1,i}$ элементы являются функциями одной обобщенной координаты q_i:

$$q_i(t) = \begin{cases} \Theta_i(t), & \text{если пара вращательная;} \\ S_i(t), & \text{если пара поступательная.} \end{cases}$$

откуда следует, что

$$T_{o\,n}(q_1, \ldots q_n; t) = T_{0\,1}[q_1(t)] \cdot T_{1\,2}[q_2(t)] \cdots T_{n-1,n}[q_n(t)]$$

из которого в соответствии с

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = T_{0,1} \cdot T_{1,2} T_{2,3} \cdots T_{n-1,n.}$$

определяются значения шести наддиагональных элементов:

$$\begin{vmatrix} - & a_{12}(t) & a_{13}(t) & a_{14}(t) \\ - & - & a_{23}(t) & a_{24}(t) \\ - & - & - & a_{34}(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = T_{01}[q_1(t)] \cdot T_{12}[q_2(t)] \cdots T_{n-1,n}[q_n(t)]$$

Каждый из наддиагональных элементов есть также функция обобщенных координат и времени, то есть $a_{k,l} = a_{k,l}(q_1, \ldots, q_n; t)$, (k=1,2,3; l=2,3,4).

Таким образом, решение 2-й подзадачи есть решение основной прямой задачи кинематики манипулятора и она решается по изложенному ранее алгоритму при известных, как результат выполнения 1-й подзадачи, зависимостях $q_i = q_i(t);\ 0 \le t \le T$.

Обратная задача кинематики манипуляторов является одной из основных задач кинематического и динамического анализа и синтеза манипуляторов.

Она решается при контурном управлении роботом, когда схват должен перемещаться по заданной в пространстве и времени траектории, и заключается в определении значений обобщенных координат манипулятора по заданному положению схвата. В результате решения обратной задачи должны быть определены в аналитической или табличной форме зависимости

$$\left.\begin{array}{l} q_1 = q_1(\Theta_1, S_1, a_1, \alpha_1, x_{0n}, y_{0n}, z_{0n}, x_0 \wedge z_n, y_0 \wedge z_n, x_0 \wedge y_n; t)\ ; \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ q_i = q_i(\Theta_i, S_i, a_i, \alpha_i, x_{0n}, y_{0n}, z_{0n}, x_0 \wedge z_n, y_0 \wedge z_n, x_0 \wedge y_n; t)\ ; \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ q_n = q_n(\Theta_n, S_n, a_n, \alpha_n, x_{0n}, y_{0n}, z_{0n}, x_0 \wedge z_n, y_0 \wedge z_n, x_0 \wedge y_n; t) \end{array}\right\}$$

При работе манипулятора положение схвата непрерывно меняется по заданному закону движения. При этом центр схвата будет описывать требуемую траекторию, а схват будет ориентирован в пространстве вполне определенным образом, то есть обратная задача решается по заданным зависимостям

$$x_{0n} = x_{0n}(t); \quad y_{0n} = y_{0n}(t); \quad z_{0n} = z_{0n}(t);$$

$$x_0 \hat{} z_n = f_1(t); \quad y_0 \hat{} z_n = f_2(t); \quad x_0 \hat{} y_n = f_3(t).$$

Для обеспечения произвольного требуемого положения схвата в общем случае необходимо шесть степеней подвижности, три из которых – переносные – должны обеспечивать заданное положение схвата в пространстве, то есть заданные значения координат $x_{0n} = x_{0n}(t); \; y_{0n} = y_{0n}(t); \; z_{0n} = z_{0n}(t),$ а другие три – ориентирующие – заданную ориентацию схвата: $x_0 \hat{} z_n = f_1(t); \quad y_0 \hat{} z_n = f_2(t);$ $x_0 \hat{} y_n = f_3(t).$

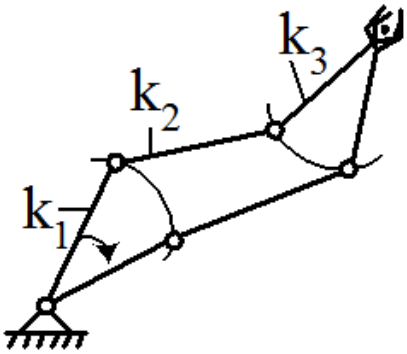


Рисунок 13 – Возможные положения манипулятора

Если число степеней подвижности манипулятора меньше шести, то схват не сможет занять произвольное положение и на его положение и ориентацию будут наложены ограничения.

Если число степеней подвижности больше шести или больше заданных условий, то манипулятор приобретает свойство маневренности, в результате которой схват может занять требуемое положение при различных положениях промежуточных звеньев (Рисунок 13).

Избыточные степени подвижности можно использовать для удовлетворения каких-либо дополнительных условий, например для обхода препятствий.

В примерах, если специально не оговорено, будут рассматриваться случаи, когда число степеней подвижности равно числу условий на движение схвата.

Рассмотрим несколько простых случаев решения обратной задачи кинематики манипулятора.

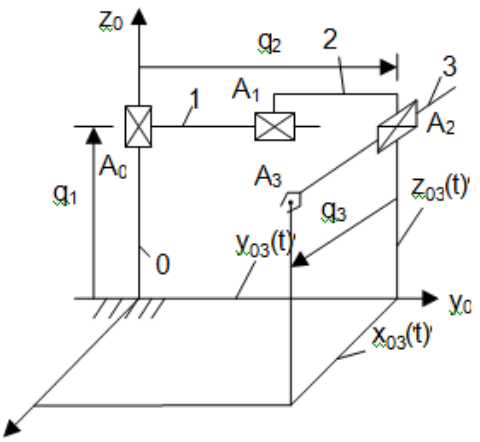


Рисунок 14 – Манипулятор с прямоугольной системой координат

Пример 1. Манипулятор с прямоугольной системой координат (рисунок 14).

Задано: n = 3; $x_{03}(t)$; $y_{03}(t)$; $z_{03}(t)$.

Определить: $q_1(t)$; $q_2(t)$; $q_3(t)$.

Непосредственно по рисунку 14 можно установить, что:

$q_1(t) = z_{0n}(t)$; $q_2(t) = y_{0n}(t)$; $q_3(t) = x_{0n}(t)$

Равенство обобщенных координат требуемым координатам схвата является важным и основным преимуществом манипуляторов с прямоугольной системой координат, так как не требует сложных вычислений при определении управляющих воздействий.

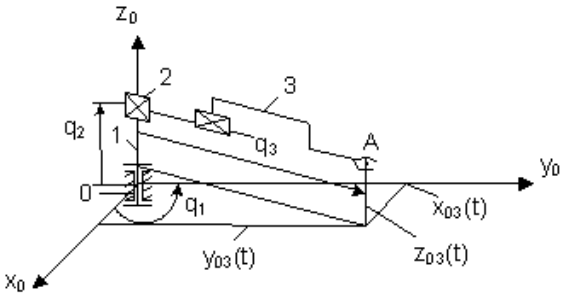


Рисунок 15 – Манипулятор с цилиндрической системой координат

Пример 2. Манипулятор с цилиндрической системой координат (рисунок 15).

Задано: n = 3, $x_{03}(t)$, $y_{03}(t)$, $z_{03}(t)$.

Определить: $q_1(t)$, $q_2(t)$, $q_3(t)$.

По рисунку 15 можно определить:

$$q_2(t) = z_{03}(t);$$

$$q_3(t) = \sqrt{x_{03}^2(t) + y_{03}^2(t)};$$

$$q_1(t) = \arcsin\frac{y_{03}(t)}{q_3(t)}.$$

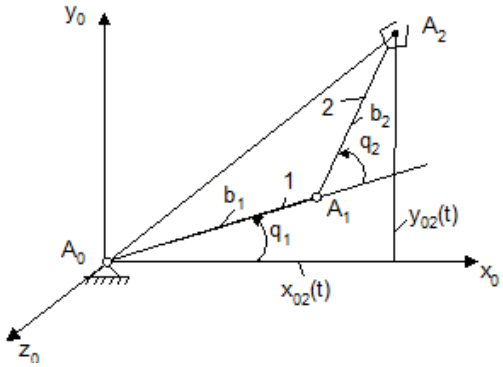


Рисунок 16 – Манипулятор с угловой системой координат

Пример 3. Манипулятор с угловой (ангулярной) системой координат (рисунок 16).

Задано: $x_{02}(t)$, $y_{02}(t)$.

Определить: $q_1(t)$, $q_2(t)$.

Данную задачу можно решить, как и раньше, из чисто геометрических соображений:

$$q_2(t) = \arccos\frac{\rho_{02}^2 - b_1^2 - b_2^2}{2 \cdot b_1 \cdot b_2};$$

$$q_1(t) = \alpha - \beta,$$

где:

$$\rho = \sqrt{x_{02}^2(t) + y_{02}^2(t)};$$

$$\alpha = \arccos\frac{x_0(t)}{\rho};$$

$$\beta = \arccos\frac{b_2^2 - \rho^2 - b_1^2}{2 \cdot \rho \cdot b_1}.$$

Однако в этом случае может оказаться полезным и более общий подход, заключающийся в составлении уравнений, связывающих обобщенные и абсолютные координаты манипулятора, в частности такими уравнениями могут быть аналитические зависимости проекций характерных точек манипулятора.

Запишем уравнения проекций характерной точки A_2 схвата манипулятора на оси координат:

$$x_{02}(t) = b_1 \cdot \cos q_1 + b_2 \cdot \cos(q_1 + q_2);$$
$$y_{02}(t) = b_1 \cdot \sin q_1 + b_2 \cdot \sin(q_1 + q_2).$$

Решая эту систему уравнений относительно q_1 и q_2, можно определить требуемые законы движения по обобщенным координатам $q_1(t)$ и $q_2(t)$, уже в определенной степени абстрагируясь от конкретной схемы манипулятора.

Два последних примера показывают, что даже для простейших манипуляторов определение требуемых по заданной траектории движения

схвата законов изменения обобщенных координат может представлять определенные трудности.

К настоящему времени прямого решения обратной задачи для манипуляторов общего вида не существует. В общем случае обратная задача кинематики манипуляторов решается алгоритмически, то есть численно.

Задание: Перепишите и прорешайте самостоятельно задачи приведённые в главе. Попробуйте составить и решить прямые и обратные задачи кинематики для двух-трёх звеньев роботов-манипуляторов, используемых Вами в предыдущих лабораторных работах. Уточните условия задания у преподавателя. При решении можно использовать имеющиеся на кафедре программные пакеты для математических вычислений.

6. Мехатронные узлы как часть мехатронной системы. Согласование различных частей для выполнения целевой функции

Основная цель этого и последующих занятий заключается в закреплении всего пройденного материала на дисциплинах “Основы мехатроники” и “Конструирование мехатронных устройств”. Для этих заданий студентам необходимо разделиться на подгруппы по 3 человека.

Задание: на базе конвейера фирмы Festo из компонентов комплекса и микроконтроллерного оборудования с роботом-манипулятором соберите мехатронное устройство, выполняющая функции, описанные далее. При установке на конвейер корпуса пневмоклапана, он должен приходить в движение до позиции в середине полотна. Когда деталь доедет до неё, должен произойти останов на 3 секунды, имитирующий процесс обработки. После этого деталь должна переместиться на второй край конвейера. Если на конце конвейера окажется деталь, то он должен остановиться, а робот-манипулятор должен взять эту деталь и переместить в начало конвейера.

7. Расчёт траектории движения робота-манипулятора и его программирование для автоматизации операций загрузки и выгрузки заготовок в зону механообработки

Для выполнения задания этого занятия студентам группы необходимо предварительно собрать хотя бы одно мехатронное устройство, описанное в предыдущей главе.

Сейчас робот перемещает детали, но делает это по траектории и со скоростями, которые могут оказаться ошибочными, приводящими к большим временным затратам на эту часть автоматического процесса, чем можно сделать.

Задание: попробуйте произвести расчёт и решить задачи прямых и обратных задач кинематики для манипулятора мехатронного устройства. Замерьте скорость перемещения до оптимизации и после. Если необходимо, модифицируйте программу и переместите сам манипулятор на установке.

8. Применение технического зрения для геометрической и цветовой идентификации пространственных объектов

В современных автоматизированных робототехнических комплексах применяется техническое зрение в качестве способа организации обратной связи. По типу измерений оно подразделяется на активное – в процессе

механической обработки детали, и пассивное – на специализированных участках после обработки на токарных и фрезерных станках.

Задание: ознакомьтесь с измерительным оборудованием во время лабораторной работы. Произведите несколько измерений и получите модели деталей. Рассчитайте погрешности измерений и предложите аппаратные и программные способы повышения их точности. Детали выдаются преподавателем на группы студентов по 2-3 человека.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ПРИ НАПИСАНИИ МЕТОДИЧЕСКИХ УКАЗАНИЙ ИСТОЧНИКОВ

1 Хомченко, В. Г. Мехатронные и робототехнические системы: учеб. пособие / В. Г. Хомченко, В. Ю. Соломин. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008. - 160 с.

Карпов Егор Константинович

КОНСТРУИРОВАНИЕ МЕХАТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Методические указания к комплексу лабораторных и практических работ по дисциплине «Конструирование мехатронных устройств»

для студентов направлений подготовки

15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств (профиль «Автоматизация технологических процессов и производств (машиностроение)»)

Авторская редакция

Подписано в печать 13.04.18	Формат 60x84 1/16	Бумага 65 г/м^2
Печать цифровая	Усл. печ. л. 2,00	Уч.-изд. л.2,00
Заказ №80	Тираж 25	Не для продажи

БИЦ Курганского государственного университета.
640020, г. Курган, ул. Советская, 63/4.
Курганский государственный университет.