

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Российский государственный профессионально-педагогический  
университет»  
Институт инженерно-педагогического образования  
Кафедра автомобилей и подъемно-транспортных машин

**Эльяш Н.Н.**

## **ОСНОВЫ РОБОТОТЕХНИКИ**

учебное пособие (конспект лекций)

Екатеринбург 2016

**Эльяш Н.Н.** Основы робототехники: учебное пособие (конспект лекций).  
Екатеринбург: , 2016. 49с.

Содержание пособия полностью соответствует рабочей программе, составленной согласно требованиям ФГОС ВО направления подготовки 44.03.04 Профессиональное обучение (по отраслям). Профиль подготовки - «Транспорт», профилизация «Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины».

Пособие предназначено для самостоятельной учебной работы студентов, а также для внедрения дистанционных технологий обучения.

В пособии приведены основные понятия теории машин и механизмов, необходимые для изучения курса «Основы робототехники»: определение и классификация звеньев, кинематических пар, структурные формулы плоских и пространственных кинематических цепей. Рассмотрены вопросы, связанные с определением степени подвижности механизмов.

Изложены вопросы общего устройства и технические характеристики промышленных роботов и манипуляторов. Даны определения зоны обслуживания, маневренности, угла сервиса и коэффициента сервиса.

Рассмотрены задачи синтеза кинематических цепей манипуляторов; приведены примеры проектирования различных схем манипуляторов с использованием метода преобразования координат.

Рецензенты:

Зав. кафедрой «Детали машин»

Механико-машиностроительного института УрФУ

доктор техн. наук, профессор

В.В. Каржавин

Зав. кафедрой металлургии, сварочного производства

и методики профессионального обучения

института ИПО РГППУ

доктор техн. наук, профессор

Б.Н. Гузанов

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СТРОЕНИИ МЕХАНИЗМОВ	7
1.1. Основные понятия и определения	7
1.2. Кинематические пары, их классификация	7
1.3. Кинематическая цепь. Структурная формула кинематической цепи.	11
1.4. Замена высших кинематических пар низшими	14
2. СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ	17
2.1. Задачи структурного анализа. Принцип Ассура.	17
2.2. Группы Ассура, их классификация	18
2.3. Основные виды плоских рычажных механизмов	21
2.4. Теорема Грасгофа	23
2.5. Структурный анализ пространственных механизмов	24
3. МЕХАНИЗМЫ МАНИПУЛЯТОРОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ	25
3.1. Общее устройство и составные части промышленных роботов	25
3.2. Структура кинематических цепей манипуляторов	27
3.3. Рабочий объем, зона обслуживания и маневренность манипуляторов	31
3.4. Угол сервиса и коэффициент сервиса	34
3.5. Определение коэффициента сервиса методом объемов	35
3.6. Синтез пространственных кинематических цепей манипуляторов	38
3.6.1. Постановка задачи	38
3.6.2. Метод преобразования координат	39
4. СОСТАВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ	43
4.1. Основные узлы промышленного робота	43
4.2. Рабочие органы	43
4.3. Приводы роботов	45
4.4. Информационно управляющая система	46
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	48

## **ВВЕДЕНИЕ**

В соответствии с Государственным стандартом (ГОСТ 25686-85 "Манипуляторы, автооператоры и промышленные роботы. Термины и определения") промышленный робот (ПР) определяется как *автоматическая машина, стационарная или подвижная, состоящая из исполнительного устройства в виде манипулятора, имеющего несколько степеней подвижности, и перепрограммируемого устройства программного управления для выполнения в производственном процессе двигательных и управляющих функций.*

Манипулятор – это устройство, предназначенное для замены функций руки человека. Существуют манипуляторы с ручным управлением и с автоматическим, программируемым. Последние получают движение от приводов, работающих по заданной программе и называются роботами.

Первый промышленный робот (ПР) был создан в 1962 г. фирмой «Unimation». Это была механическая рука с программным управлением, которая представляла собой пространственную незамкнутую кинематическую цепь, состоящую из нескольких звеньев, имеющих возможность относительного движения. Подобно человеческим плечу, предплечью, кисти, соединенных между собой суставами, звенья механической руки (манипулятора) могли совершать независимые движения в пространстве.

В дальнейшем с развитием робототехники сходство манипуляторов с рукой человека стало утрачиваться, в структурные схемы стали вводиться различные виды кинематических пар, появилась возможность изменения длин звеньев и т.д. Современный манипулятор промышленного робота предназначен для выполнения двигательных функций и конструктивно состоит из опорных (несущих) конструкций, манипуляционной системы, рабочих органов, привода и устройства передвижения.

**Основы робототехники** – это дисциплина, посвященная изучению строения манипуляторов, синтезу кинематических схем роботов и автоматизированных технических систем. Роботы необходимы там, где человеку работать тяжело, опасно, или вообще невозможно, а также в условиях, где необходима идеальная точность операций. Например, робот может вести работы в радиоактивной среде, в вакууме, может обезвредить взрывное устройство или провести микрохирургическую операцию. Для каждого вида работы нужен специальный робот. Всю робототехнику можно разделить по отраслям на промышленную, строительную, авиационную, космическую, подводную, военную .

Промышленные роботы, в свою очередь, подразделяются на три группы по производственно-технологическим признакам:

- производственные, или технологические, выполняющие основные операции технологических процессов;
- подъемно-транспортные, или вспомогательные (ПТПР), выполняющие вспомогательные действия типа "взять - перенести - положить";
- универсальные (УПР), выполняющие различные (и основные, и вспомогательные) операции.

**Транспортные роботы** предназначены для автоматизированного транспортирования объектов, а также для управления различными транспортными системами. Практическое развитие получили ныне наземные транспортные роботы, которые могут быть колесными, шагающими и гусеничными.

Наибольшее развитие и распространение в настоящее время получили колесные транспортные роботы, используемые достаточно широко в промышленных автоматизированных транспортно-складских системах и гибких автоматизированных производствах в виде мобильных автоматических кранов, автоматических управляемых тележек (АУТ),

роботаров и др., оснащаемых во многих случаях различными манипуляционными устройствами [1].

Робототехника находится в родстве с мехатроникой; составляет ее определенную часть.

**Мехатроника** – это дисциплина, основанная на синергетическом объединении узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами, обеспечивающими проектирование и производство качественно новых модулей, систем, машин и систем с интеллектуальным управлением их функциональными движениями.

К мехатронике, например, относятся заводские станки с программным управлением, беспилотные транспортные средства, тормозная система автомобиля с антиблокировочной системой, современная офисная техника и прочее.

Однако у роботов есть признак, который объединяет их со всеми живыми существами – движение. Поэтому робототехника связана, прежде всего, с изучением движения звеньев манипулятора, и во многом **базируется на методических принципах теории механизмов и машин.**

# 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СТРОЕНИИ МЕХАНИЗМОВ

## 1.1. Основные понятия и определения

Машиной называется устройство, предназначенное для преобразования энергии, материалов или информации с целью облегчения или исключения труда человека. Соответственно, машины бывают энергетические, технологические и транспортные, информационные.

Механизмом называется система твердых тел, служащих для преобразования одних видов движения в другие.

Все механизмы состоят из звеньев, которые представляют собой одну деталь, либо несколько неподвижно соединенных между собой деталей. В свою очередь звенья бывают подвижными или неподвижными. Неподвижное звено называют стойкой. За стойку принимают основание, раму, корпус, фундамент и все, что с ними неподвижно связано. Стойка в механизме только одна.

Подвижные звенья бывают входные (ведущие) и выходные (ведомые). Входным называют звено, к которому приложено движение извне, а выходным – звено, которое совершает требуемое движение, для выполнения которого служит данный механизм. Поверхности, линии, точки звена, по которым оно соприкасается с другим звеном, называют элементами звена [1, с. 18-21].

## 1.2. Кинематические пары, их классификация

Подвижные звенья соединяются между собой либо со стойкой; при этом на движение накладывается определенное количество связей (ограничений движению). Подвижное соединение двух соприкасающихся звеньев называется кинематической парой.

Как известно, любое звено, не связанное с другим звеном, в пространстве имеет шесть степеней свободы (шесть независимых движений), показанных на рисунке 1.1.

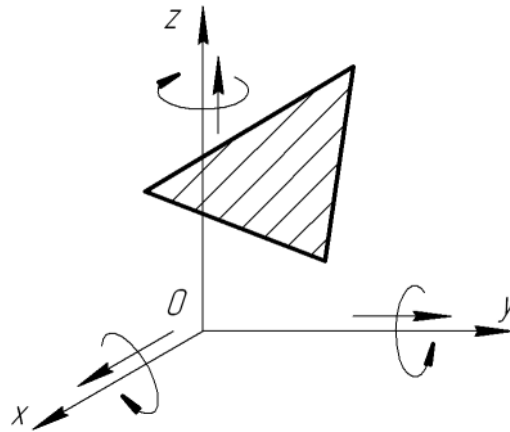


Рис. 1.1. Возможные движения в пространстве звена, не связанного кинематической парой с другим звеном.

Если соединить два звена между собой, то, в зависимости от вида соединения, может быть ограничено 1, 2, 3, 4 или 5 движений. Если ограничить все 6 движений, то получим одно неподвижное звено, и кинематическая пара перестанет существовать. Если звенья не соприкасаются, то кинематической пары также не существует, а есть только свободные звенья.

Таким образом, для существования кинематической пары необходимы три условия:

- наличие двух звеньев;
- контакт между звеньями;
- возможность относительного движения звеньев.

На рисунке 1.2. приведены примеры кинематических пар; прямыми и круговыми черными стрелками показаны возможные относительные движения соприкасающихся звеньев; стрелки зеленого цвета изображают пространственные оси координат.



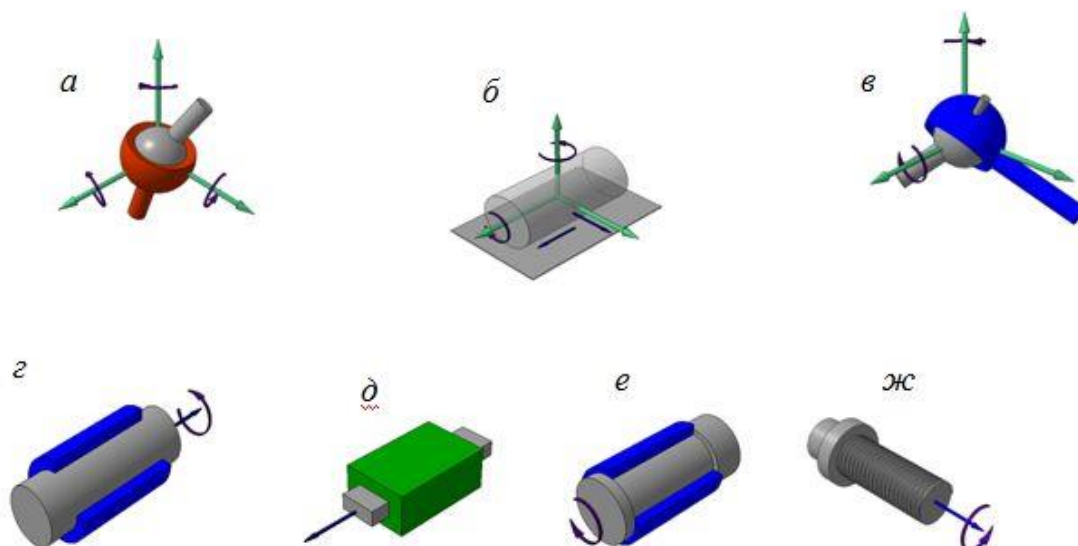


Рис 1.2. Примеры кинематических пар 1-го, 2-го, 3-го, 4-го, 5-го классов:

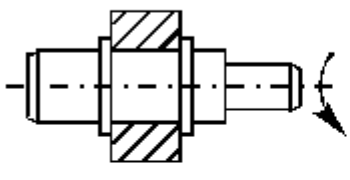
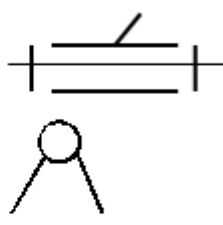
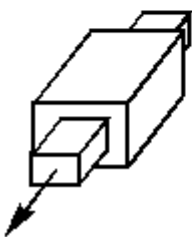
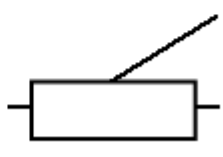
*a* - сферический шарнир, *б* - цилиндр на плоскости, *в* - сферический шарнир с пальцем, *г* – цилиндрическая пара, *д* - поступательная пара, *е* – вращательная пара, *ж* – винтовая пара.

Очевидно, что количество связей ( $S$ ), обусловленных соединением двух звеньев в кинематическую пару, изменяется в пределах:  $1 \leq S \leq 5$ . Соответственно, существует 5 классов кинематических пар, и **класс кинематической пары определяется числом наложенных связей, то есть ограничений движению**, например, пара 4-го класса накладывает 4 связи, оставляя возможными только два независимых движения из шести (см. рис.1.2 - *в*, *г*); пара 5-го класса накладывает 5 связей и из шести возможных движений остается только одно: вращательное или поступательное относительно какой-либо оси (см. рис.1.2 - *д*, *е*); и т. д. В винтовой пара (см. рис.1.2 - *ж*) имеется два движения – вращательное и поступательное, но они являются взаимозависимыми, поэтому винтовая пара – это тоже пара 5-го класса (из 6-ти возможных движений связаны 5; независимым можно принять только одно движение: либо вращательное, либо поступательное).

В таблице 1 приведены условные обозначения кинематических пар, названия их и соответствующая классификация в зависимости от числа наложенных связей.

Таблица 1. Классификация кинематических пар.

Класс пары	Название пары	Рисунок	Обозначение
1	Шар на плоскости		
2	Цилиндр на плоскости		
3	Сферическая пара		
3	Плоскостная пара		
4	Сферическая с пальцем		
4	Цилиндрическая пара		

Класс пары	Название пары	Рисунок	Обозначение
5	Вращательная пара		
5	Поступательная пара		

Кроме классификации по числу наложенных связей кинематические пары делят *на высшие и низшие, в зависимости от элементов соприкосновения звеньев*: если контакт между звеньями осуществляется по точкам или по линиям, то кинематические пары относятся к *высшим*; если звенья кинематической пары контактируют по поверхности, то такие пары относятся к *низшим*.

### 1.3. Кинематическая цепь. Структурная формула кинематической цепи.

Структура механизма определяется его кинематической цепью. Кинематическая цепь — это система звеньев, образующих между собой кинематические пары. Кинематические цепи различают по следующим признакам (рис. 1.3):

- а) замкнутые и незамкнутые;
- б) простые и сложные;
- в) плоские и пространственные.

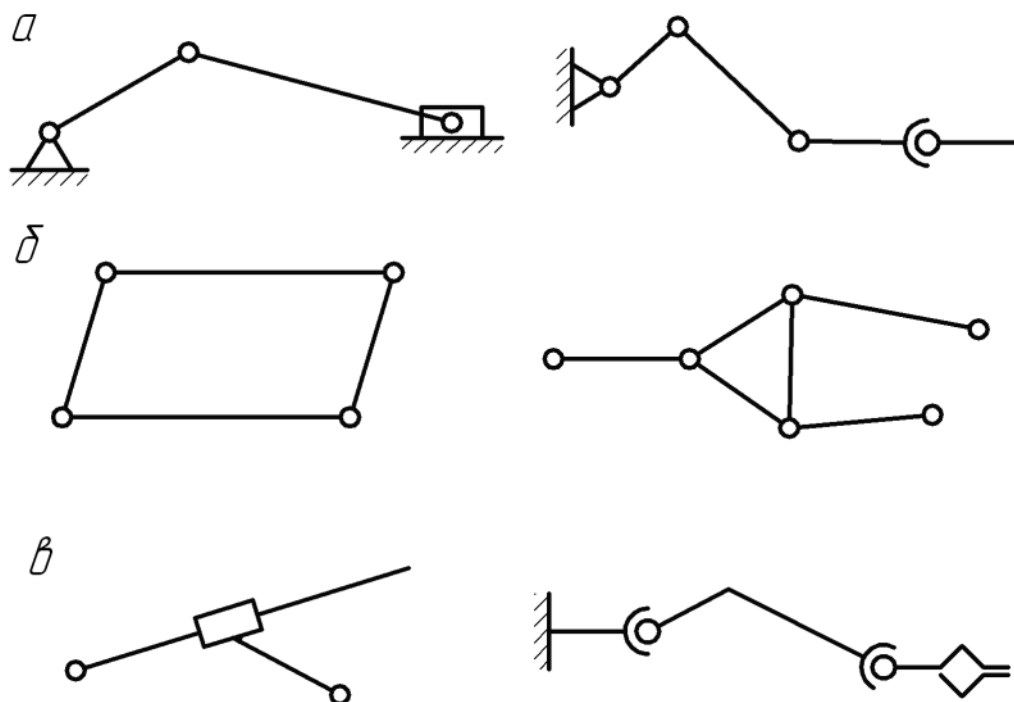


Рис. 1.3. Классификация кинематических цепей

*а).* В замкнутой цепи каждое звено входит не менее чем в две кинематические пары; в незамкнутой цепи есть звенья, входящие только в одну кинематическую пару.

*б).* В простой цепи каждое звено входит не более чем в две кинематические пары; в сложной цепи есть звенья, входящие более чем в две кинематические пары.

*в).* В плоской цепи все звенья перемещаются в одной, плоскости, либо в параллельных плоскостях; в пространственной - звенья движутся в разных, непараллельных плоскостях.

Кинематическая цепь характеризуется числом степеней свободы, равным числу входных звеньев.

Пусть в механизме имеется  $n$  подвижных звеньев. Каждое звено до соединения его с другим звеном имеет в пространстве 6 степеней свободы. Тогда общее число степеней свободы кинематической цепи равно  $6n$ .

Соединение звеньев в кинематические пары накладывает определенное число связей, которые надо исключить из общего числа степеней свободы.

Учитывая, что каждая пара 5-го класса накладывает 5 связей, пара 4-го класса — 4 связи и т. д., число степеней свободы механизма относительно стойки (неподвижного звена) определится по формуле:

$$W = 6n - 5P_5 - 4P_4 - 3P_3 - 2P_2 - P_1 \quad (1.1)$$

$P_5, P_4, P_3, P_2, P_1$  — число кинематических пар 5-го, 4-го... 1-го класса.

Полученная формула называется структурной формулой кинематической цепи и носит имя А. П. Малышева.

Все механизмы классифицируются по семействам. Класс семейства определяется числом общих связей, наложенных на механизм. Если наложить на механизм одну общую связь, то получим механизм 1-го семейства, и формула (1.1) примет вид

$$W = 5n - 4P_5 - 3P_4 - 2P_3 - P_2 \quad (1.2)$$

Аналогично, если наложить 2 общие связи

$$W = 4n - 3P_5 - 2P_4 - P_3 \quad (1.3)$$

Если наложить 3 общие связи, получим механизм 3-го семейства - плоский механизм. Из определения плоских механизмов следует, что у них из шести независимых движений (см. рис. 1.1) возможны только три: поступательное вдоль осей  $x$  и  $y$ , а также вращение относительно оси  $Z$ . При этом звенья будут двигаться в плоскости  $xOy$ .

Структурная формула кинематической цепи в этом случае принимает вид

$$W = 3n - 2P_5 - P_4 \quad (1.4)$$

и называется формулой П.Л.Чебышева для плоских механизмов.

#### 1.4. Замена высших кинематических пар низшими

В плоских механизмах все пары 4-го класса являются высшими, а пары 5-го класса - низшими. Поэтому формулу Чебышева можно представить в виде:

$$W = 3n - 2P_H - P_B \quad (1.5)$$

$n$  — число подвижных звеньев;

$p_H$  — число низших кинематических пар;

$p_B$  — число высших кинематических пар.

При структурном анализе плоских механизмов высшие пары можно заменить низшими. Рассматривать механизмы с низшими парами удобнее, т. к. для них решены все основные задачи анализа механизмов.

При замене высших пар на низшие должны выполняться следующие условия:

- 1) степень подвижности механизма должна оставаться неизменной;
- 2) относительное движение звеньев также должно сохраняться.

Пусть для кинематической цепи, содержащей высшие и низшие кинематические пары, степень подвижности равна  $W_0$ .

Если убрать из кинематической цепи пару 4-го класса, то число степеней свободы станет на единицу больше, т. к. пара 4-го класса в плоском механизме накладывает одну связь (три общих связи уже наложено).

Вместо отброшенной пары необходимо приложить кинематическую цепь, содержащую только низшие пары.

Тогда, чтобы выполнить 1-е условие, необходимо соблюсти равенство:

$$(W_0 + 1) + (3n - 2P_5) = W_0 \quad (1.6)$$

$W_0$  - степень подвижности исходной цепи;

$(W_0 + 1)$  - степень подвижности цепи с отброшенной высшей парой;  $(3n$

$- 2 p_5)$  - степень подвижности цепи замены (содержащей только

низшие пары).

Преобразуем равенство (1.6)

$$P_5 = \frac{3n + 1}{2} \quad (1.7)$$

Полученное выражение устанавливает соотношение между числом звеньев и числом кинематических пар 5-го класса в цепи замены. Учитывая, что  $p_5$  и  $n$  - целые числа, определяется минимальное число звеньев и кинематических пар в цепи замены:

$$n = 1; P_5 = \frac{3 \cdot 1 + 1}{2} = 2$$

**Вывод: высшую пару в кинематической цепи можно заменить дополнительным звеном и двумя низшими парами.**

*Пример.* Имеется механизм, состоящий из звеньев 1 и 2 (рис.1.4). Контакт между звеньями - в точке, которая представляет собой высшую пару;  $A$  и  $B$  - низшие пары (вращательные);  $O_1$  и  $O_2$  — центры кривизны звеньев.

Для замены высшей кинематической пары (рис. 1.4, *a*) проводим нормаль в точке касания звеньев до центров кривизны  $O_1$  и  $O_2$  (пунктирная линия). Соединяя точки  $O_1$  и  $O_2$  с точками  $A$  и  $B$ , получим шарнирный четырехзвенник, у которого все пары низшие.

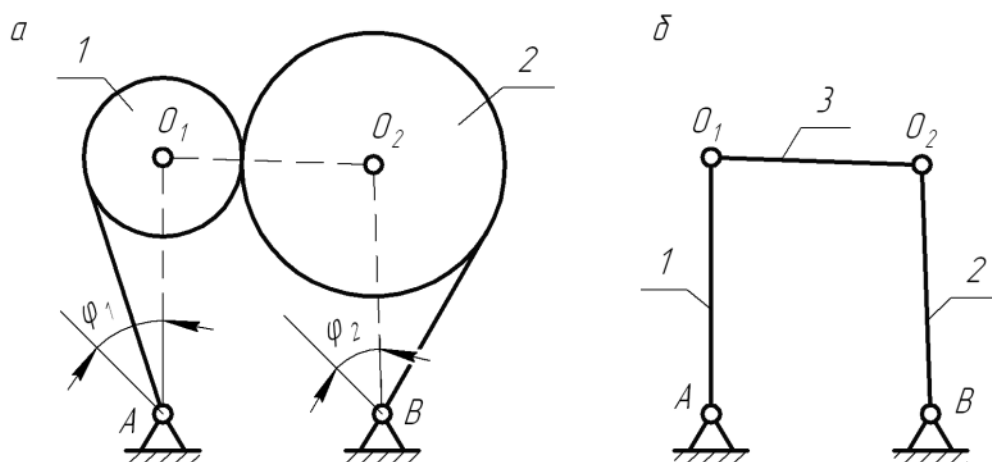


Рис 1.4. Замена высшей пары на низшие.

Таким образом, высшую пару (точку касания звеньев) заменили дополнительным звеном 3 и двумя низшими парами  $O_1$  и  $O_2$  (рис. 1.4, б).

Следует иметь в виду, что заменяющий механизм имеет такой вид только для данного положения. Для каждого нового положения длина звеньев и их взаимное расположение могут быть иными.

Определим степень подвижности исходного механизма

$$W = 3n - 2P_5 - P_4 = 3 \cdot 2 - 2 \cdot 2 - 1 = 1$$

Степень подвижности заменяющего механизма

$$W = 3 \cdot 3 - 2 \cdot 4 - 0 = 1$$

Сравнивая результаты, делаем вывод, что первое условие замены выполняется. Кроме того, если звено 1 повернуть на угол  $\varphi_1$ , то звено 2 повернется на соответствующий угол  $\varphi_2$ , т.е. второе условие также выполняется.

Сформулируем общие правила замены высших кинематических пар низшими:

1. Если высшие пары представляют собой соприкасающиеся окружности, то при замене низшие пары находятся в центре этих окружностей.

2. Если высшие пары представляют собой окружность или любую произвольную кривую, с одной стороны, и точечный контакт, с другой стороны, то кинематические пары замены находятся в точке контакта и в центре кривизны (рис. 1.5, а).

3. Если контакт в высшей паре происходит по линии, то замена осуществляется поступательной парой (рис. 1.5, б).



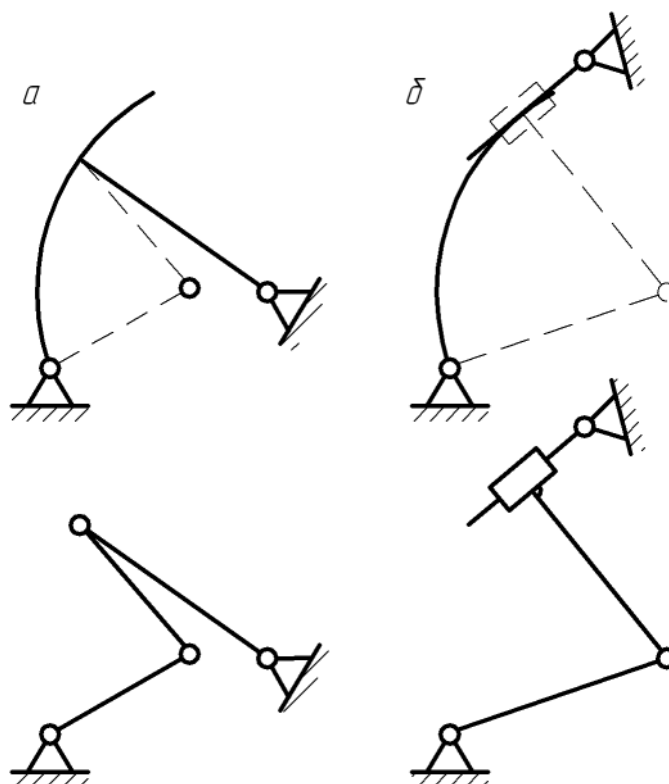


Рис. 1.5. Варианты замены высших кинематических пар низшими.

Последние два вывода представляют собой частные случаи:

- для точечного контакта радиус кривизны равен нулю (вращательная пара совпадает с точкой контакта);
- для прямой линии радиус кривизны равен бесконечности, т. е. в цепи замены движение должно осуществляться по прямой, а не по окружности (поступательная пара).

## 2. СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ПЛОСКИХ МЕХАНИЗМОВ

Цель выполнения структурного анализа: изучение строения механизма, его элементов и структурных составляющих, обеспечивающих его нормальное функционирование и дальнейший анализ.

### 2.1. Задачи структурного анализа. Принцип Ассура.

При структурном анализе необходимо решить следующие задачи:

- Определить степень подвижности механизма (число степеней свободы).

- Выделить структурные группы (группы Ассура).
- Выделить механизм I класса.

Число степеней свободы равно числу обобщенных координат, характеризующих положение кинематической цепи относительно стойки. Таково же, как правило, и число входных звеньев.

Входное звено, соединенное в кинематическую пару со стойкой, называется механизмом I класса (рис. 2.1). Механизм I класса имеет одну степень свободы ( $W=1$ ).

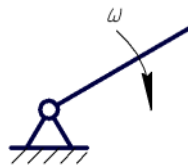


Рис 2.1. Механизм I класса.

Если присоединить к входному звену кинематическую цепь, то получится структурная схема механизма. При этом степень подвижности не должна измениться.

Принцип образования механизмов, впервые сформулированный Л.В.Ассуром, заключается в следующем: *схема любого механизма может быть составлена последовательным присоединением к начальному звену групп звеньев с нулевой степенью подвижности.*

Для плоского механизма, состоящего только из кинематических пар 5-го класса (пары 4-го класса можно заменить низшими), степень подвижности присоединенных групп определяется по формуле Чебышева:

$$W = 3n - 2P_5 = 0 \quad (2.1)$$

Таким образом, сколько бы групп ни присоединяли к механизму I класса, степень подвижности остается равной 1.

## 2.2. Группы Ассура, их классификация

Группой Ассура называется незамкнутая кинематическая цепь с нулевой степенью подвижности.

Поскольку  $n$  и  $P_5$  могут быть только целыми числами, из равенства (2.1) получаются следующие сочетания:

а)  $n = 2, P_5 = 3$ ;

б)  $n = 4, P_5 = 6$ ;

в)  $n = 6, P_5 = 9$  и т. д.

Практически в механизмах, используемых в машиностроении, встречаются первые два сочетания (рис. 2.2).

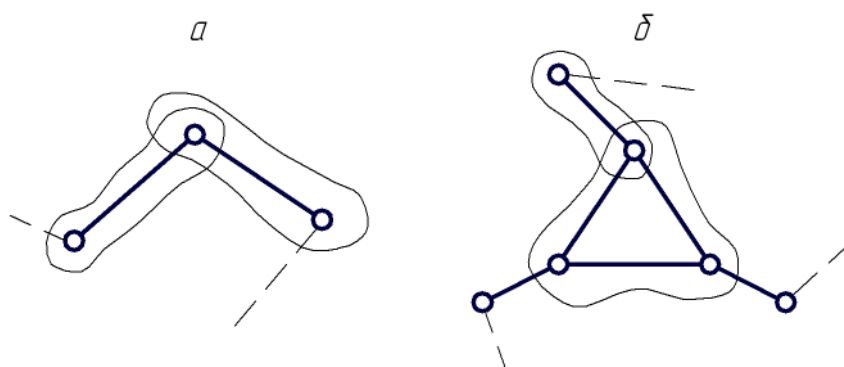


Рис. 2.2. Примеры структурных групп:  $a$  - II класса;  $b$  - III класса.

Класс группы Ассура определяется наивысшим числом кинематических пар, входящих в замкнутый контур. Порядок структурной группы определяется числом элементов звеньев, которыми она присоединяется к механизму; при этом нельзя присоединять группу к одному звену. Пунктирной линией показаны звенья, к которым группа присоединяется. Этими звеньями являются начальное звено, или звенья других групп, или стойка.

Группа, имеющая два звена и три кинематические пары 5-го класса, называется группой II класса (см.рис.2.2,  $a$ ). Второе возможное сочетание числа подвижных звеньев и кинематических пар образует группу III класса (см. рис. 2.2,  $b$ ).

Класс механизма определяется наивысшим классом структурной группы, входящей в состав данного механизма.

Если в состав механизма входят также и высшие пары, то их необходимо заменить на низшие, после чего определить класс и порядок структурных групп.

Самая простая структурная группа ( $n=2; P_5=3$ ), состоящая из двух звеньев и трех кинематических пар, имеет 5 видов в зависимости от сочетания вращательных и поступательных пар (рис. 2.3):

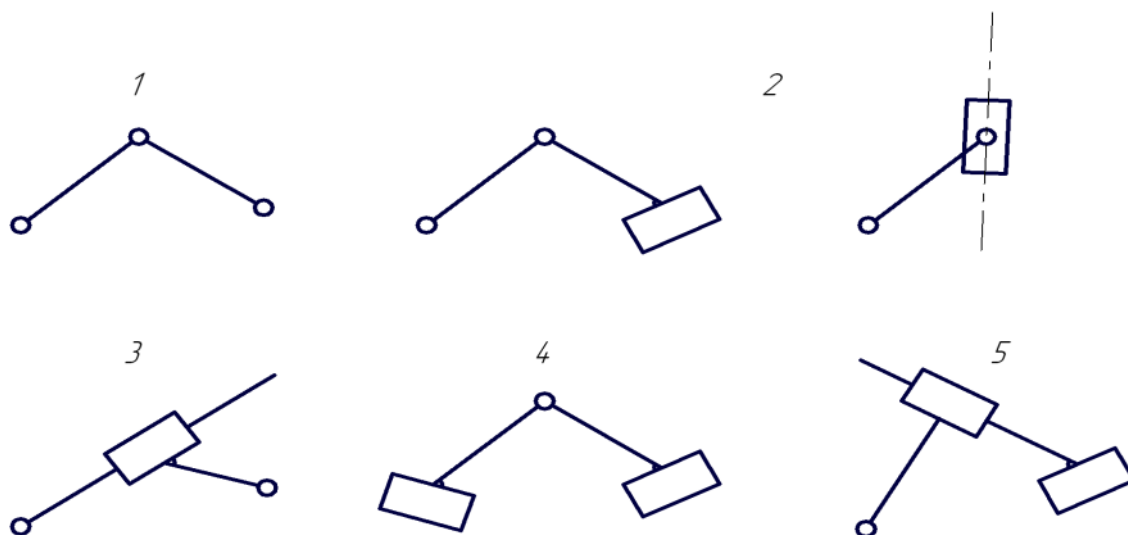


Рис. 2.3. Виды структурных групп II класса:

группа 1-го вида - все пары вращательные; группа 2-го вида - на конце одного из звеньев поступательная пара; группа 3-го вида - в середине поступательная пара; группа 4-го вида — на конце обоих звеньев поступательные пары; группа 5-го вида — в середине и на конце одного из звеньев поступательная пара.

Структурный анализ механизма следует проводить путем расчленения его на структурные группы в порядке, обратном образованию механизма, т. е. выделять группы начинают с наиболее удаленной (последней в порядке присоединения их к механизму I класса). В результате отсоединения структурных групп остается механизм I класса.

Разложение механизма на структурные группы необходимо для решения задач кинематического и силового анализа, т. к. в соответствии с принципом Ассур данный метод обеспечивает статическую определенность схем плоских механизмов [2, с. 36 — 38].

Пример. Выполнить структурный анализ механизма шарнирного четырехзвенника (рис. 2.4).

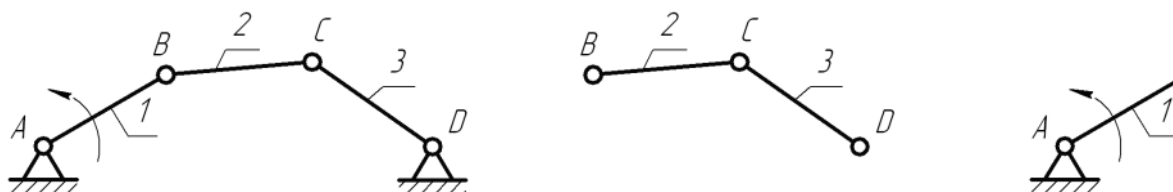


Рис. 2.4. Шарнирный четырехзвенник

1. Определим степень подвижности механизма

$$W = 3n - 2P_5 - P_4 = 3 \cdot 3 - 2 \cdot 4 - 0 = 1$$

2. Выделим группы Ассура (последние два звена и три кинематические пары) - группа II класса 1-го вида ( $\Pi_1$ )

$$W = 3 \cdot 2 - 2 \cdot 3 = 0$$

3. Остается механизм I класса

$$W = 3 \cdot 1 - 2 \cdot 1 = 1$$

*Степень подвижности механизма равна единице, а это значит, что в данном механизме имеется только одно ведущее (начальное) звено. От его положения однозначно зависит положение всех остальных звеньев механизма.*

### 2.3. Основные виды плоских рычажных механизмов

Простейшие четырехзвенные плоские механизмы состоят из одного неподвижного звена (стойки) и трех подвижных звеньев (рис. 2.5).

Если все пары вращательные, то механизм называется шарнирным четырехзвенником. Звено, которое совершает полный оборот вокруг оси вращения, называется кривошипом.

Звено, которое совершает вращательное движение на неполный оборот, называют коромыслом.

Звено, совершающее плоскопараллельное движение, называется **шатун**ом (рис. 2.5, *a*).

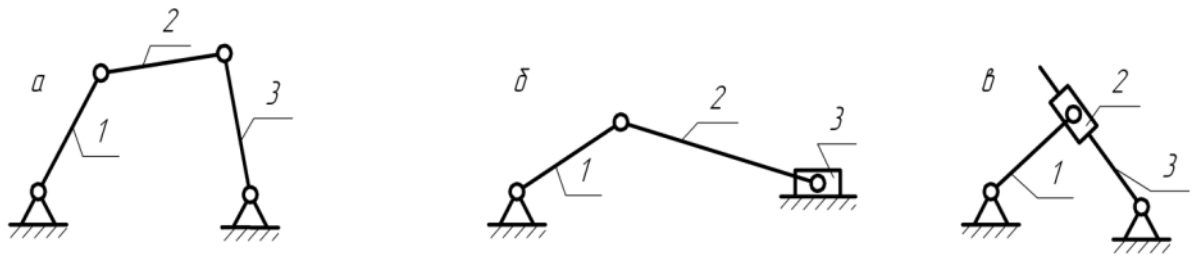


Рис. 2.5. Простейшие плоские механизмы: *a* — шарнирный четырехзвенник; *б* — кривошипно-ползунный механизм; *в* — кулисный механизм.

Если звено 3 соединить со стойкой поступательной парой, то оно будет называться **ползуном**, а весь механизм кривошипно-ползунным (рис. 2.5, *б*). В том случае, если поступательная пара находится между звеньями 2 и 3, т. е. звено 2 перемещается по подвижной направляющей, механизм называется кулисным (рис. 2.6, *в*).

Если коромысло служит подвижной направляющей для ползуна, то его называют **кулисой**, а ползун - **кулисным камнем**.

Более сложные плоские рычажные механизмы образуются присоединением структурных групп различных видов, которые были рассмотрены выше.

### *Вопросы для самоконтроля:*

1. Назовите задачи структурного анализа
2. Что называется группой Ассура?
3. Что такое механизм I-го класса?
4. Сформулируйте принцип образования плоских рычажных механизмов.
5. Сколько разновидностей структурных групп Вы знаете? Изобразите их.
6. Как определяется класс группы Ассура?
7. Как определяется класс механизма?

8. Назовите основные виды плоских рычажных механизмов.
9. Какое звено называют кривошипом? Коромыслом?
10. Какое движение совершает ползун? Шатун?
11. В какой последовательности механизм разделяют на структурные составляющие?
12. Как выделить структурные группы, если в механизме присутствуют высшие кинематические пары?

#### 2.4. Теорема Грасгофа

Выходные звенья механизмов должны иметь определенные траектории движения, скорости и ускорения. Все эти параметры определяются размерами звеньев, их взаимным расположением и законом движения начального звена.

При проектировании кинематических схем рычажных механизмов выделяют две основные задачи:

1. Воспроизведение заданного закона движения.
2. Воспроизведение заданной траектории выходного звена.

При синтезе четырехзвенных механизмов ведущее звено является кривошипом т. е. совершает вращение на полный оборот.

Рассмотрим шарнирный четырехзвенник в крайних положениях (рис. 2.6).

Примем следующее соотношение длин звеньев

$$a < b < c < d$$

Если механизм может занимать крайние положения  $A_1$  и  $A_2$ , то кривошип делает полный оборот.

$$\text{Из } \Delta OB_1C: \quad a + c < b + d \quad (2.2)$$

$$\text{Из } \Delta OB_2C: \quad OC < OB_2 + B_2C \quad \text{или} \quad OB_1 > OC - B_2C,$$

Последнее неравенство можно записать с учетом размеров (см. рис. 2.6):

$$c - a > d - b \quad (2.3)$$

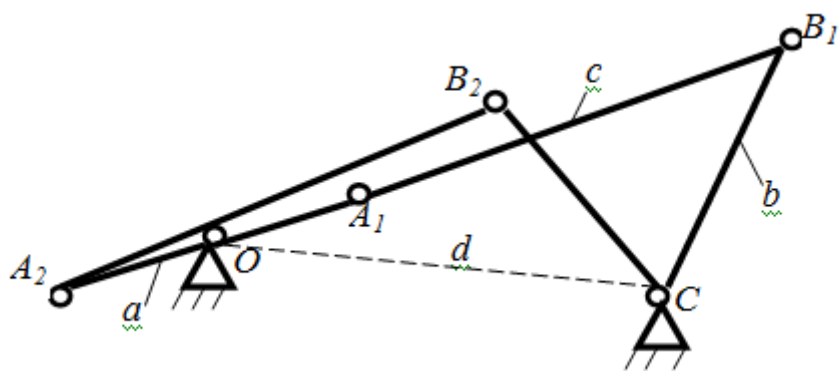


Рис. 2.6. Схема к определению условия существования кривошипа в четырехзвенных механизмах

Первое неравенство всегда удовлетворяется, поскольку  $a < b$  и  $c < d$ .

Следовательно, условие существования кривошипа определяется вторым неравенством. Преобразуем его и получим

$$a + d < b + c.$$

Это условие называют также теоремой Грасгофа, которая формулируется следующим образом. ***В четырехзвенном механизме имеется кривошип, если сумма длин наименьшего и наибольшего звеньев меньше суммы длин двух других звеньев.***

Теорему Грасгофа еще называют условием проворачиваемости кривошипа, то есть начальное звено может совершать вращение на полный оборот.

## 2.5. Структурный анализ пространственных рычажных механизмов

Пространственные рычажные механизмы с незамкнутой кинематической цепью и несколькими степенями свободы используются при проектировании кинематических схем манипуляторов промышленных роботов.

Основная задача структурного анализа таких механизмов заключается в определении степени их подвижности, что позволяет определить



качественную характеристику манипулятора. Решение этой задачи производится при помощи рассмотренной ранее формулы А.П.Малышева (см. раздел 1.3).

$$W = 6n - 5P_5 - 4P_4 - 3P_3 - 2P_2 - P_1$$

$P_5, P_4, P_3, P_2, P_1$  — число кинематических пар 5-го, 4-го... 1-го класса.

При этом необходимо помнить условные обозначения кинематических пар на схемах и их классификацию (см. раздел 1.2, табл.1).

Механизмы с высшими парами (зубчатые, кулачковые, волновые) являются практически более универсальными, т. к. с их помощью можно воспроизвести множество разнообразных законов движения.

В то же время механизмы с низшими парами обладают своими достоинствами: поскольку элементами соприкосновения звеньев у низших пар являются поверхности (сфера, цилиндр), то в них возникают меньшие удельные давления, меньший износ. Кроме того, значительно проще их изготовление. Поэтому в механизмах манипуляторов промышленных роботов (и не только в них) звенья соединяют, как правило, посредством низших кинематических пар. В пространственных схемах могут присутствовать сферические шарниры (пара 3-го класса - три вращательных движения); сферические шарниры с пальцем (пара 4-го класса – два вращательных движения); цилиндрические кинематические пары (пара 4-го класса – осуществляет перемещение вдоль одной оси и поворот относительно этой же оси).

Зачастую в механизмах промышленных роботов звенья соединяют простейшими вращательными и поступательными кинематическими парами. Поступательные пары реализуют операции перемещения звеньев, а вращательные – операции ориентирования.

### **3. МЕХАНИЗМЫ МАНИПУЛЯТОРОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ**

#### **3.1. Общее устройство и составные части промышленных роботов**

Промышленный робот (ПР) в целом состоит из исполнительного устройства, т.е. манипулятора, устройства программного управления и опорных конструкций [1].

Манипулятор состоит, в свою очередь, из системы подвижных звеньев, рабочего органа для непосредственного воздействия на объект манипулирования, привода и механизма передвижения.

Устройство программного управления обеспечивает формирование управляющих сигналов, служит для обработки информации, обратной связи и формулировки заданий; для контроля за функционированием систем и т.п.

Опорные конструкции служат для размещения всех устройств и для обеспечения прочности и жесткости агрегата. Могут выполняться в виде металлоконструкций, мостов, колонн, рам тележек, порталов и т.д.

Из всего многообразия промышленных роботов можно выделить специальные краны-роботы, которые во многом имеют сходство с грузоподъемными машинами. Например, краны-штабелеры, которые используют на крупных складах с высокими и протяженными стеллажами; мультдозавалочный кран используемый для подачи шихты в мартеновскую печь. Также, как и у кранов, у манипуляторов ПР имеется тележка, грузозахватное устройство; для них характерно определенное однообразие операций [1].

Основное отличие манипуляторов ПР от других механизмов состоит в том, что их механизмы представляют собой незамкнутые кинематические цепи, которые имеют широкий диапазон пространственных движений рабочих органов. Первые конструкции манипуляторов даже по внешнему виду напоминали руку человека (рис.3.1) и предназначались для работы с радиоактивными, химически вредными веществами, для работы в вакууме и прочих опасных или недоступных для человека средах.

Между управляющим и исполнительным механизмом имелась механическая, электрическая или другая связь [3, с.549]. Исполнительный механизм копирует движения, задаваемые оператором управляющему механизму.

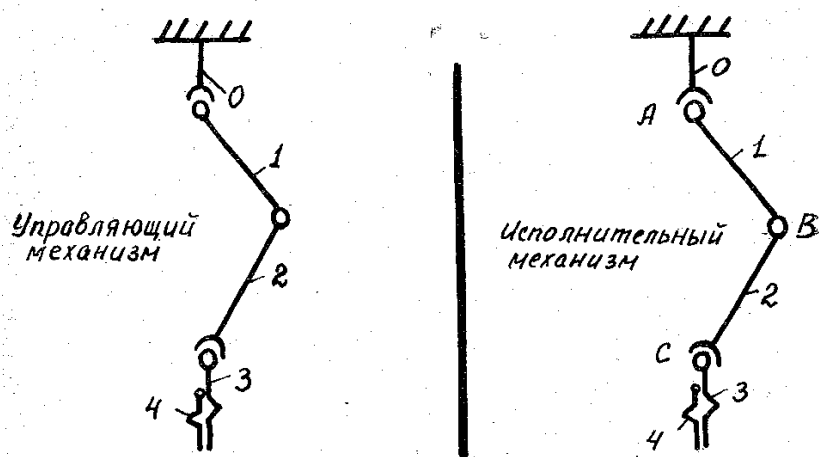


Рис.3.1. Структурная схема простейшего копирующего манипулятора.  
1-плечо, 2- предплечье, 3- кисть, 4 – захват (палец).

Определим степень подвижности манипулятора. Звено 4 (захватное устройство – его называют «захват» или «схват») при этом не учитывается, так как при воздействии на объект манипулирования оно объединяется со звеном 3.

$$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1$$

Структурная схема манипулятора, изображенного на рис. 2.7, имеет три подвижных звена, два сферических шарнира А и С (пары 3-го класса) и одна вращательная кинематическая пара В (5-го класса). Подставив в формулу Малышева соответствующие значения, получим

$$W = 6 \cdot 3 - 5 \cdot 1 - 3 \cdot 2 = 7.$$

Данный манипулятор имеет семь степеней свободы, то есть семь независимых движений.

### 3.2. Структура кинематических цепей манипуляторов

Если требуется обслужить большой объем, то применяют манипуляторы с поступательной парой (рис. 3.2, а). Степень подвижности такого манипулятора

$$W = 6 \cdot 4 - 5 \cdot 3 - 3 \cdot 1 = 6.$$

Для упрощения конструкций привода и изготовления одну сферическую пару можно заменить тремя вращательными, оси которых пересекаются (рис. 3.2, б).

Степень подвижности данного манипулятора

$$W = 6 \cdot 6 - 5 \cdot 6 = 6.$$

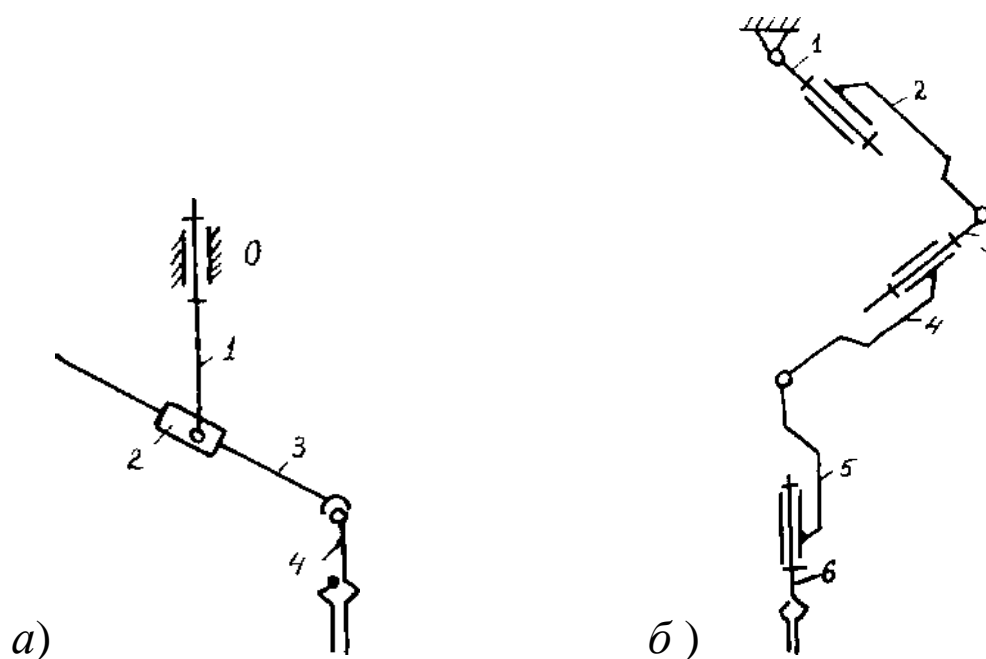


Рис. 3.2. Схема манипулятора: а) — с поступательной парой,  
б) — с вращательными парами.

Принцип образования структурных схем манипуляторов отличается от принципа Ассур для замкнутых кинематических цепей [5, с. 32], который предполагает образование механизмов путем присоединения статически

определимых структурных групп. Степень подвижности при этом не меняется.

Механизмы манипуляторов образуются путем последовательного наложения механизмов с одной степенью свободы, т. е. построение на одном из подвижных звеньев нового механизма.

Например, на рис. 3.3, а звенья манипулятора 1, 2, 3, 4 образуют основную кинематическую цепь, а звенья 1,2,1',2' образуют механизм с одной степенью свободы, построенный на подвижном звене 1. Таким образом, число степеней свободы для звеньев 1,2,1',2' равно двум.

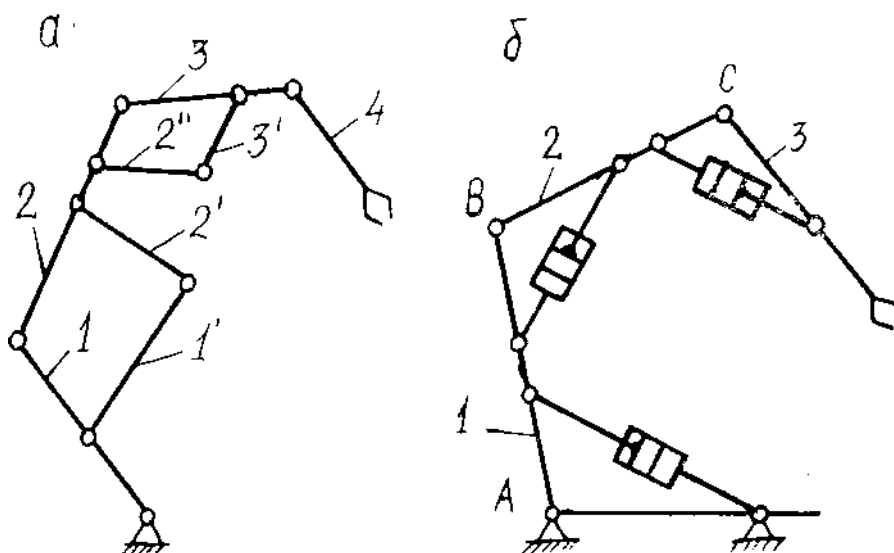


Рис. 3.3. Примеры образования структурных схем манипуляторов

На подвижном звене 2 построен еще один механизм с одной степенью свободы, состоящий из звеньев 2, 3, 2'' 3'. Система звеньев 1, 2, 3, 1', 2' 2'', 3' будет обладать уже тремя степенями свободы.

При построении структуры цепи манипулятора следует иметь в виду следующее: перемещение объекта из одного положения в другое целесообразно разделить на операцию переноса и операцию ориентирования захвата. Кинематическая цепь переносных движений может содержать как вращательные, так и поступательные пары, механизм ориентирующих движений - только вращательные пары.

Вопрос о выборе структуры кинематической цепи переносных движений для конкретного робота является сложным и определяется требованиями технологического процесса, для которого предназначен данный механизм.

Так, при выборе схемы следует иметь в виду, что кинематические цепи, содержащие только поступательные пары, обеспечивают независимость кинематических ошибок от положения объекта в рабочем пространстве. Манипуляторы, кинематическая цепь которых содержит одну вращательную и две поступательные пары типа  $V \perp P \perp P$  (оси кинематических пар расположены перпендикулярно) целесообразно использовать с применением пневмопривода или гидропривода, но они обладают малой жесткостью в вертикальном направлении (см. рис. 3.3, б).

Роботы, построенные по структурной схеме, содержащей только вращательные пары типа  $V \perp V \parallel V$  (перпендикулярное и параллельное расположение осей вращения), обладают большей компактностью и имеют меньшую зависимость кинематической ошибки от положения звеньев манипулятора.

В производственных условиях движения роботов весьма многообразны, поэтому их разделяют на три вида: глобальные, региональные и локальные.

Глобальные - это движения робота на расстояния, превышающие размеры самого робота, например, при движении транспортного робота вдоль цеха при обслуживании нескольких станков.

Региональные - это движения в пределах рабочего пространства, они определяются размерами руки манипулятора.

Локальные - это движения в отдельных зонах рабочего пространства, соизмеримые с размерами захвата, т. е. движения, связанные непосредственно с выполнением операции в данной точке рабочего пространства.

Размеры звеньев, виды кинематических пар и их взаимное расположение определяют важнейшие технические параметры манипуляторов:

- рабочий объем,
- маневренность,
- зону обслуживания,
- коэффициент сервиса.

### 3.3. Рабочий объем, зона обслуживания и маневренность манипуляторов

**Рабочим объемом** называют объем, ограниченный поверхностью, огибающей все возможные положения захвата. Например, для механизма, изображенного на рис. 3.4, это сфера радиуса  $R$ .

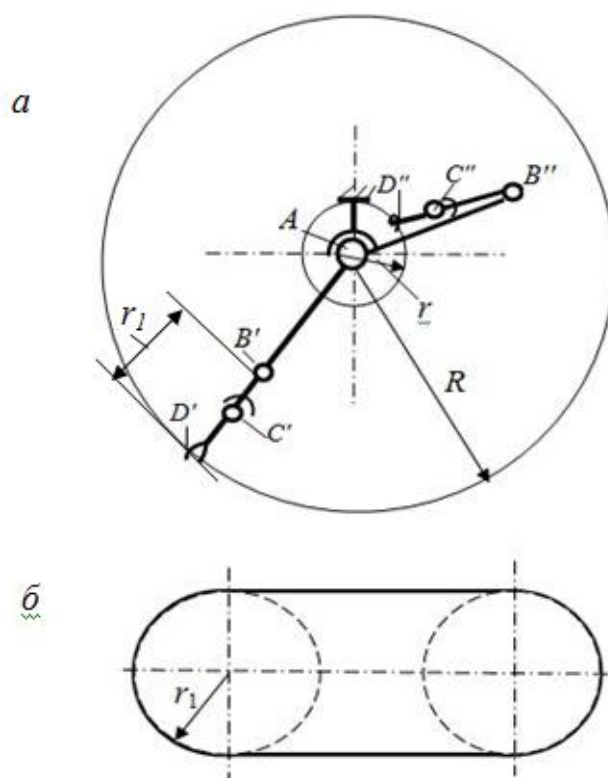


Рис.3.4. Рабочий объем и зона обслуживания манипуляторов: а) – с центральной сферической парой; б) – с центральной вращательной парой.

**Зона обслуживания** - это часть рабочего объема, в которой можно выполнить операции с объектом манипулирования. Для манипулятора,

изображенного на рисунке 3.4.  $a$ , - это часть пространства между сферами радиуса  $R$  и  $r$ .

Если центральную сферическую пару заменить вращательной, то зоной обслуживания будет тор (рис.3.4,  $b$ ) с радиусом  $r_1$ .

Внутри рабочего объема не все части одинаково удобны для выполнения заданных движений. Поэтому движения захвата подразделяют на 4 класса, которые изображены на рис.3.5.

- $a$ ) движение в свободном рабочем объеме;
- $b$ ) движение в несвободном объеме, часть которого занята каким –то твердым телом;
- $b$ ) движение, при котором захват перемещается по плоской или пространственной кривой, т. е. несвободное манипулирование;
- $z$ ) движение в несвободном пространстве, при несвободном объекте манипулирования.

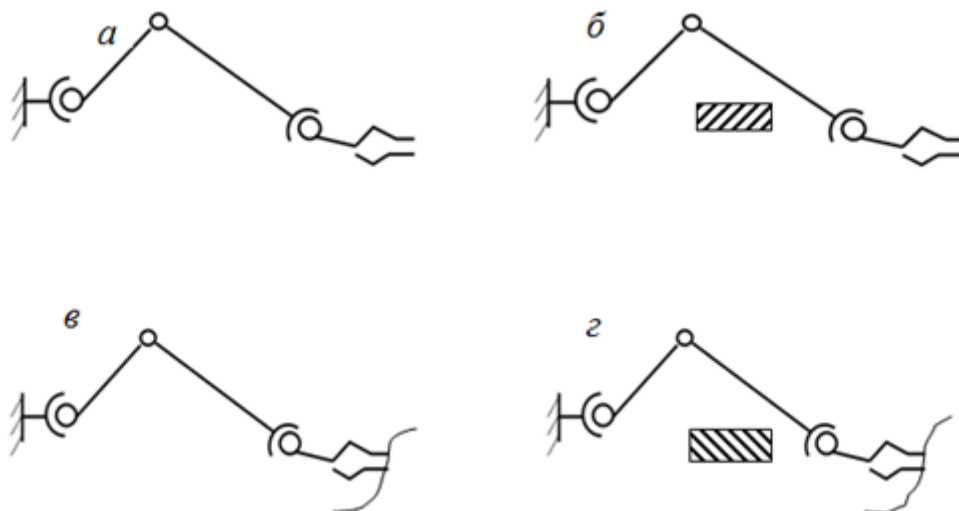


Рис.3.5. Классификация движений захвата в рабочем объеме манипулятора

Для обхода препятствий и выполнения сложных операций с объектом манипулирования механизм должен обладать достаточной маневренностью.

**Маневренность** - это число степеней свободы манипулятора при неподвижном захвате.



Для определения маневренности используется известная формула А.П. Малышева для пространственных механизмов.

При соединении захвата с объектом манипулирования кинематическая цепь превращается в замкнутую, и число подвижных звеньев становится на единицу меньше

$$W = 6n - 5P_5 - 4P_4 - 3P_3 - 2P_2 - P_1$$

Примеры, изображенные на рис. 3.6, показывают, что маневренность может быть равна единице (рис. 3.6, а)

$$W = 6 \cdot 2 - 5 \cdot 1 - 2 \cdot 3 = 1$$

Это значит, что механизм может вращаться, не изменяя относительного движения между отдельными звеньями, то есть групповая подвижность равна единице.

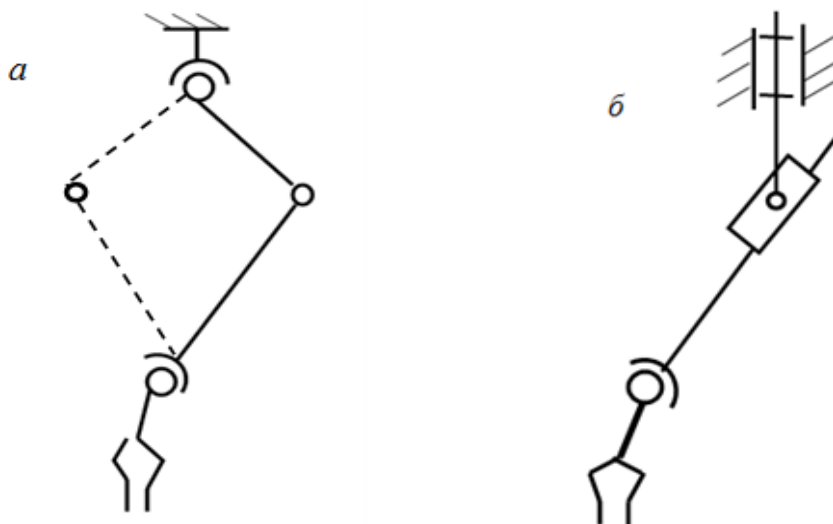


Рис. 3.6. Схемы манипуляторов: а) с маневренностью, равной единице; б) с маневренностью, равной нулю.

Маневренность манипулятора, изображенного на рис. 3.6 б, равна нулю.

$$W = 6 \cdot 3 - 5 \cdot 3 - 3 \cdot 1 = 0$$

Это значит, что при соединении захвата с объектом манипулирования никакое движение невозможно, то есть каждому положению захвата соответствует единственное расположение звеньев.

### 3.4. Угол сервиса и коэффициент сервиса

Для каждой точки рабочей зоны можно определить некоторый телесный угол, внутри которого захват может подойти к данной точке. Этот угол называется углом сервиса и обозначается  $\psi$ .

Как известно из геометрии, величина телесного угла определяется отношением площади сферы, вырезанной этим углом, к квадрату радиуса сферы. Поэтому максимальное значение угла сервиса

$$\psi_{\max} = 4\pi R^2 / R^2 = 4\pi \quad (\text{стерадиан}).$$

Отношение угла сервиса ( $\psi$ ) к его максимальному значению ( $4\pi$ ) называют коэффициентом сервиса в данной точке ( $\theta$ )

$$\theta = \frac{\psi}{4\pi} \quad (3.1)$$

Значение  $\theta$  может изменяться от нуля для точек на границе рабочего объема, где захват может быть подведен к объекту в одном-единственном направлении, до единицы в точках полного сервиса, где захват можно подвести с любого направления

$$0 \leq \theta \leq 1$$

Значения, близкие к единице возможны для точек, близких к центральной части рабочего объема.

Среднее значение коэффициента сервиса в рабочем объеме оценивают интегральным показателем

$$\theta_{cp} = \frac{1}{V} \int_V \theta dV \quad (3.2)$$

где  $V$  - рабочий объем манипулятора.

Коэффициент сервиса оценивает геометрическое качество манипулятора, его возможности выполнения различных операций.

### 3.5. Определение коэффициента сервиса методом объемов

Рассмотрим данный метод на примере манипулятора с двумя сферическими и одной вращательной парами (рис. 3.7, а).

Пусть заданы длины звеньев  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$ ; требуется определить коэффициент сервиса для точки  $D$ .

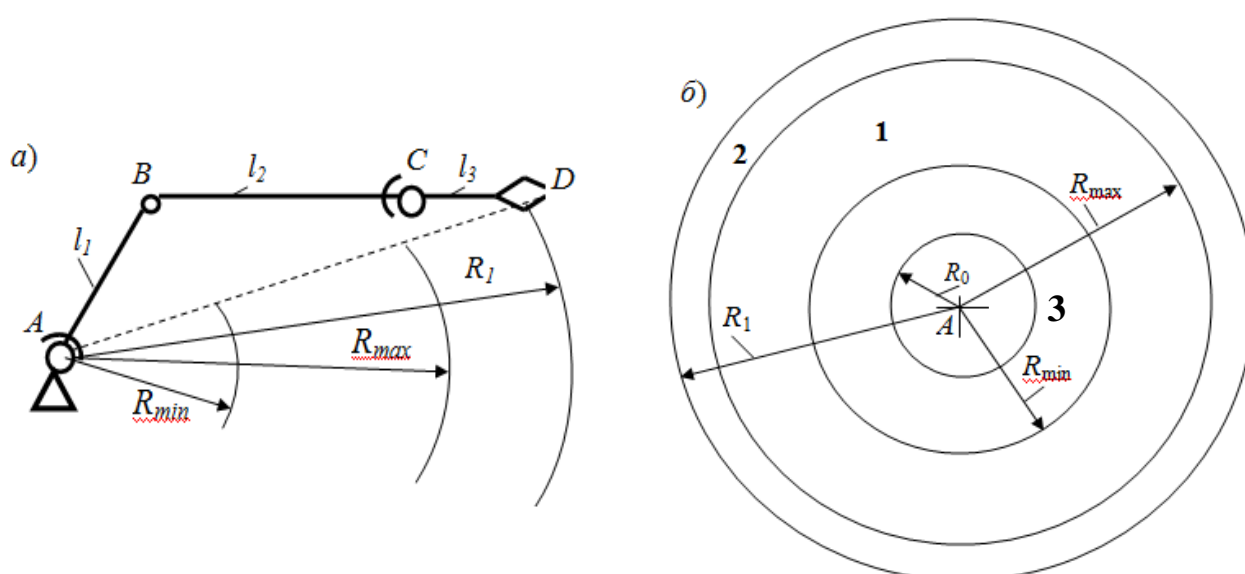


Рис. 3.7. Схема к определению коэффициента сервиса плоского манипулятора.

Захват может вращаться вокруг точки  $D$  (т. к. объект считаем пренебрежимо малым), в этом случае  $D$  - тоже сферическая пара. Тогда угол сервиса  $\theta$  в точке  $D$  определится как телесный угол, заключенный между всеми возможными положениями отрезка  $CD$  [2, с. 65-66].

Точки  $A$ ,  $B$  и  $C$  (шарнирного четырехзвенника) всегда лежат в одной плоскости, перпендикулярной оси вращательной пары  $B$ .

Этот четырехзвенник может вращаться относительно оси, проходящей через центры сферических пар  $A$  и  $D$ . Положение плоскости  $ABC$ , через которое проходит отрезок  $CD$ , называется базовой плоскостью.

В базовой плоскости четырехзвенник - плоская фигура, поэтому можно найти положения  $CD$  в данной плоскости, а затем вращать весь четырехзвенник относительно оси  $AD$ .

Коэффициент сервиса равен единице, если угол сервиса  $\psi = 4\pi$ , то есть точка  $C$  может занять любое положение на сфере с радиусом  $CD$ . Это возможно, когда звено  $CD$  является кривошипом.

На основании теоремы Грасгофа сумма длин наибольшего и наименьшего звеньев должна быть меньше суммы длин двух других звеньев. Для нашего примера имеется три возможных условия существования кривошипа:

$$1) l_3 + R \leq l_1 + l_2;$$

$$2) l_3 + l_1 \leq R + l_2;$$

$$3) l_3 + l_2 \leq R + l_1$$

Из 1-го условия определяем максимальную длину стойки

$$R_{\max} = l_1 + l_2 - l_3. \quad (3.3)$$

Из условий 2 и 3 определяем минимальную длину стойки

$$R_{\min} = |l_1 - l_2| + l_3 \quad (3.4)$$

Следовательно, область расположения точки  $D$  на базовой плоскости при  $\theta = 1$  находится между окружностями радиусов  $R_{\max}$  и  $R_{\min}$  с центром в точке  $A$  (рис. 3.7, б).

Если увеличивать длину стойки сверх  $R_{\max}$ , то  $CD$  не совершает полного оборота (условие существования кривошипа не выполняется), и получим двухкоромысловый механизм. Таким образом точка  $C$  может

располагаться лишь на части сферы радиуса  $CD$  ( $\theta < 1$ ). Предельное значение, когда звенья вытягиваются в одну линию (зона 2, где  $\theta = 0$ ),

$$R_1 = l_1 + l_2 + l_3 \quad (3.5)$$

Уменьшать значение  $R$  можно до величины (зона 3)

$$R_0 = |l_1 - l_2| - l_3 \quad (3.6)$$

Эти зоны получены для плоского манипулятора.

Если вращать четырехзвенник вокруг оси  $AD$ , то для зоны 1 получим сферу, а для 2-й и 3-й зоны - шаровой сектор. Площадь поверхности шарового сектора ( $S$ ) радиусом  $R = l_3$  определяется по формуле [4, с. 331 ]

$$S = 2\pi l_3^2 (1 - \cos \varphi_{\max}) \quad (3.7)$$

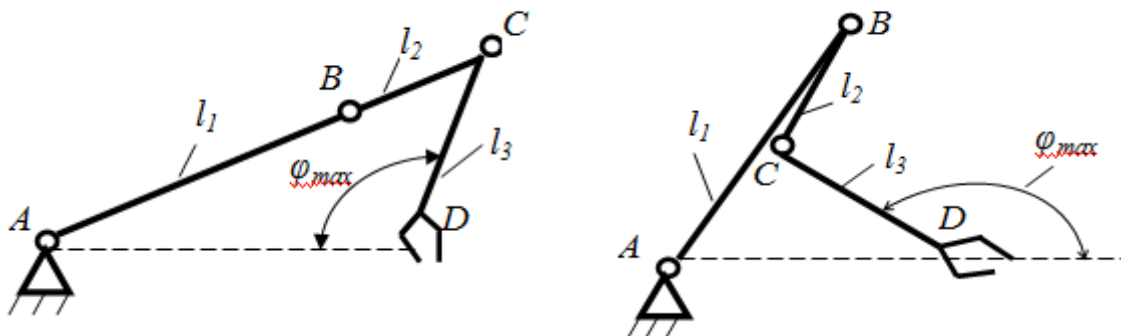


Рис. 3.8. Схема к определению коэффициента сервиса методом объемов

Максимальный угол, на который может повернуться  $CD$ , когда звенья  $AB$  и  $BC$  лежат на одной прямой (рис. 3.8), при данном значении длины стойки  $R$ , определяется по формуле

$$\cos \varphi_{\max} = \pm \frac{l_3^2 + R^2 - (l_1 \pm l_2)}{2Rl_3}. \quad (3.8)$$

Знак «плюс» - для зоны 2, «минус» - для зоны 3. Для зоны 1 угол  $\varphi_{\max} = \pi$ .

Из определения телесного угла следует, что угол сервиса  $\psi = S / l_3^2$ .  
Отсюда определяем коэффициент сервиса

$$\theta = \frac{\psi}{4\pi} = \frac{S}{l_3^2 4\pi} = \frac{2\pi l_3^2 (1 - \cos \varphi_{\max})}{l_3^2 4\pi} = \frac{1 - \cos \varphi_{\max}}{2} \quad (3.9)$$

или

$$\theta = \pm \frac{(l_1 \pm l_2)^2 - (R - l_3)^2}{4Rl_3} \quad (3.10)$$

### 3.6. Синтез кинематических цепей манипуляторов

#### 3.6.1. Постановка задачи

Одной из основных задач проектирования манипуляторов промышленных роботов является определение размеров звеньев по заданной зоне обслуживания. Для решения этой задачи необходимо исследовать функцию положения захвата в зависимости длин звеньев и от обобщенных координат, число которых соответствует числу степеней свободы манипулятора.

Прежде всего, по заданной структурной схеме механизма определяется число подвижных звеньев, а также класс и вид кинематических пар. Затем подсчитывается число степеней свободы по формуле Малышева для пространственных механизмов.

Относительное движение звеньев в каждой кинематической паре описывается в соответствующей системе координат, т.е. количество систем координат определяется числом звеньев в кинематической цепи. Задавая системы координат, целесообразно одну из координатных осей связывать с характерными признаками звена, например, с осевой линией; начало координат – с центром вращения и т.д. Неподвижная система координат связана со стойкой [3, с.85-87].

В зависимости от структуры манипулятора могут быть заданы некоторые постоянные параметры или ограничения, например, длины

звеньев, расположенных между вращательными парами, или величина хода в поступательной паре.

*Задача о положениях захвата в рабочей зоне сводится к определению аналитической зависимости радиус-вектора точки захвата в неподвижной системе координат от всех обобщенных координат механизма.*

### **3.6.2. Метод преобразования координат**

Для унификации методики решения задачи об определении размеров звеньев манипулятора по заданной рабочей зоне целесообразно использовать метод преобразования координат. При этом методе каждая кинематическая пара описывается соответствующей матрицей.

Матрицы составляются из параметров преобразования координат в виде таблицы из  $m$  строк и  $n$  столбцов. [4, с.128 -133].

Положение некоторой точки  $M$  в трехмерном пространстве определяется выражением

$$\bar{\rho}_{Mo} = T_{no} \cdot \bar{\rho}_{Mn} \quad (3.11)$$

где  $\bar{\rho}_{Mo}$  – радиус-вектор точки  $M$  относительно неподвижной системы координат

$$\bar{\rho}_{Mo} = \begin{vmatrix} x_{Mo} \\ y_{Mo} \\ z_{Mo} \end{vmatrix} \quad (3.12)$$

$\bar{\rho}_{Mn}$  – радиус-вектор точки  $M$  относительно  $n$  –ой системы координат

$$\bar{\rho}_{Mn} = \begin{vmatrix} x_{Mn} \\ y_{Mn} \\ z_{Mn} \end{vmatrix} \quad (3.13)$$

$T_{no}$  - матрица перехода от  $n$ -ой системы координат к неподвижной системе

$$T_{no} = \prod_{j=n}^1 T_{ji} \quad (3.14)$$

Выражение (4) – произведение матриц перехода от  $j$ -й системы к системе предполагает соотношение между индексами  $i = j - 1$ .

Например, для механизма, состоящего из 3-х подвижных звеньев и стойки (т.е. 3 подвижные системы и одна неподвижная) матрица перехода будет иметь вид

$$T_{40} = T_{32} \cdot T_{21} \cdot T_{10} \quad (3.15)$$

Матрицы перемножаются по известному правилу: строка на столбец. Чтобы матрицы были квадратными и их можно было перемножить, в столбцовых матрицах (см. формулы 3.12 и 3.13) добавляется единица, а в матрицах  $T_{ji}$  - четвертая строка.

В общем случае квадратная матрица преобразования координат выглядит следующим образом

$$T_{21} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & l_{21x} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & l_{21y} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & l_{21z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (3.16)$$

где элементы  $a_{11}$ ,  $a_{12}$ ,  $\dots$  – коэффициенты при координатах, или направляющие косинусы (учитывают поворот осей); первый индекс – это  $(i + 1)$ -я система координат; второй индекс –  $i$ -я система.

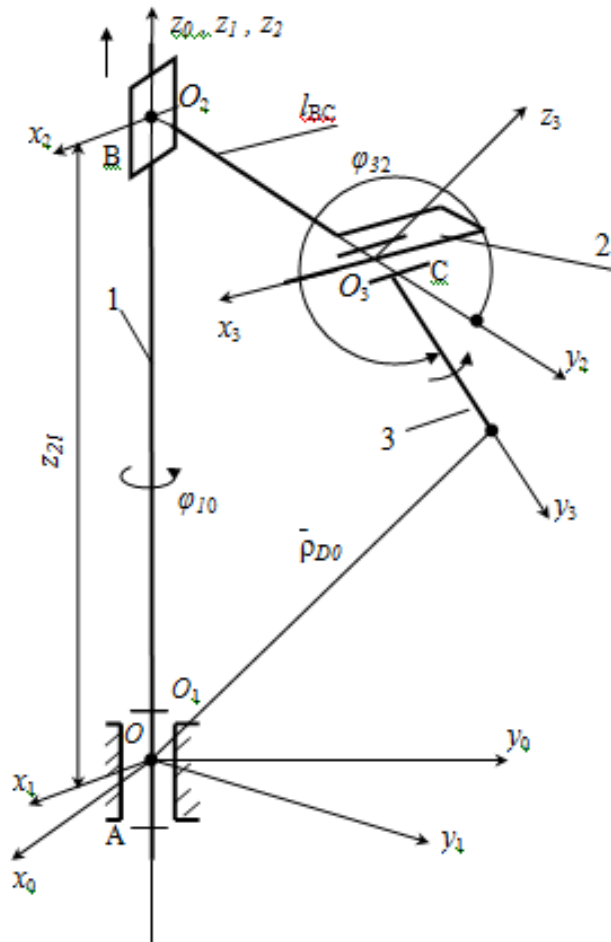
$l_{21x}$ ,  $l_{21y}$ ,  $l_{21z}$  - это координаты начала  $O_2$  системы  $x_2, y_2, z_2$  в системе  $x_1, y_1, z_1$ .

Развернутые формулы, определяющие положение захвата, весьма громоздкие, поэтому для конкретных задач используются стандартные подпрограммы для выполнения матричных операций.

**Пример:** Рассмотрим механизм трехзвенного манипулятора с двумя вращательными парами и одной поступательной (рис.3.10). Требуется



определить размеры звеньев манипулятора по заданной зоне обслуживания [4, с.328-329].



Свяжем с каждым звеном свою систему координат:

для звена 1 —  $O_1 x_1 y_1 z_1$ ,

для звена 2 —  $O_2 x_2 y_2 z_2$ ,

для звена 3 —  $O_3 x_3 y_3 z_3$ .

Все системы подвижны:

1-я вращается вокруг оси  $z_1$ ,

2-я движется прямолинейно относительно звена 1,

3-я вращается вокруг оси  $x_3$ .

Неподвижную систему, связанную со стойкой,

обозначим  $O x_0 y_0 z_0$ .

Рис. 3.10. Структурная схема трехзвенного манипулятора.

Степень подвижности манипулятора

$$W = 6 \cdot 3 - 5 \cdot 3 = 3.$$

Следовательно, должны быть заданы три обобщенные координаты.

$\varphi_{10}$  - угол поворота звена 1 относительно стойки;

$z_{21}$  — перемещение звена 2 относительно звена 1;

$\varphi_{32}$  - угол поворота звена 3 относительно звена 2;

Положение захвата в неподвижной системе координат определяется радиус-вектором  $\bar{\rho}_{D0}$ . В матричной форме радиус-вектор определяется как произведение переходных матриц

$$\bar{\rho}_{D0} = T_{10} \cdot T_{21} \cdot T_{32} \cdot \bar{\rho}_{D3}$$

где  $T_{10}$  – матрица перехода от подвижной системы координат 1 к неподвижной системе;  $T_{21}$  – матрица перехода от подвижной системы координат 2 к системе 1;  $T_{32}$  – матрица перехода от подвижной системы координат 3 к системе 2;  $\bar{\rho}_{D3}$  – радиус-вектор точки  $D$  относительно подвижной системы координат 3, связанной со звеном  $CD$ ,

$$\bar{\rho}_{D0} = \begin{vmatrix} x_{D0} \\ y_{D0} \\ z_{D0} \\ 1 \end{vmatrix} \quad T_{10} = \begin{vmatrix} \cos \varphi_{10} & -\sin \varphi_{10} & 0 & 0 \\ \sin \varphi_{10} & \cos \varphi_{10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$T_{21} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & Z_{21} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad T_{32} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_{32} & -\sin \varphi_{32} & l_{BC} \\ 0 & \sin \varphi_{32} & \cos \varphi_{32} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\bar{\rho}_{D3} = \begin{vmatrix} 0 \\ l_{CD} \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}$$

Каждая кинематическая пара накладывает определенное число связей на относительное перемещение или поворот звеньев, поэтому некоторые члены матриц становятся постоянными либо превращаются в ноль. Радиус-вектор

$\bar{\rho}_{D3}$  определяется столбцовой матрицей.

Четвертая строка 0001 и единица в столбцовых матрицах добавляется для того, чтобы матрицы сделать квадратными и перемножить их.

Последовательное умножение приводит к равенству

$$\begin{pmatrix} x_{D0} \\ y_{D0} \\ z_{D0} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -l_{BC} \sin \varphi_{10} & -l_{CD} \sin \varphi_{10} \cdot \cos \varphi_{32} \\ l_{BC} \cos \varphi_{10} & +l_{CD} \cos \varphi_{10} \cdot \cos \varphi_{32} \\ Z_{21} & +l_{CD} \sin \varphi_{32} \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Таким образом, определяются искомые координаты точки в неподвижной системе

$$\begin{aligned} x_{D0} &= -l_{BC} \sin \varphi_{10} - l_{CD} \sin \varphi_{10} \cdot \cos \varphi_{32} \\ y_{D0} &= l_{BC} \cos \varphi_{10} + l_{CD} \cos \varphi_{10} \cdot \cos \varphi_{32} \\ z_{D0} &= z_{21} + l_{CD} \sin \varphi_{32} \end{aligned}$$

Полученные зависимости позволяют по заданному диапазону изменения координат точки  $D$  подобрать нужные длины звеньев, а также пределы изменения обобщенных координат.

## 4. СОСТАВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

### 4.1. Основные узлы промышленного робота

В зависимости от степени совершенства системы управления и оснащённости техническими органами чувств роботы подразделяются на три поколения [4, с. 324]:

Роботы первого поколения работают по жесткой программе и могут воспроизводить заданные движения манипулятора независимо от внешней обстановки. Программа легко заменяется, чем обеспечивается

гибкость перестройки работа на различные операции.

Роботы второго поколения - адаптирующиеся, очувствленные системы. Они снабжены датчиками - техническими органами чувств (зрение, слух, осязание и пр.). Эти роботы классифицируют обстановку (внешнюю и внутреннюю) и производят действия в соответствии со сложившейся обстановкой, т.е. работают по принципу «класс ситуаций - действие».

Роботы третьего поколения - интеллектуальные роботы, снабжены элементами искусственного интеллекта. Задание для них задается в весьма общем виде. Они выбирают и осуществляют оптимальное решение поставленной задачи.

Звенья манипулятора в реальном воплощении не являются простыми деталями, но содержат, помимо жестких несущих элементов, ряд других компонентов: части приводов, составляющие элементов кинематических пар; остановочные, тормозные и демпфирующие устройства и т.п. [1].

**"Рука"** - один из наиболее сложных узлов, завершением которого является рабочий орган. "Рука" обеспечивает рабочему органу как переносные, так и ориентирующие степени подвижности.

**Каретка** - узел, перемещающийся прямолинейно в вертикальном или горизонтальном направлениях по жестким направляющим смежного с ним узла - основания, колонны, другой каретки.

**Колонна, или платформа** - узлы, обеспечивающие вращательное движение относительно вертикальной оси присоединенных к ним других узлов манипулятора.

**Блок углового перемещения** - узел, обеспечивающий вращательное, как правило, неполноповоротное движение относительно какой-либо оси (обычно горизонтальной) присоединенного к нему другого узла манипулятора (например, "руки" относительно колонны или каретки).

**Основание** - опорная конструкция, на которой размещаются узлы и системы манипулятора, может быть неподвижным или перемещаемым. В последнем случае основание оснащается устройством передвижения.

#### **4.2. Рабочие органы**

Рабочий орган робота - это составная часть руки манипулятора, предназначенная для непосредственного захватывания и удержания объектов, а также для выполнения различных операций. В состав рабочего органа входят захватные устройства, технологические инструменты и специальные устройства [1].

Захватные устройства (ЗУ, схват или захват) предназначены для захватывания объектов манипулирования, надежного их удержания в процессе перемещения и точной установки на заданное местоположение.

Существуют как универсальные ЗУ, предназначенные для удержания различных по размерам, конфигурации и массе объектов, так и специальные, предназначенные для удержания определенного типа детали или груза. Как правило, промышленные и транспортные роботы снабжены набором сменных ЗУ, которые применяются в зависимости от конкретных условий, или типа грузов. На типовые ЗУ можно устанавливать сменные рабочие элементы (губки, присосы, подхваты и т.п.).

#### **4.3. Приводы роботов**

По виду энергоносителя различают пневматический, гидравлический, электрический приводы и их комбинации [1].

По виду исполнительных двигателей приводы могут осуществлять поступательное прямолинейное движение, могут быть укомплектованы вращательными малооборотными либо высокооборотными двигателями.

Отдельный класс приводов составляют сервоприводы. Слово «серво-» означает «вспомогательный», «зависимый», «обслуживающий», т.е. действующий по команде. В соответствии с японским промышленным стандартом JIS *сервомеханизм - это "система автоматического управления,*

*в которой входной управляющий сигнал преобразуется в механическое линейное или угловое перемещение управляемого объекта". Сервомеханизмы в приводах обеспечивают перемещение требуемого звена манипуляционной системы робота точно в заданное положение.*

#### **4.4. Информационно-управляющая система**

Информационно-управляющая система (ИУС) робота, или его управляющее устройство (УУ), является важнейшей составной частью, образуя в сочетании с исполнительной системой (манипулятором) собственно робот. ИУС служит для

1) восприятия и преобразования информации о состоянии внешней среды и самого робота;

2) выработки законов управления исполнительными устройствами на основе управляющей программы, командных сигналов с пульта управления и информации о положении и состоянии элементов робота и окружающей среды;

3) передачи управляющих воздействий приводам и механизмам исполнительной системы с целью организации активного взаимодействия робота с окружающей средой.

Функциональные возможности робота - его универсальность и гибкость, быстрота перепрограммирования (обучаемость), число позиций, обслуживаемых рабочим органом, точность позиционирования, быстродействие и ряд других качеств в значительной мере определяются его информационно-управляющей системой. Управляющее устройство современного робота третьего поколения должно обладать способностью вырабатывать целесообразное поведение, закрепляя его в памяти, то есть обладать способностью к обучению на собственном опыте и адаптацией к изменившимся условиям.

*Контрольные вопросы для самопроверки*

1. Как определяется понятие "промышленный робот" ?
2. Из каких основных составных частей состоит промышленный робот ?
3. По каким основным признакам классифицируются промышленные роботы ?
4. Как классифицируются ПР по уровню вводимой информации и способу обучения ?
5. Каковы основные технические характеристики промышленных роботов ?
6. Как определяется число степеней подвижности ПР, и какие степени подвижности различают ?
7. Каковы величины и скорости перемещения рабочих органов современных промышленных роботов ?
8. Что такое рабочая зона, и какими параметрами она характеризуется ?
9. Что такое маневренность манипулятора?
10. В чем принципиальное отличие кинематических цепей манипуляторов от других механизмов?
11. Что такое зона обслуживания манипулятора?
12. Что такое коэффициент сервиса, в каких пределах он изменяется?
13. Что такое угол сервиса?
14. Какова целесообразность создания и применения специальных грузоподъемных кранов-роботов ?
15. Каковы разновидности кранов-роботов и их конструктивные особенности ?

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Василенко Н.В., Никитин К.Д., Пономарёв В.П., Смолин А.Ю. - Основы робототехники. Под общей редакцией Никитина К.Д. Томск, МГП «РАСКО» 1993. [Электронный ресурс]. *Режим доступа: [http://www.- bibliotekar.ru/7-robot/12](http://www.-bibliotekar.ru/7-robot/12).*
2. Эльяш Н.Н., Гурьев Е.С. Теория механизмов и машин и детали машин: Учеб.пособие / Свердлов.инж.-пед.ин-т. Свердловск,1991.Ч.2. 80 с.
3. Левитский Н.И. Теория механизмов и машин.-М. Наука, 1979.- 576 с.
4. Теория механизмов и машин: Учеб.для вузов / К.В.Фролов/, С.А.Попов, А.К. Мусатов и др.; Под ред. К.В.Фролова.-М.: Высш.шк., 2000. – 496 с.
5. Механика промышленных роботов: Учеб.пособие для втузов: В 3 кн., Кн.2: Расчет и проектирование механизмов / Е.И.Воробьев, О.Д. Егоров, С.А. Попов.-М.: Высш.шк., 1988.- 367 с.



Учебное издание

Э л ь я ш Н а т а л ь я Н и к о л а е в н а

Кандидат технических наук, доцент

## **ОСНОВЫ РОБОТОТЕХНИКИ**

учебное пособие (конспект лекций).

Печатается в авторской редакции