

## ВВЕДЕНИЕ В ПРОФЕССИОНАЛЬНУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ «Мехатроника и робототехника»

### Тема «Механика роботов»

#### 1. Простейшие механизмы

Простейшие механизмы были описаны Героном Александрийским в его трактате «Механика».

Он описал пять типов *простейших машин*:

**Рычаг** (рис. 1) - простейший механизм, представляющий собой балку, вращающуюся вокруг точки опоры [1].

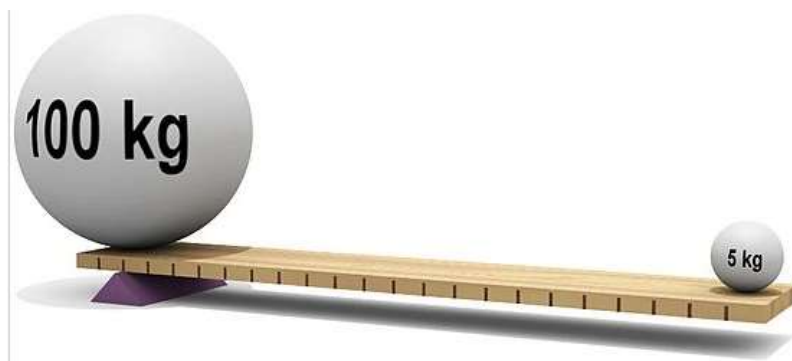


Рис. 1. Использование рычага для получения большего усилия на коротком плече, за счёт приложения меньшей силы на длинном.

**Ворот** (рис. 2) — простейший механизм, предназначенный для создания тягового усилия на канате (тросе, верёвке). Синоним простейшей лебёдки [1].

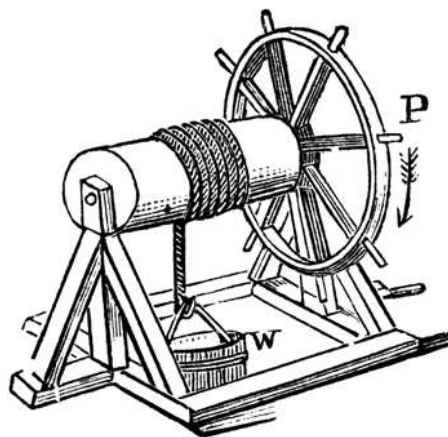


Рис. 2. Применение ворота в колодце

**Клин** (рис. 3) — простой механизм в виде призмы, рабочие поверхности которого сходятся под острым углом. Используется для раздвижения, разделения на части обрабатываемого предмета [1]. Клин — одна из разновидностей механизма под названием «*наклонная плоскость*».

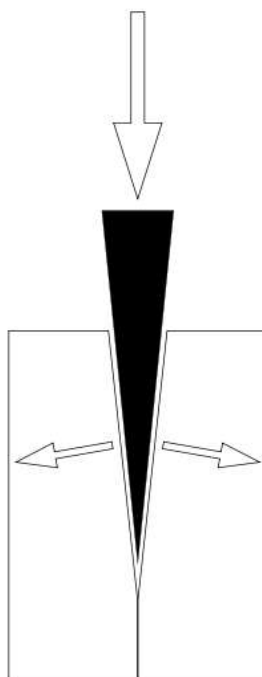


Рис. 3. Принцип действия клина

**Винт (шnek)** — простейший механизм (рис. 4). Резьба винта, в сущности, представляет собой другой простейший механизм — наклонную плоскость, многократно обёрнутую вокруг цилиндра [1].

Примеры простых устройств с винтовой резьбой — домкрат, болт с гайкой, тиски.

Идеальный выигрыш в силе равен отношению расстояния, проходимого точкой приложения усилия за один оборот винта (длины окружности), к расстоянию между двумя соседними витками резьбы (шаг резьбы).

Первый винт был запатентован в 1784 году, через 1700 лет после Герона.



Рис. 4. Винт

**Блок** (рис. 5) — простое механическое устройство, позволяющее регулировать силу, ось которого закреплена при подъеме грузов, не поднимается и не опускается. Представляет собой колесо с желобом по окружности, вращающееся вокруг своей оси. Жёлоб предназначен для каната, цепи, ремня и т. п. Ось блока помещается в обоймах, прикреплённых на балке или стене, такой блок называется неподвижным (то есть ось блока закреплена); если же к этим обоймам прикрепляется груз, и блок вместе с ними может двигаться, то такой блок называется подвижным [1].

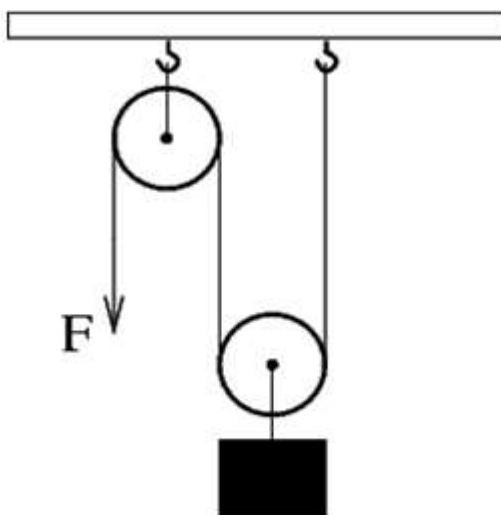


Рис. 5. Система из неподвижного и подвижного блоков

Именно Герон установил «золотое правило механики», согласно которому выигрыш в силе при использовании простых механизмов сопровождается потерей в расстоянии.

"Механика" Герона дошла до нас в переводе арабского ученого IX века н.э. Косты аль-Балбаки. До XIX века эта книга нигде не публиковалась. В "Механике" помимо описания простейших механизмов: клина, рычага, ворот, блока, винта, описывается механизм для подъема грузов, называемый *барулком* (рис. 6).

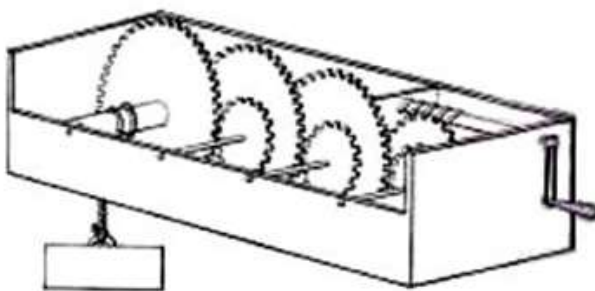


Рис. 6. Барулк (barouk)

Это не что иное, как редуктор, используемый в качестве лебёдки. Барулк Герона состоит из нескольких зубчатых колес, приводимых в движение ручной силой, причем Герон принимает отношение диаметра колеса к диаметру оси равным 5:1.

## 2. Механическая часть манипулятора промышленного робота

### 2.1. Соединения деталей машин

**Соединение** — процесс изготовления изделия из деталей, сборочных единиц (узлов), агрегатов путём физического объединения в одно целое.

Показатели работоспособности соединения —

- прочность и/или герметичность,
- технологичность.

Является основной частью производственного процесса сборки.

На рис. 7 показана классификация соединений.



Рис. 7. Классификация соединений

### Разъёмные соединения

Наиболее распространёнными разъёмными соединениями являются:

- резьбовое соединение,
- штифтовое соединение,
- шпоночное соединение,
- шлицевое (зубчатое) соединение,
- байонетное соединение,
- клеммовое соединение,
- конусное соединение,
- профильное соединение.

### РЕЗЬБОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

**Резьбовое соединение** — крепёжное соединение в виде резьбы.

**Резьба** в технике — чередующиеся выступы и впадины на поверхности тел вращения, расположенные по винтовой линии.

Резьбовые соединения подразделяются на 2 вида:

1. резьбовое соединение деталей с резьбой, нарезанной непосредственно на этих деталях, детали вкручиваются одна в другую;
2. резьбовое соединение при помощи дополнительных соединительных деталей (рис. 8):
  - 2.1. болтовое соединение (рис. 9);
  - 2.2. винтовое соединение (рис. 10);
  - 2.3. шпильчное соединение (рис. 11).

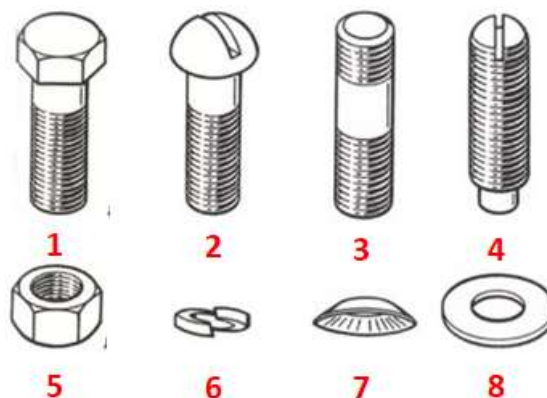


Рис. 8. Соединительные детали для резьбовых соединений: 1 – болт, 2 – винт, 3 – шпилька, 4 – установочный винт, 5 – гайка, 6 – пружинная шайба, 7 – деформируемая шайба, 8 – плоская шайба

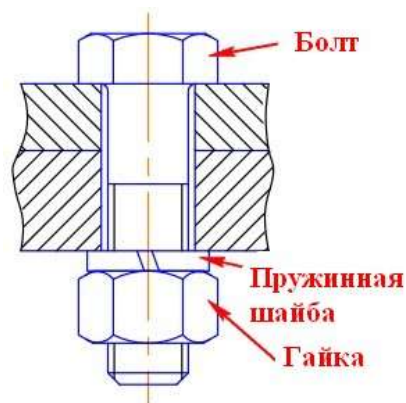


Рис. 9. Болтовое соединение в разрезе

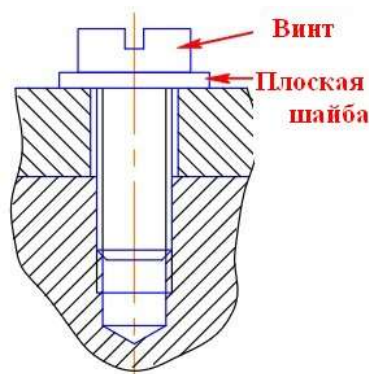


Рис. 10. Винтовое соединение в разрезе

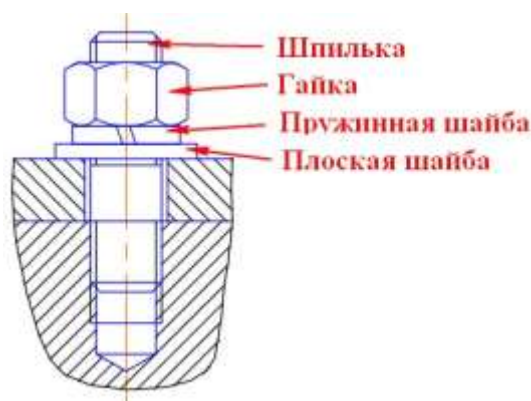


Рис. 11. Шпильчное соединение в разрезе

**Болт** — крепёжное изделие в виде стержня с наружной резьбой, как правило, с шестигранной головкой под гаечный ключ, образующее соединение при помощи гайки или иного резьбового отверстия.

**Винт** — крепёжное изделие для соединения деталей, одна из которых может быть с внутренней резьбой. Винт имеет вид стержня с наружной резьбой на одном конце и конструктивным элементом для передачи крутящего момента на другом. Передающим усилие элементом могут являться различного рода головки, шлицы в торце стержня и тому подобное.

**Шуруп** — это разновидность винта, отличается тем, что имеет коническое сужение на конце и более редкую резьбу.

Шуруп, создающий резьбу при вкручивании, называется самонарезающим винтом — в просторечии «саморезом». Винт предназначен для образования резьбового соединения или фиксации.

Кроме соединения деталей, винты наряду с болтами могут выполнять функцию оси вращающихся деталей, служить направляющей для прямолинейного или вращательного движения и прочих целей.

**Шпилька** — крепёжное изделие в виде стержня с наружной резьбой, образующее соединение при помощи гайки или резьбового отверстия.

### Штифтовое соединение

**Штифт** — крепёжное изделие в виде цилиндрического или конического стержня (рис. 12), предназначенное для неподвижного соединения.

Штифт плотно вставляется в отверстие, проходящее через обе детали (рис. 13, 14), предотвращая их взаимное смещение.

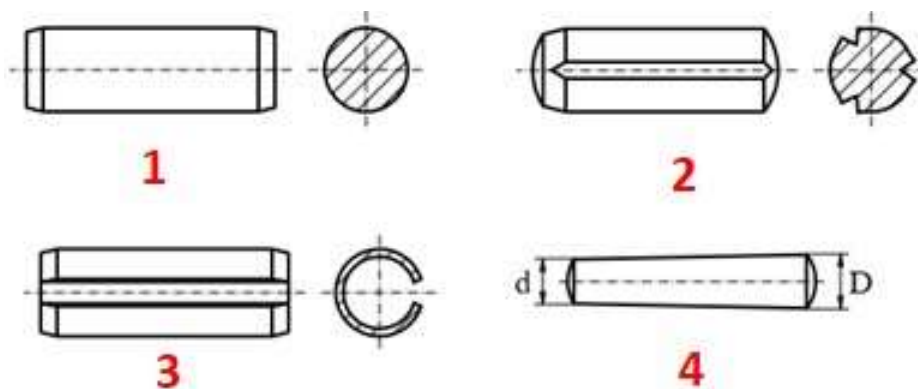


Рис. 12. Виды штифтов: 1 – цилиндрический, 2 – зазубренный, 3 – сцепляющийся, 4 – конический

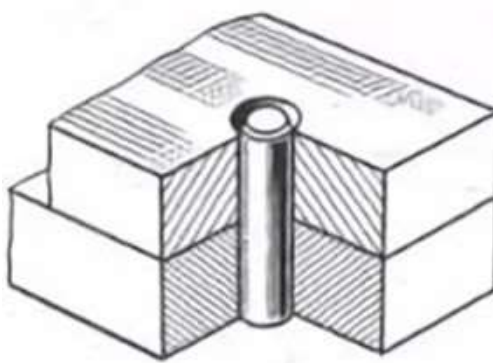


Рис. 13. Соединение плоских деталей цилиндрическим штифтом



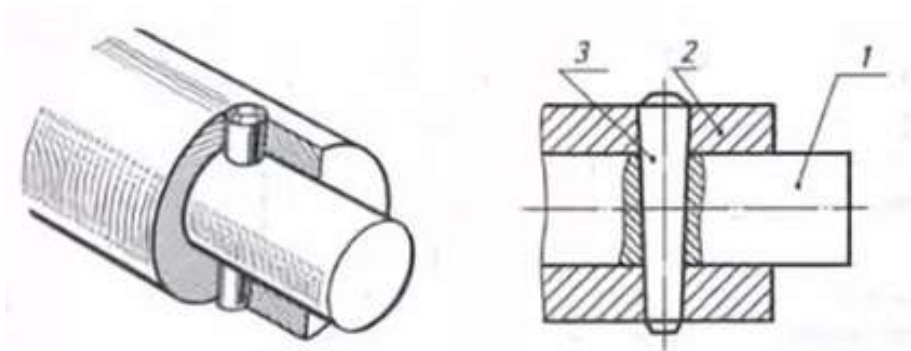


Рис. 14. Соединение вала и втулки коническим штифтом: 1- вал, 2 – втулка, 3 - штифт

### Шпоночные соединения

*Шпоночное соединение* — соединение охватывающей и охватываемой детали (рис. 15) для передачи крутящего момента с помощью шпонки (рис. 16).

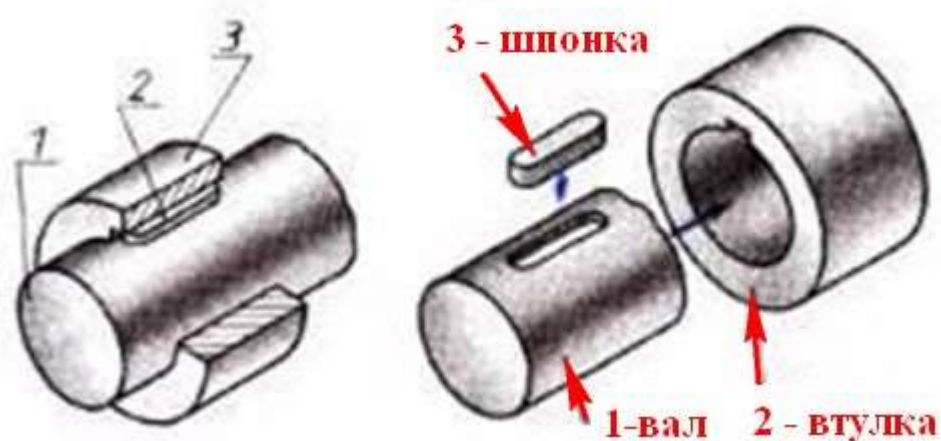


Рис. 15. Шпоночное соединение

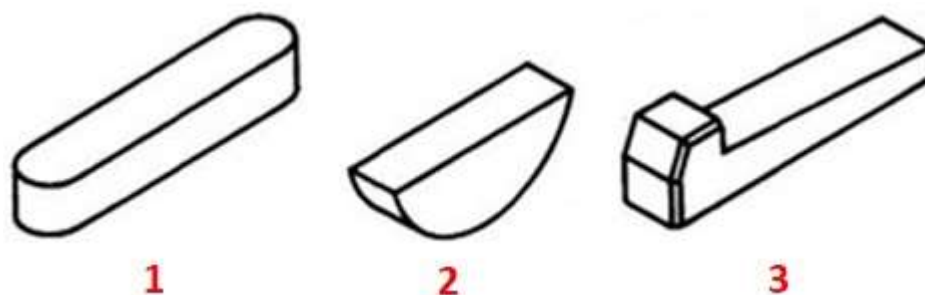


Рис. 16. Виды шпонок

Основной критерий работоспособности шпоночного соединения — *прочность на смятие*.

Достоинства шпоночных соединений:

- простота конструкции;
- легкость монтажа и демонтажа;
- низкая стоимость.

Недостатки шпоночных соединений:

- шпоночные пазы ослабляют прочность вала;

- концентрация напряжений, возникающих в зоне шпоночного паза, снижает сопротивление усталости.

### ШЛИЦЕВОЕ (ЗУБЧАТОЕ) СОЕДИНЕНИЕ

**Шлицевое соединение** — соединение вала (охватываемой поверхности) и отверстия (охватывающей поверхности) с помощью шлицев (пазов) и зубьев (выступов), радиально расположенных на поверхностях.

Обладает большой прочностью, обеспечивает соосность вала (деталь 1 на рис. 17) и отверстия на *ступице* (деталь 2 на рис. 17), с возможностью осевого перемещения детали вдоль оси.

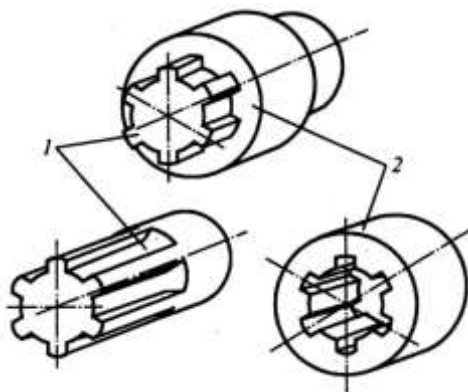


Рис. 17. Конструкция шлицевого соединения

### ПРОФИЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

**Профильное соединение** - соединение деталей машин по поверхности их взаимного контакта, имеющей плавный некруглый контур (без шпонок, зубьев и т.п.).

В профильных (бесшпоночных) соединениях соединяемые детали скрепляются между собой посредством взаимного контакта по плавной некруглой поверхности (рис. 18).

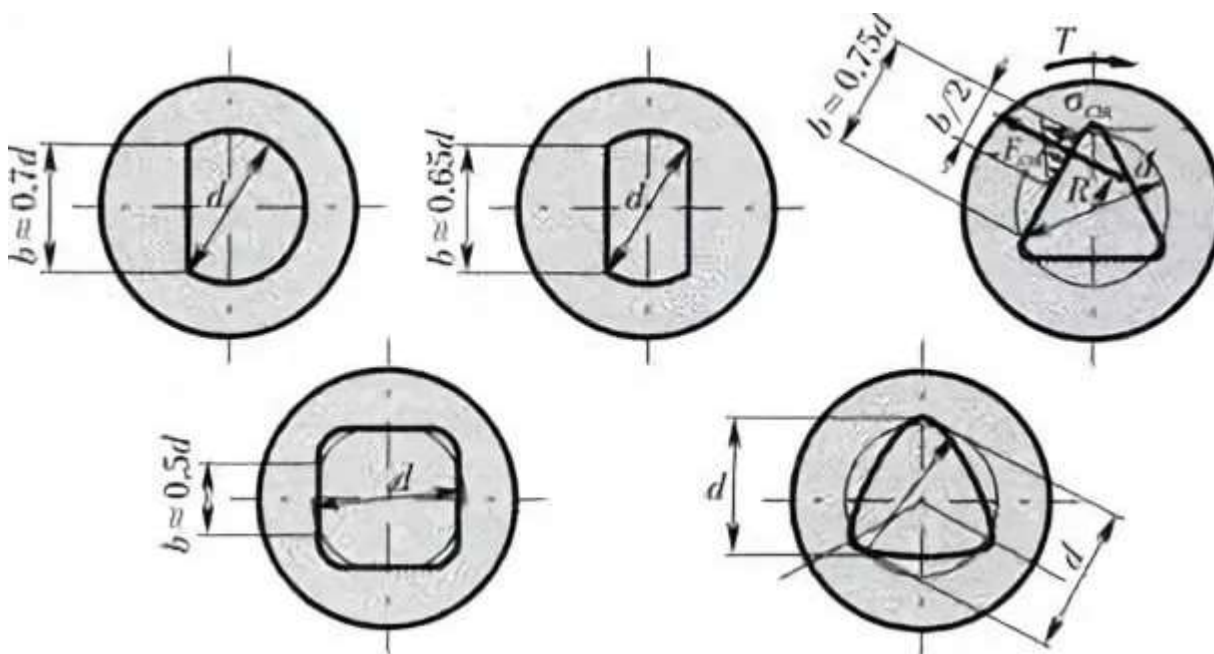


Рис. 18. Профильные соединения различного сечения



Образующая поверхность профильного соединения может быть расположена как параллельно осевой линии вала, так и наклонно к ней. В последнем случае соединение наряду с крутящим моментом может передавать также и осевую нагрузку.

Профильные соединения надежны, но не технологичны, поэтому их применение ограничено.

### Неразъёмные соединения

К ним относятся следующие виды соединений:

- сварное соединение
- паяное соединение
- клееное соединение
- заклёпочное соединение (клёпаное соединение)
- армированное соединение

### Паяное соединение

**Пайка** — технологическая операция, применяемая для получения неразъёмного соединения деталей из различных материалов путём введения между этими деталями расплавленного металла (припоя), имеющего более низкую температуру плавления, чем материал соединяемых деталей.

**Припой** — материал, применяемый при пайке для соединения заготовок и имеющий температуру плавления ниже, чем соединяемые металлы. Применяют сплавы на основе олова, свинца, кадмия, меди, никеля, серебра и другие.

Припой выпускаются в виде гранул, прутков, проволоки (рис. 19), порошка, фольги, паст и закладных деталей.

Пайку осуществляют или с целью создания механически прочного (иногда герметичного) шва, или для получения электрического контакта с малым переходным сопротивлением.



Рис. 19. Катушка оловянно-свинцового припоя

### ВАЛЫ И ОСИ

Шкивы, шестерни и другие детали устанавливаются на осях и валах. Оси несут вращающиеся детали, но сами не передают момент вращения. Они участвуют в передаче.

**Валы** – детали, предназначенные для передачи крутящего момента вдоль своей геометрической оси и для поддержания вращающихся деталей (рис. 20).

Классификация валов по назначению:

- **валы передач**, несущие детали передач – зубчатые колеса, шкивы, звездочки, муфты,
- **коренные валы**, несущие, помимо деталей передач, еще и рабочие органы – колеса, кривошпы, зажимные патроны и т. д.

Классификация валов по форме геометрической оси:

- прямые,
- коленчатые (с изменяющейся геометрической формой оси) и
- гибкие.

Классификация прямых валов

- по форме осевого сечения:
  - постоянного диаметра и
  - ступенчатые,
- по форме поперечного сечения —
  - круглые,
  - шлицевые (рис. 17),
  - квадратные,
  - профильные (рис. 18).

Валы могут изготавливаться заодно с деталями передач или рабочими органами (например, вал–шестерня) или отдельно от них.

Практически валы (рис. 20) выполняют ступенчатыми. Эта форма удобна в изготовлении и сборке; уступы валов могут воспринимать большие осевые силы. Посадочные поверхности под ступицы деталей, насаживаемых на вал, выполняют цилиндрическими или коническими.

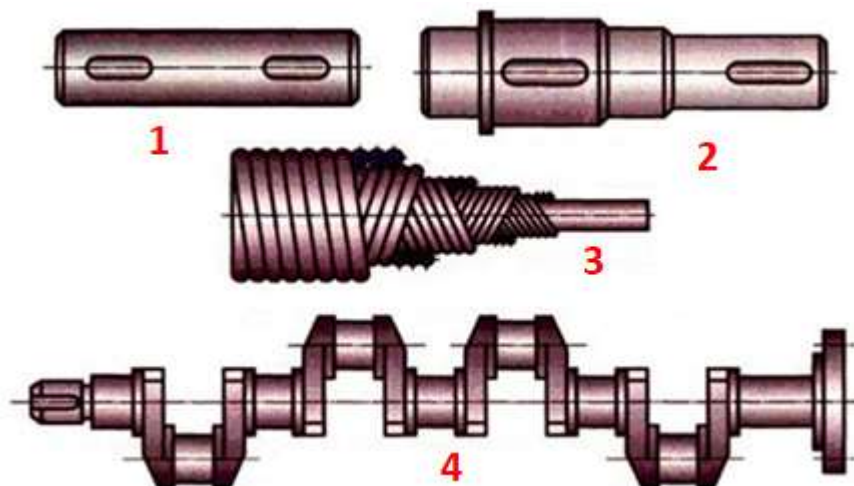


Рис. 20. Основные типы валов и осей: 1 – гладкий, 2 – ступенчатый, 3 – гибкий, 4 - коленчатый

**Вал** — деталь машины, предназначенная для передачи крутящего момента и восприятия действующих сил со стороны расположенных на нём деталей и опор.

**Оси** – детали, служащие для поддержания вращающихся вместе с ними или на них деталей и не передающие крутящего момента.

В технике ось — стержень, на концах которого помещаются колёса (рис. 21). Оси бывают вращающиеся и неподвижные (относительно колеса).

В отличие от вала, ось не предназначена для передачи крутящего момента.

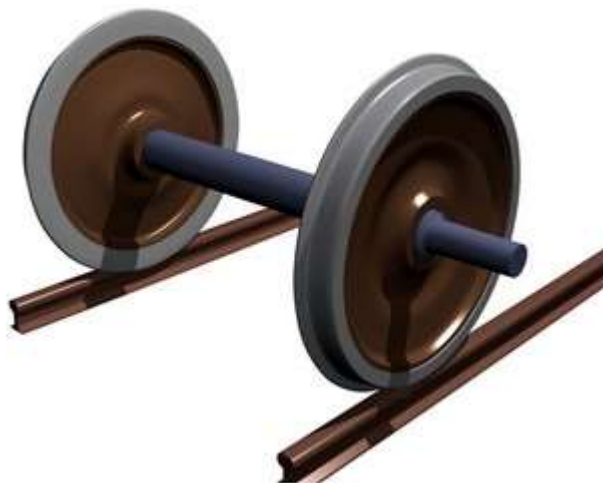


Рис. 21. Ось с колёсами

Оси и валы поддерживаются подшипниками.

### ПОДШИПНИКИ И МУФТЫ

**Подшипник** — сборочный узел (рис. 22), являющийся частью опоры или упора и поддерживающий вал, ось или иную подвижную конструкцию с заданной жёсткостью.

Фиксирует положение в пространстве, обеспечивает вращение, качение или линейное перемещение (для *линейных подшипников*) с наименьшим сопротивлением, воспринимает и передаёт нагрузку от подвижного узла на другие части конструкции.

В зависимости от вида трения рабочего элемента подшипники делятся на

- подшипники скольжения (рис. 22, а) и
- подшипники качения (рис. 22, б).

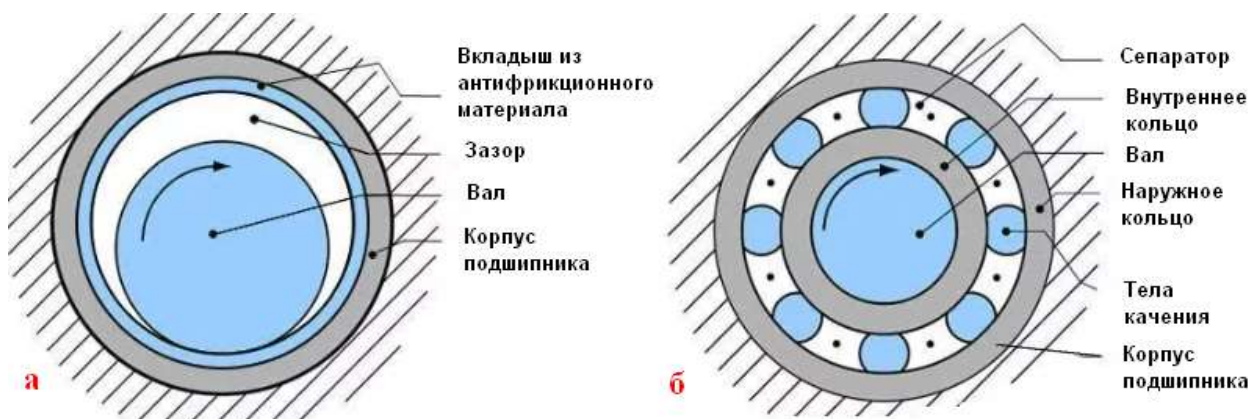


Рис. 22. Устройство подшипников: а – скольжения, б - качения

**Подшипники скольжения** состоят из двух элементов: корпуса и вкладыша (рис. 22, а). Вкладыш держит рабочий элемент и может быть неподвижный, подвижный, самоустанавливающийся. Трущиеся поверхности должны смазываться жидким маслом) или пластиковой смазкой для лучшей работы.

**Подшипники качения** состоят из внешнего кольца, внутреннего кольца и тел вращения с сопутствующими деталями.

**Редуктор (механический)** — механизм, передающий и преобразующий крутящий момент, с одной или более механическими передачами.

Основные характеристики редуктора:

- КПД,
- передаточное отношение - это отношение угловой скорости ведущего вала к угловой скорости ведомого вала  $i = \omega_1 / \omega_2$ ,
- передаваемая мощность,
- максимальные угловые скорости валов,
- количество ведущих и ведомых валов,
- тип и количество передач и ступеней.

В зависимости от соотношения скоростей  $\omega_1$  и  $\omega_2$  различают:

Демультпликатор - устройство, преобразующее высокую угловую скорость вращения входного вала в более низкую на выходном валу, повышая при этом вращающий момент;

Мультипликатор - редуктор, который преобразует низкую угловую скорость на входном валу в более высокую на выходном валу.

Редуктор со ступенчатым изменением передаточного отношения называется коробкой передач, с бесступенчатым — вариатор.

Классификация по типам механических передач:

- цилиндрические (рис. 23),
- конические (рис. 24),
- червячные (рис. 25),
- планетарные (рис. 26),
- волновые,
- спироидные и
- комбинированные.

Также редукторы можно классифицировать по типу корпусов, по способу охлаждения, по типам используемых подшипников.

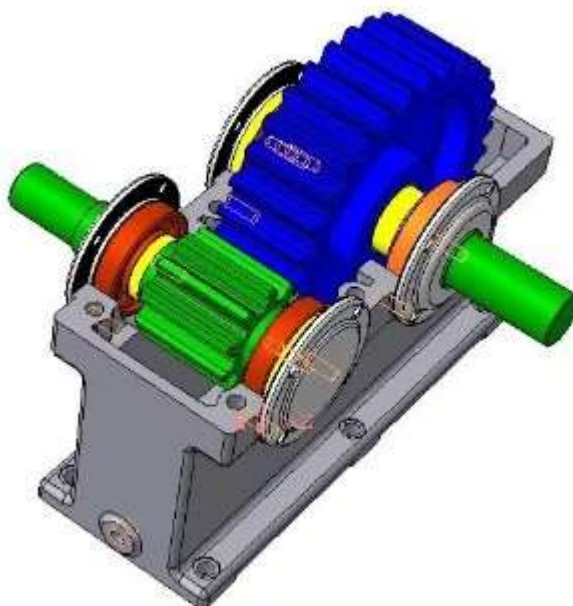


Рис. 23. Устройство цилиндрического редуктора

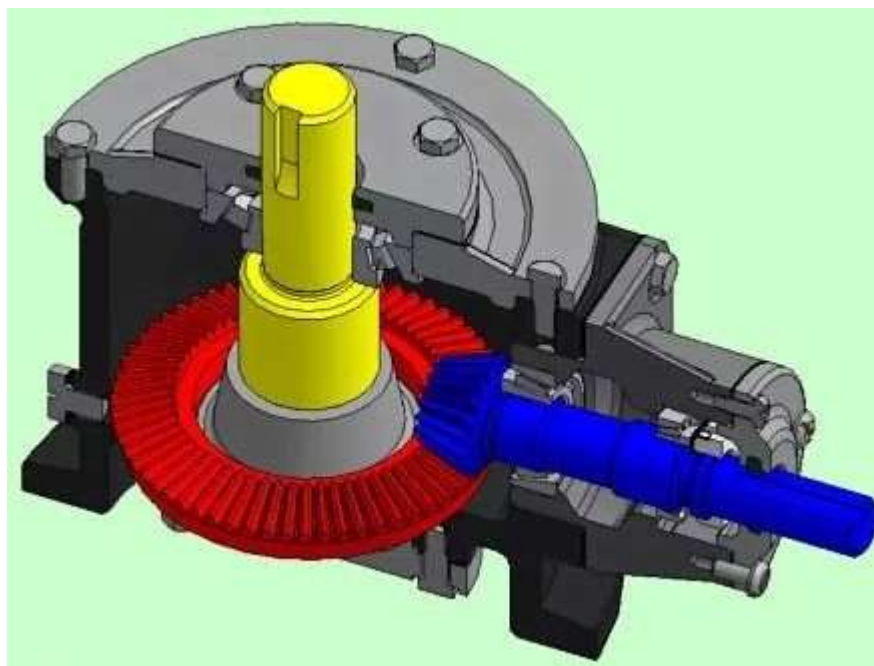


Рис. 24. Устройство конического редуктора



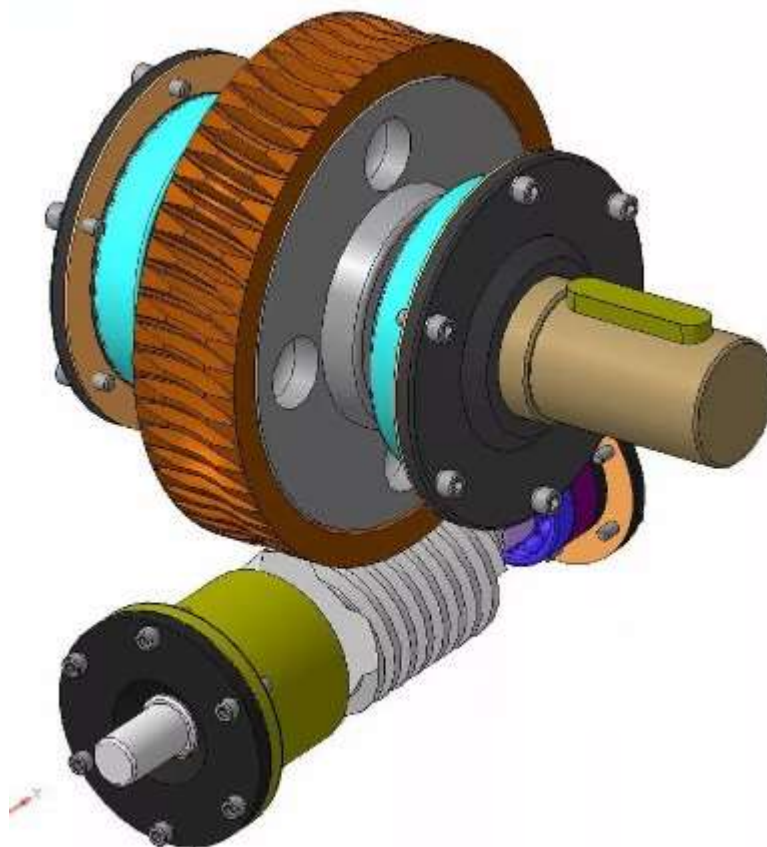


Рис. 25. Устройство червячного редуктора (без корпуса)

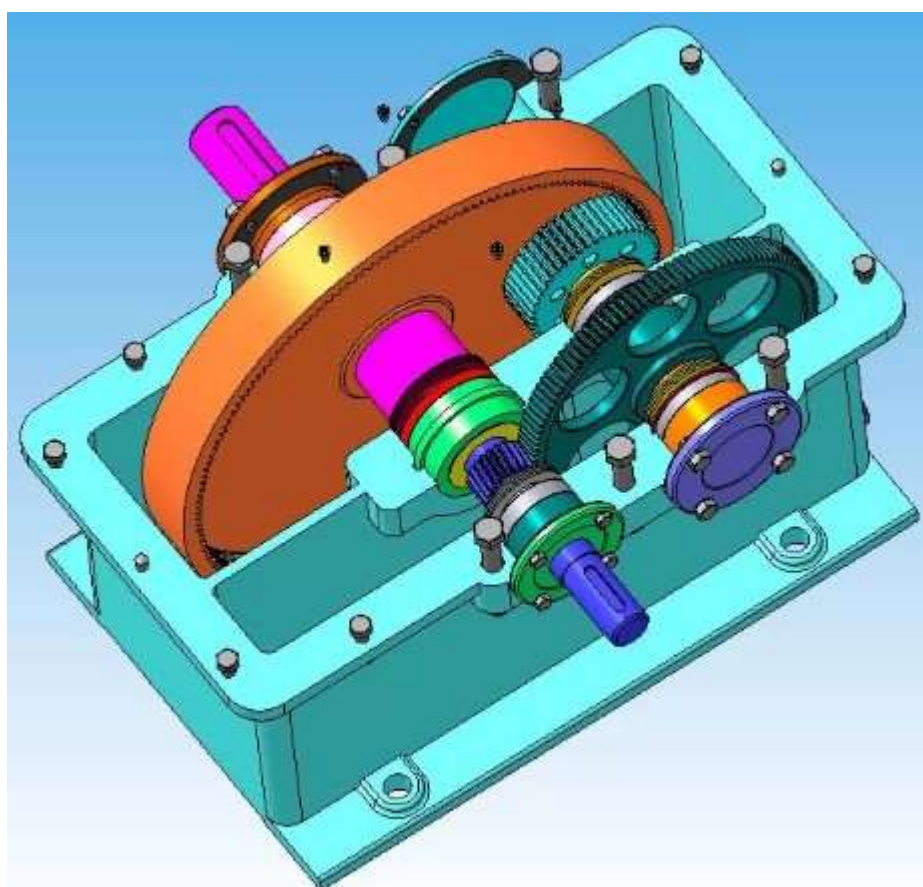


Рис. 26. Устройство планетарного редуктора



Редукторы также могут быть одноступенчатыми и многоступенчатыми. Иногда необходимо, чтобы выходной вал вращался с различными угловыми скоростями. В этом случае несколько пар шестерен с различным отношением и специальные передаточные механизмы размещаются в корпусе. Эти передаточные механизмы называются коробкой передач.

## 2.1. Конструкция манипулятора

Основными узлами являются:

- несущие конструкции,
- приводы,
- передаточные механизмы,
- исполнительные механизмы и
- захватные устройства.

Исполнительный механизм манипулятора – это совокупность подвижно соединенных звеньев, предназначенных для воздействия на объект манипулирования или обрабатываемую среду.

Отдельные узлы и весь манипулятор в целом могут быть представлены в виде так называемых кинематических схем.

По Википедии:

**Принципиальная кинематическая схема** — это такая схема, на которой показана последовательность передачи движения от двигателя через передаточный механизм к рабочим органам машины (например, шпинделю станка, режущему инструменту, ведущим колёсам автомобиля и др.) и их взаимосвязь.



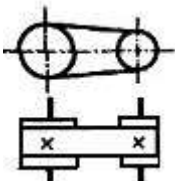
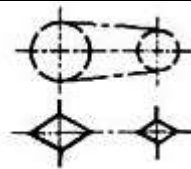
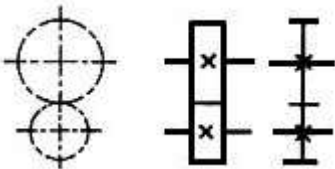
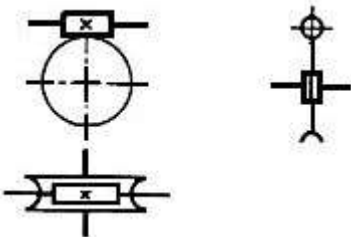


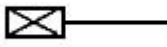

На кинематических схемах изображают только те элементы машины или механизма, которые принимают участие в передаче движения (зубчатые колёса, ходовые винты, валы, шкивы, муфты и др.) без соблюдения размеров и пропорций.

**Элемент (звено)** кинематической схемы – это одна часть конструкции или несколько жёстко соединённых и неподвижных относительно друг друга частей конструкции. Их условные графические обозначения (УГО) представлены в таблице 1.

Таблица 1

УГО элементов кинематических схем согласно ГОСТ 2.770-68 (2000) ЕСКД

Наименование	Обозначение
Вал, валик, ось, стержень, шатун и т.п.	
Неподвижное звено (стойка). Для указания неподвижности любого звена часть его контура покрывают штриховкой	
Соединение частей звена неподвижное, допускающее регулировку	

Неподвижное соединение детали с валом, стержнем	
Муфта. Общее обозначение без уточнения типа	
Передача ремнем без уточнения типа ремня	
Передача цепью без уточнения типа цепи	
Передачи зубчатые с внешним зацеплением	
Передачи червячные с цилиндрическим червяком	
Пружина цилиндрическая сжатия	
Пружина цилиндрическая растяжения	
Конец вала под съемную рукоятку	
Гибкий вал для передачи вращающего момента	

### Кинематические пары

**Кинематическая пара** (англ. *kinematic pair*) — это соединение двух звеньев, обеспечивающее определённое относительное движение. Для всех кинематических пар необходим постоянный контакт между их элементами, это достигается либо с помощью определённых усилий, либо приданием элементам определённой геометрической формы (рис. 27).

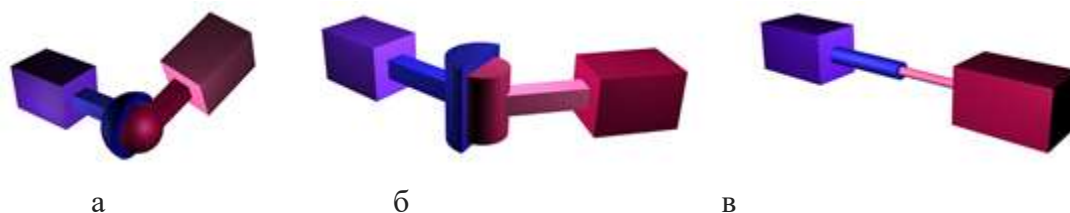


Рис. 27. Примеры кинематических пар:

а – круговой шарнир, б - цилиндрический шарнир, в – скользящее поршневое соединение

**Кинематическая пара** – это гибкое соединение между двумя контактирующими телами.

В соответствии с характером контактирующих элементов, кинематические пары делят на:

- **низшие** – у которых элементы контактируют поверхностями и
- **высшие** – у которых элементы контактируют линией или точкой.

Таблица 2

УГО кинематических пар согласно ГОСТ 2.770-68 (2000) ЕСКД

Наименование	Обозначение
Вращательная	
Поступательная	
Винтовая	
Цилиндрическая	
сферическая с пальцем	
карданный шарнир	
сферическая (шаровая)	

## 2.2. Передача движения в механизмах

Передача вращательного движения

Фрикционная передача

Основа фрикционной передачи – сила трения, возникающая при трении тел вращения, когда они соприкасаются друг с другом (рис.28).

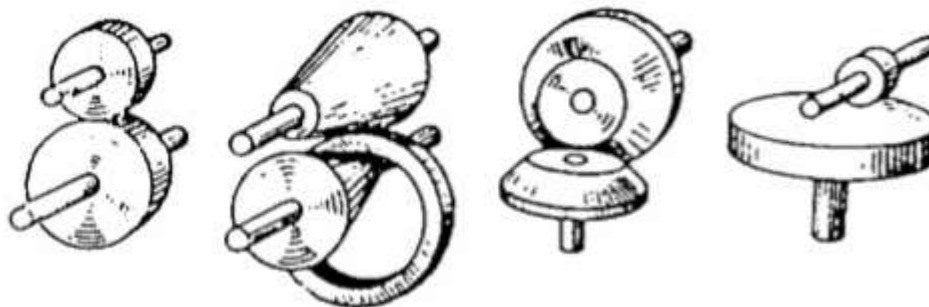


Рис. 28. Внешний вид фрикционных передач

Преимущества фрикционных передач:

- простота конструкции;
- бесшумная работа;
- неограниченная величина передаточного числа;
- возможность скольжения при перегрузке;
- защита деталей исполнительного механизма от разрушения.

Недостатки фрикционной передачи:

- ограниченная возможность передачи;
- большая нагрузка на вал и опору вала;
- нестабильная передача в результате инерции;
- высокое истирание;
- сравнительно низкий коэффициент полезного действия .

### Зубчатые передачи

Зубчатые передачи имеют ещё одно название – шестеренчатые.

По взаимному расположению осей ведущего и ведомого валов зубчатые передачи классифицируются следующим образом:

- **цилиндрические**, если оси валов параллельны (рис. 29),
- **конические**, если оси валов перпендикулярны друг другу (рис. 30);
- **гипоидные конические**, у которых оси пересекаются в пространстве (рис. 31).



Рис. 29. Пример цилиндрической передачи



Рис. 30. Пример конической передачи



Рис. 31. Пример гипоидной передачи

По расположению зубьев различают шестерни:

- открытые – зубья располагаются на внешней поверхности шестерни (рис.29 – 31);
- закрытые – на внутренней поверхности (рис. 32).

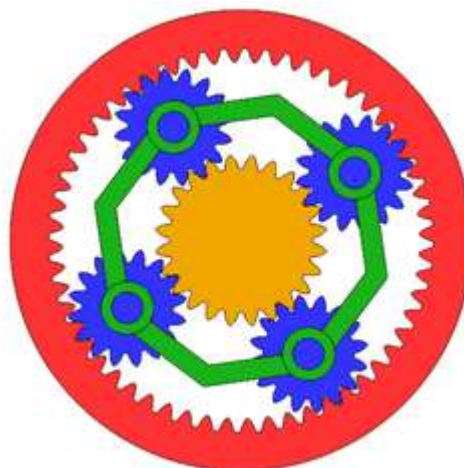


Рис. 32. Пример закрытой шестерни - водило в планетарной передаче

Преимущества шестерен:

- высокий КПД;
- компактность;
- высокий уровень безопасной работы;
- удобный сервис;
- постоянная передача;
- большой диапазон передаточной возможности.

Недостатки шестерен:

- сравнительно сложное изготовление;
- шум во время работы.

### Червячные передачи

Червячные передачи используются, чтобы передать движение между валами с перекрещивающимися осями. Червячная шестерня (деталь 1 на рис. 33), которая фиксируется на валу или (чаще) сделана вместе с ним, поворачивает шестерню (деталь 2).



Рис. 33. Цилиндрическая червячная передача

Основные преимущества червячных передач:

- плавность хода;
- бесшумная работа;
- большое отношение передачи к малым габаритным размерам;
- могут быть сделаны как нереверсивные.

Недостатки червячных передач:

- сравнительно низкий КПД;
- большой нагрев передачи;

ограниченная возможность передачи больших нагрузок.

### Механизмы возвратного и колебательного движения

#### Кривошипный механизм

**Кривошипно-шатунный механизм** (рис. 34) предназначен для преобразования возвратно-поступательного движения поршня во вращательное движение, и наоборот.

Состоит из следующих деталей:

**Кривошип** — звено кривошипно-шатунного механизма, совершающее циклическое вращательное движение на полный оборот вокруг неподвижной оси. Как правило, выступает в роли ведущего звена рычажных и зубчато-рычажных механизмов. Название кривошипа у коленвалов тяжелых двигателей - мотыль.

**Шатун** как элемент, необходимый для соединения Ползуна и Кривошипа.

**Ползун** — звено кривошипно-шатунного механизма, совершающее циклическое возвратно-поступательное движение за один оборот кривошипа.



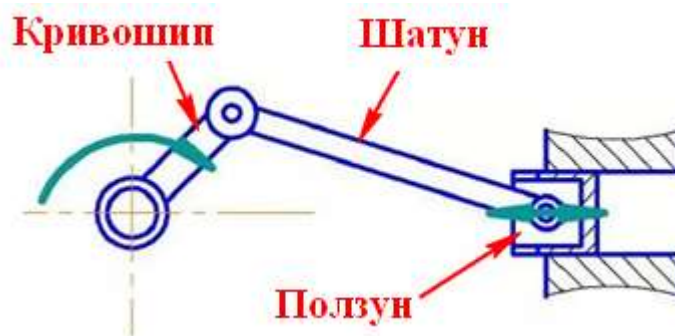


Рис. 34. Кривошипно-шатунный механизм

Механизм, состоящий из двух КШМ, представлен на рис. 35.

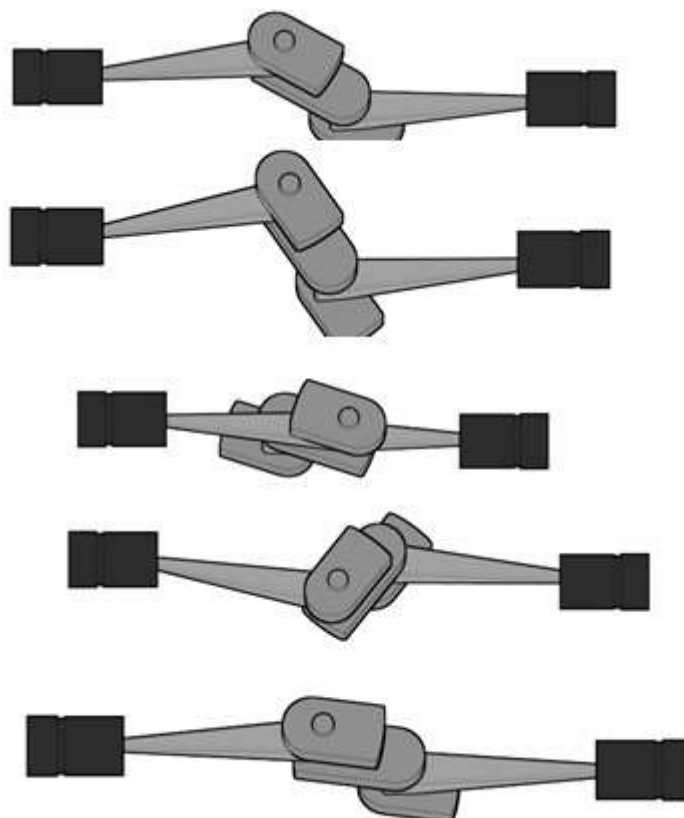


Рис. 35. Совместная работа двух КШМ

Предполагается, что вращение кривошипа трансформируется в ползуне в возвратно-поступательное прямолинейное движение. Если ведущим элементом является ползун, тогда прямолинейное движение трансформируется во вращательное.

#### Кулачковые механизмы

**Кулачковый механизм** — механизм (рис. 36), образующий высшую кинематическую пару, имеющий подвижное звено, совершающее вращательное движение, — *кулак (кулачок)*, с поверхностью переменной кривизны или имеющей форму эксцентрика, взаимодействующей с другим подвижным звеном — *толкателем*, если подвижное звено совершает прямолинейное движение, или *коромыслом*, если подвижное звено совершает качение. Кулак, совершающий прямолинейное движение, называется *копиром*.

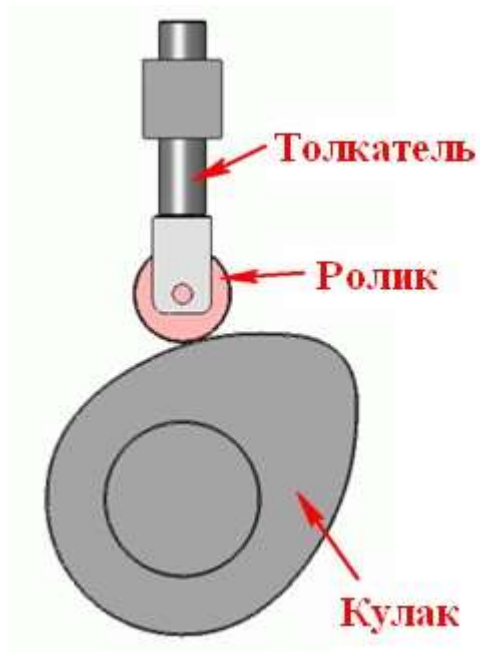


Рис. 36. Пример конструкции кулачкового механизма

При изменении эксцентриситета кулачка меняются параметры движения толкателя (рис. 37 и 38).

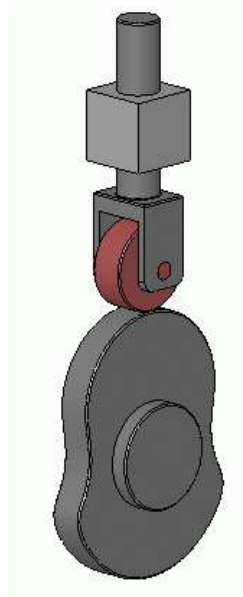


Рис. 37. Кулачковый механизм со сложной формой кулачка

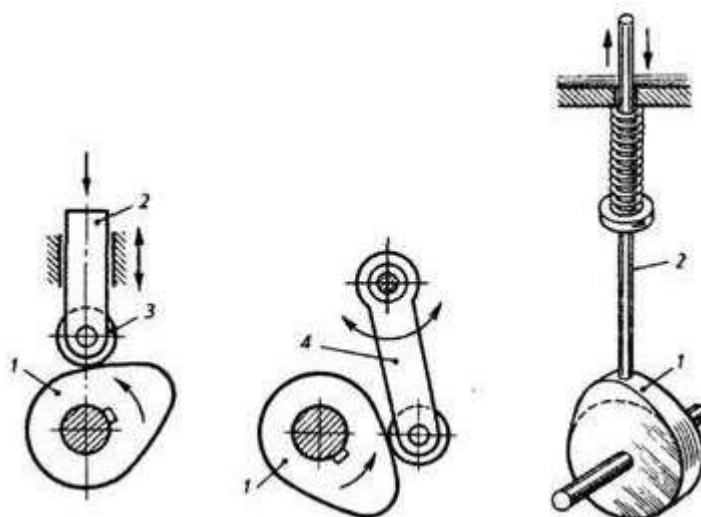


Рис. 38. Кулачковые механизмы различной конструкции: 1 – кулачок; 2 – толкатель; 3 – ролик; 4 - коромысло

Недостатки:

- большое трение и износ деталей;
- контакт между частями должен быть постоянно обеспечен;
- сложное изготовление профиля эксцентрика.

## ДИСКРЕТНЫЕ (СКАЧКОВЫЕ) МЕХАНИЗМЫ

### Храповые механизмы

**Храповой механизм** (храповик) — зубчатый механизм *прерывистого движения*, предназначенный для преобразования возвратно-вращательного движения в прерывистое вращательное движение в одном направлении. Проще говоря, храповик позволяет оси вращаться в одном направлении и не позволяет вращаться в другом.

Храповик обычно имеет форму зубчатого колеса с несимметричными зубьями (деталь 1 на рис. 39), имеющими упор с одной стороны. Движение колеса в обратную сторону ограничивается *собачкой* (деталь 2 на рис. 39), которая прижимается к колесу пружиной или под собственным весом.

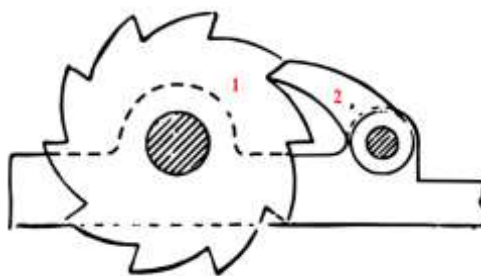


Рис. 39. Конструкция храпового механизма

### Мальтийский механизм

**Мальтийский механизм** — механизм *прерывистого движения*, преобразующий равномерное вращательное движение в прерывистое вращательное движение. Основное применение механизм получил в кинопроекторах в качестве скачкового механизма для прерывистого перемещения киноплёнки на шаг кадра.

Создателями мальтийского механизма в кинематографе считаются французы Констенсуз и Бюнцли, получившие патент номер 261292 14 ноября 1896 года. Русское название «мальтийский механизм» — от внешнего сходства ведомого звена устройства с мальтийским крестом (рис. 40), встречающимся в геральдике.



Рис. 40. Внешний вид мальтийского креста

Механизм преобразует равномерное вращение ведущего вала в скачкообразное вращение ведомого (рис. 41 - 43).

Мальтийские механизмы используются не только в киноаппаратуре и бывают с *внешним* (рис. 41) и *внутренним* (рис. 42) зацеплением, и, как правило, с числом пазов от 3 до 12. На рис. 43 показан механизм с внешним зацеплением с 6 пазами.

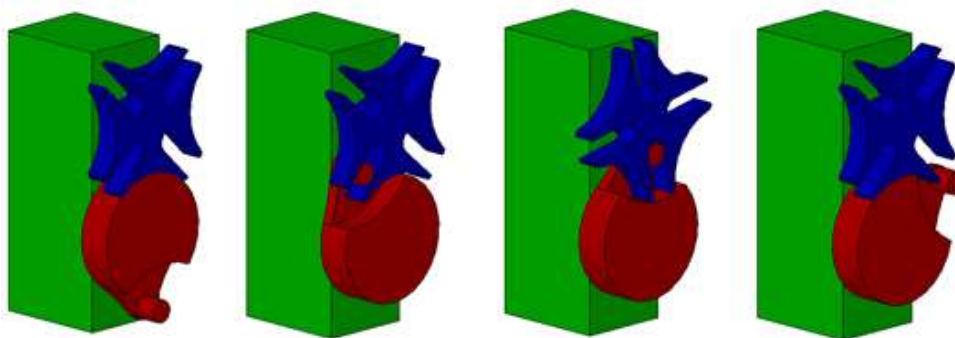


Рис. 41. Работа мальтийского механизма с внешним зацеплением с 4 пазами

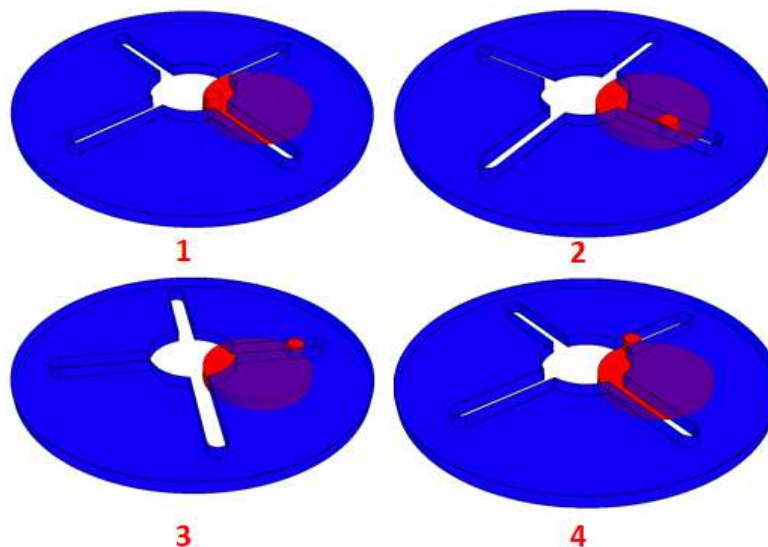


Рис. 42. Работа мальтийского механизма с внутренним зацеплением с 4 пазами

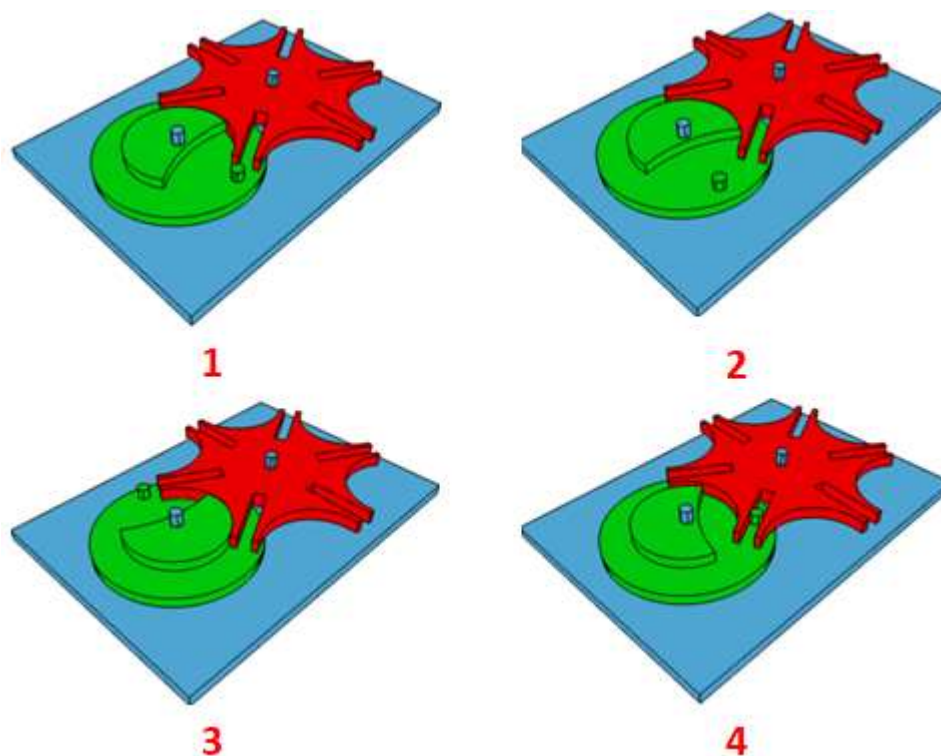


Рис. 43. Работа мальтийского механизма с внешним зацеплением с 6 пазами

#### Анкерный механизм

**Спусковой механизм часов** (на языке часовщиков: **спуск**, **ход**) — устройство, предназначенное для поддержания постоянной средней скорости вращения спускового колеса, допуская поворот на нужный угол только при определённом положении, и одновременно поддерживающее колебания маятника или балансира, компенсируя потери на трение и сопротивление воздуха.

Каждое колебание маятника (рис. 44) освобождает спусковой механизм, переводя его из состояния «блокирован» в состояние «движение» в течение короткого периода, который заканчивается, как только следующий зуб шестерни упирается в блокирующую поверхность спускового механизма. Именно это периодическое освобождения энергии и быстрой остановки заставляет часы «тикать». Этот звук издаёт зубчатая передача, когда шестерня вдруг останавливается в момент очередного блокирования спускового механизма.

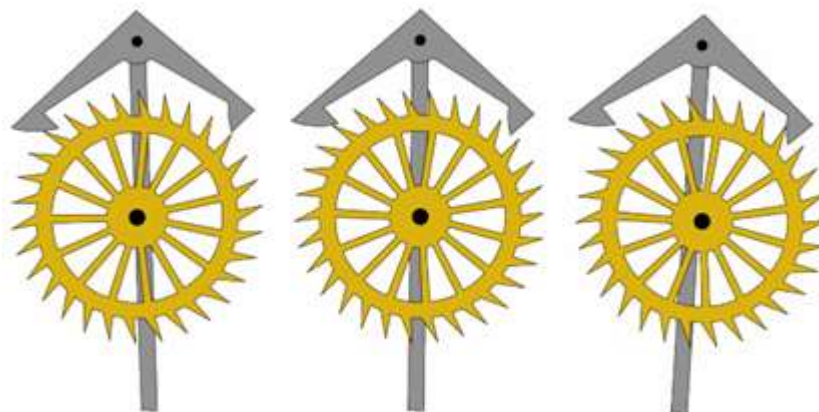


Рис. 44. Работа анкерного механизма





## КЛАССИФИКАЦИЯ РОБОТОВ ПО СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

Основой классификации является форма рабочей зоны. Так называется трёхмерное пространство, в пределах которого происходит перемещение и функционирование робота.

### Робот с прямоугольной системой координат

Рабочая зона имеет форму прямоугольного параллелепипеда (рис. 1): горизонтально расположенный манипулятор робота может перемещаться вдоль осей декартовой системы координат, традиционно обозначаемых как X, Y и Z. Отличительной особенностью таких роботов является простота управления и точность действий.

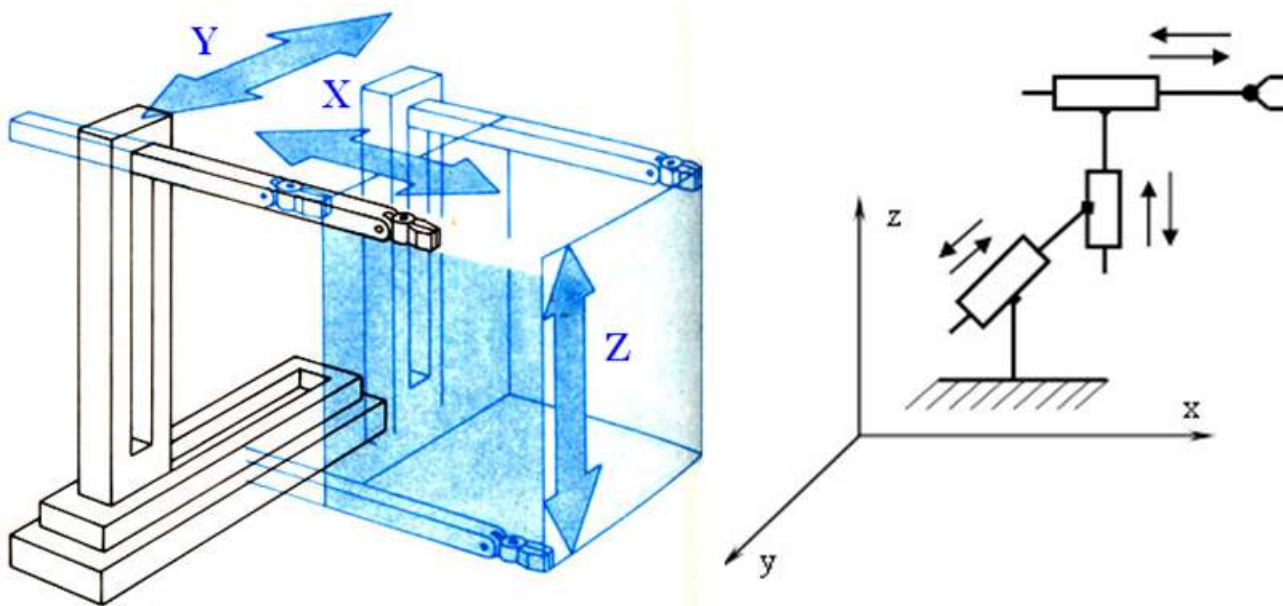


Рис. 1. Робот, функционирующий в декартовой (прямоугольной) системе координат и его кинематическая схема

### Робот с цилиндрической системой координат

У робота такого типа (рис. 2) горизонтально расположенный манипулятор закреплён на вертикальной стойке, жёстко связанной с неподвижным основанием.

Манипулятор может выдвигаться и втягиваться, а также перемещаться вверх и вниз вдоль стойки. Кроме того, весь узел манипулятора может поворачиваться вокруг оси основания, но не на полный оборот.

Наличие такого числа степеней свободы означает, что зона действия робота представляет собой часть цилиндра.

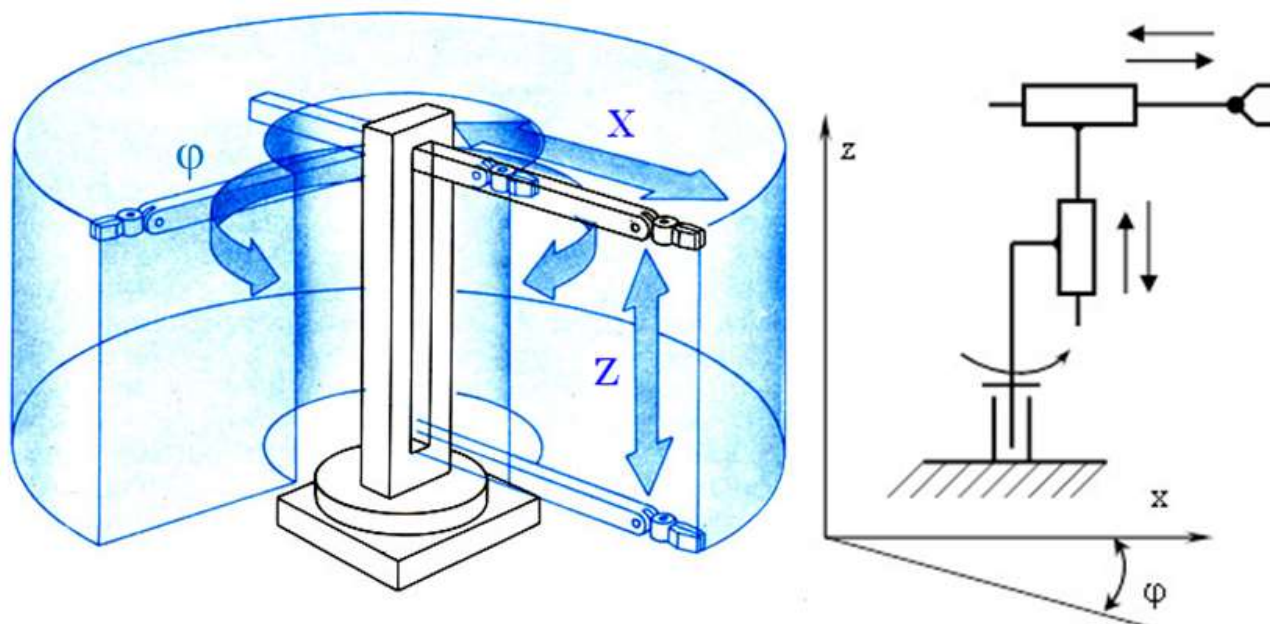


Рис. 2. Робот, функционирующий в цилиндрической системе координат и его кинематическая схема

### Робот со сферической (или полярной) системой координат

**В отличие от** робота с цилиндрической системой координат, вертикальное перемещение манипулятора у робота со сферической системой координат по оси  $z$  осуществляется путем его поворота в вертикальной плоскости, а не смещениями вверх или вниз. Поэтому рабочая зона в данном случае представляет собой усеченную сферу (рис. 3), а не цилиндр.

Первые модели промышленных роботов были сконструированы именно по этому принципу. Они особенно эффективны при выполнении таких операций, как подъем и перемещение грузов, поскольку манипулятор поднимает груз за счет поворота в 'плечевом суставе', затрачивая очень небольшую энергию.

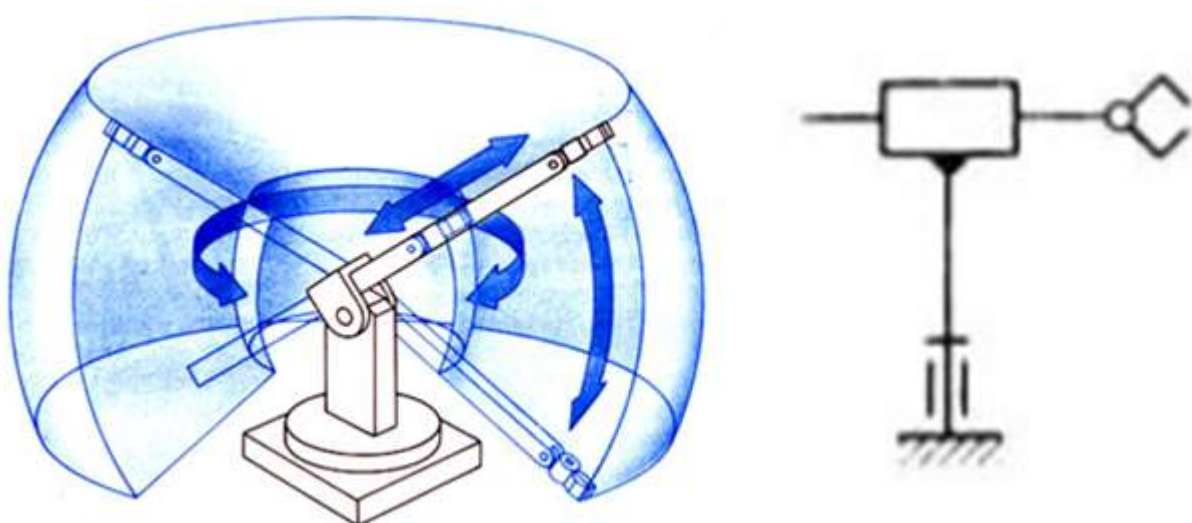
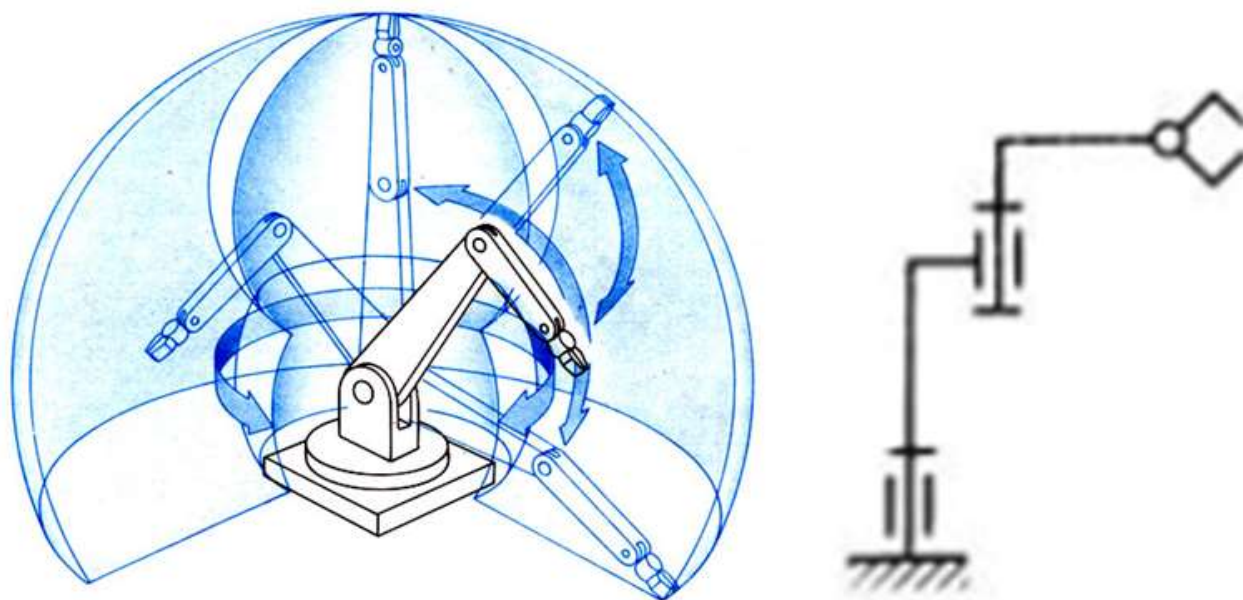


Рис. 3. Робот, функционирующий в сферической системе координат

### Робот с вращающимися системами координат (ангулярная схема перемещения)

Такие устройства снабжены "плечевыми", "локтевыми" и "кистевыми суставами" (рис. 4), т. е. обладают большим сходством с конечностями человека. Отдельные сегменты манипулятора могут поворачиваться относительно указанных точек сочленения, обеспечивая тем самым его перемещение в различных плоскостях.

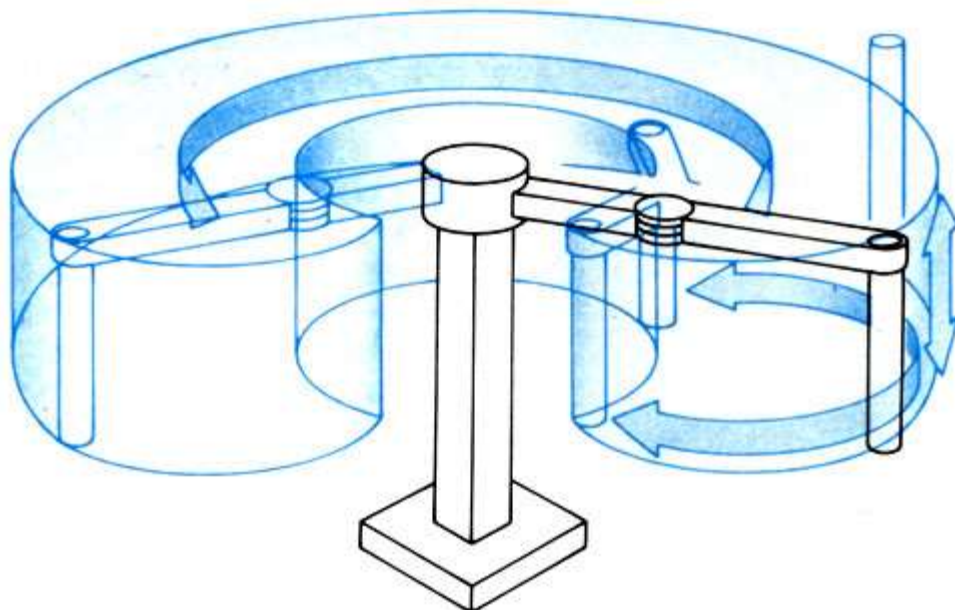


**Рис. 4. Робот с вращающейся (ангулярной) системой координат**

*Манипулятор такого типа очень напоминает руку человека, поскольку имеет плечевое и локтевое сочленения, а также запястный шарнир. Его зона действия значительно больше, чем у роботов других типов; он способен обходить препятствия гораздо более разнообразными путями и даже может многократно складываться.*

### **Системы Scara**

*Scara - сокращение от англ. **Selective Compliance Assembly Robot Arm** (сборочный робот-манипулятор с избирательной приспособляемостью). Все сочленения этих устройств, представляющих собой модифицированный вариант манипуляторов с цилиндрической системой координат, располагаются в горизонтальной плоскости, благодаря чему механизм способен "разворачиваться" подобно складной ширме (рис. 5). Системы Scara разработал Хироси Макино из Университета Яма-наси (Япония).*

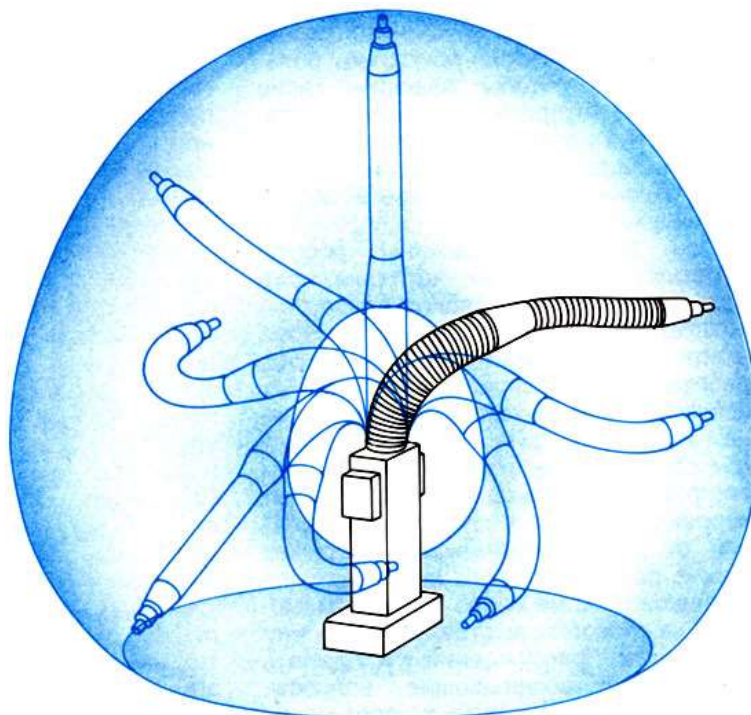


**Рис. 5.** Робот Scara

*Его зона действия имеет цилиндрическую форму. Роботы типа SCARA отличаются высокими быстродействием и точностью; они особенно полезны в таких требующих большой осторожности сборочных работах, как монтаж миниатюрных электронных компонентов*

#### Робот *Spine*

Робот *Spine* сконструирован специалистами фирмы "Спайн роботикс"; в нем используется длинный хоботоподобный манипулятор (рис. 6), состоящий из ряда дисков, которые соединены между собой шлангами гидравлического привода. Такой робот отличается чрезвычайно большой гибкостью.



**Рис. 6.** Робот Spine.



Эта система состоит из основания и манипулятора, который разделен на нижнюю и верхнюю секции, причем эти секции могут двигаться независимо друг от друга. Такой гибкий манипулятор состоит из множества чечевицеобразных дисков из нержавеющей стали, которые соединены между собой двумя парами тросов, обеспечивающих натяжение.

Тросы соединены с поршнями гидравлических цилиндров, которые, создавая натяжение, вызывают перемещения манипулятора. Специальные датчики передают на систему управления информацию о положении манипулятора и его кисти. Обладая значительным радиусом действия и высокой маневренностью, подобный робот способен добираться до таких точек обрабатываемого объекта, которые недоступны обычным установкам; в частности, он может выполнять окраску внутренних частей автомобильного кузова.

### **Запястный шарнир**

*Запястный узел типичного манипулятора (рис. 7) функционирует в так называемой вспомогательной системе координат (степеней свободы). Он обеспечивает приведение - отведение рабочего органа (относительно вертикальной оси), сгибание - разгибание (относительно горизонтальной оси), а также вращение (вокруг продольной оси). Кисть робота сгибается - разгибается гораздо свободнее, чем человеческая, поскольку последняя может поворачиваться только на 180°, после чего рука разжимается, выпуская удерживаемый объект. Рабочий орган робота крепится именно к запястному суставу.*

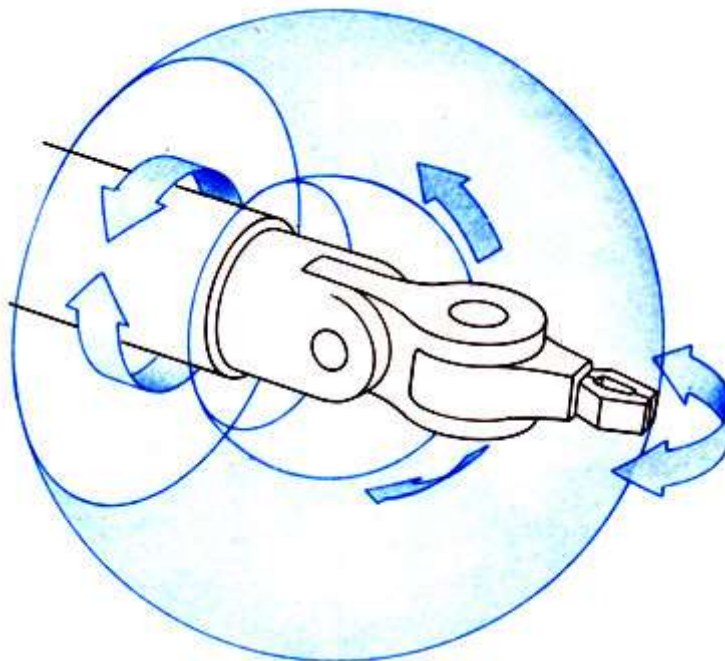


Рис. 7. Запястье манипулятора

### **Степени свободы робота**

Условия связи – это ограничения, препятствующие свободному движению тела.





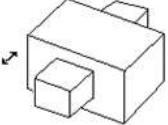
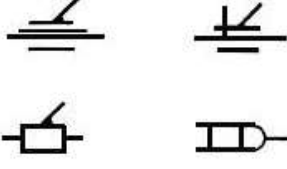
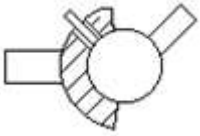

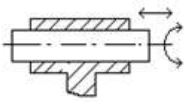

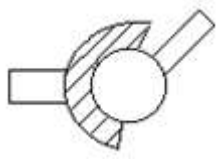

Соединение двух звеньев в кинематическую пару накладывает на относительное движение этих звеньев определенные ограничения, число которых не может быть больше пяти, так как при шести ограничениях кинематическая пара становится жестким соединением.

Класс кинематических пар определяется числом условий связи (количеством отнятых степеней свободы). В таблице 1 представлены наиболее распространенные кинематические пары. При подсчете числа условий связи, т.е. при определении класса кинематической пары, необходимо учитывать только независимые между собой движения. Так, например, в

винтовой кинематической паре одновременно происходит не только вращение гайки относительно винта, но и ее перемещение вдоль оси винта. Эти движения взаимосвязаны, поэтому винтовую кинематическую пару относят к пятому классу.

Таблица 1

Наиболее распространённые типы кинематических пар  
(классификация И. И. Артоболевского)

Название пары	Внешний вид	УГО	Класс	Число условий связи	Число степеней свободы
Винтовая			V	5	1
Вращательная			V	5	1
Поступательная			V	5	1
Сферическая с пальцем			IV	4	2
Цилиндрическая			IV	4	2
Сферическая			III	3	3

В большинстве конструкций промышленных роботов нашли применение кинематические пары V класса – вращательные или поступательные, обеспечивающие одну степень свободы в относительном движении каждого из двух подвижно соединенных звеньев.

Если на движение звена в пространстве не наложено никаких условий связи, то оно обладает, как известно, шестью степенями свободы.

Система звеньев, связанных между собой кинематическими парами называется кинематической цепью. В зависимости от вида движения звеньев кинематические цепи подразделяют на плоские (рис. 8, а, в) - звенья движутся в одной или нескольких параллельных плоскостях, и пространственные (рис. 8, б, г) - звенья движутся в пространстве.



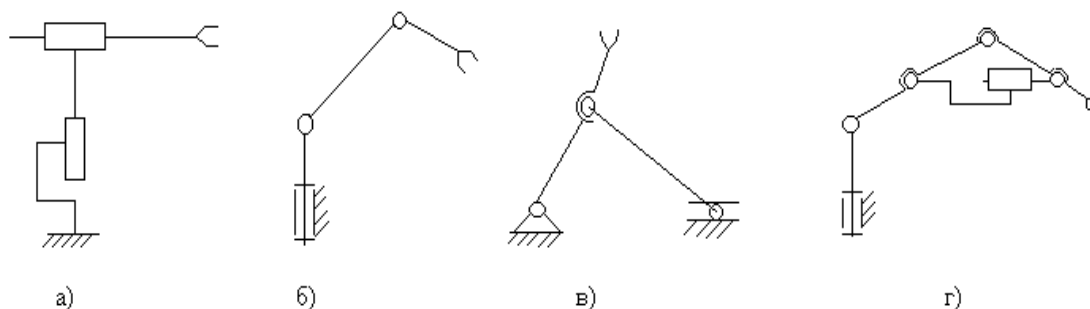


Рис. 8. Примеры кинематических цепей

Кинематические цепи могут быть замкнутыми (рис. 8,в) и незамкнутыми (рис. 8, а, б, г). Кинематические цепи исполнительных механизмов ПР являются в основном незамкнутыми. Существуют незамкнутые кинематические цепи с местными замкнутыми контурами (рис. 8, г).

Звено, принимаемое за неподвижное, называется основанием (стойкой). Звено, которому сообщается движение, преобразуемое исполнительным механизмом в требуемые движения других звеньев, называется входным. Звено, совершающее движение, для выполнения которого предназначен исполнительный механизм, называется выходным (конечным, последним).

Максимальное число входных звеньев равно числу степеней подвижности исполнительного механизма.

Числом степеней подвижности  $W$  кинематической цепи называют число степеней свободы цепи относительно звена, принятого за неподвижное. Число степеней подвижности манипулятора  $n$  определяется по формуле

$$W = 6n - \sum_{i=1}^5 iP_i,$$

где  $n$  – число подвижных звеньев;  $P_i$  – число кинематических пар  $i$ -го класса.

Развёрнутый вид этой же формулы:

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

где  $n = (m - 1)$  – число подвижных звеньев;

$m$  – общее число звеньев;

$p_1, p_2, p_3, p_4, p_5$  – число кинематических пар I, II, III, IV и V класса соответственно.

Для плоских механизмов

$$W_{пл} = 3n - 2p_5 - p_4.$$

Для кинематической цепи манипулятора, образованной только парами V класса, число степеней подвижности робота определяется по формуле:

для пространственного механизма  $W = 6n - 5p_5$ ,

для плоского механизма  $W_{пл} = 3n - 2p_5$ .

В открытых кинематических цепях число подвижных звеньев всегда равно числу пар:

$$n = p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5.$$

В качестве примера определим число степеней свободы манипулятора, кинематическая схема которого показана на рис. 9

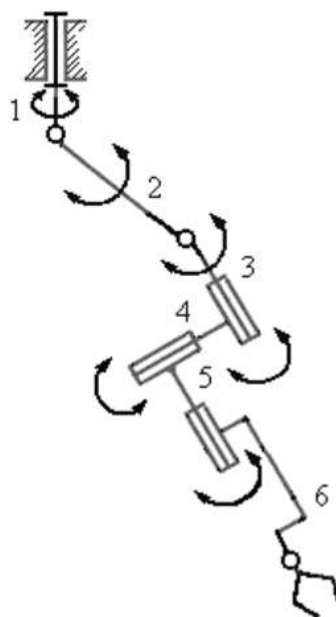


Рис. 9. Кинематическая схема манипулятора: 1 - 6 – подвижные звенья

Цепь содержит 6 подвижных звеньев, входящих в шесть вращательных кинематических пар. Если не учитывать движение губок захвата, то с помощью структурной формулы получим число степеней свободы манипулятора:

$$W = 6n - 5p_5 = 6 \cdot 6 - 5 \cdot 6 = 6.$$

### Сравнение кинематической схемы руки человека и манипулятора робота

Созданный для замены человека промышленный робот, часто сравнивается с ним. Такое сравнение допустимо для роботов, манипулятор которых сравним по кинематике с рукой человека (рис. 10 и 11).

Манипулятор – это управляемое устройство, машина, которая служит для выполнения двигательных функций, аналогичных функциям руки человека, при перемещении груза в пространстве, оснащенная для этого рабочим органом, в том числе захватным устройством.

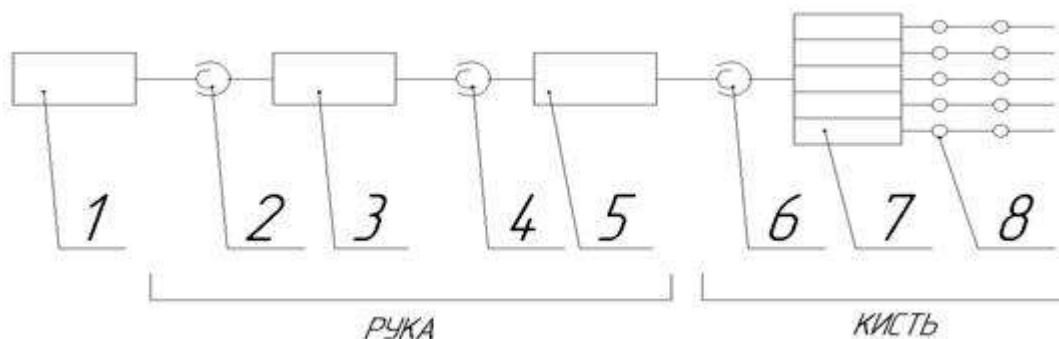


Рис. 10. Кинематическая схема руки человека: 1 - туловище, 2 - плечевой сустав, 3 - плечо, 4 - локтевой сустав, 5 - предплечье, 6 - запястье, 7 – ладонь, 8 - пальцы руки

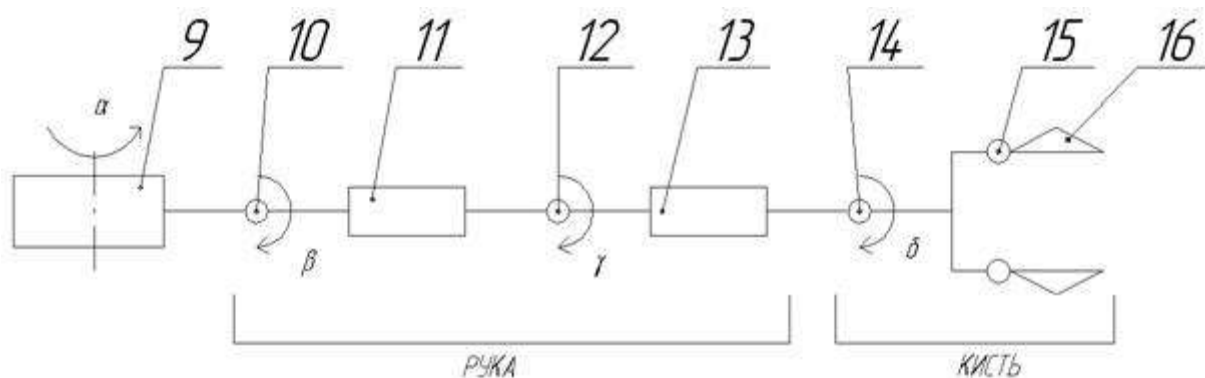


Рис. 11. Кинематическая схема манипулятора: 9 - основание, 10, 12, 14, 15 - шарниры, 11, 13 – предплечье, 16 - пальцы схвата

Механическая система промышленного робота может быть разделена на четыре структурных элемента, отличающихся функциональным назначением и характером выполняемых движений:

- 1) основание (неподвижное звено) – опорная конструкция. Число степеней подвижности основания  $W_o = 0$ ;
- 2) корпус (стойка)  $W_k \geq 0$  (определяется мобильностью промышленного робота);
- 3) механическая рука (манипулятор):  $W_m \geq 1$  (определяется назначением промышленного робота);
- 4) захватное устройство с  $W_z \geq 0$  (в зависимости от способа удержания объекта манипулирования и конструктивного исполнения).

Системы основных координатных перемещений звеньев механической системы манипуляторов и промышленных роботов и соответствующие им примеры структурных кинематических схем в порядке возрастания сложности формы рабочей зоны приведены на рис. 12 - 14.

В прямоугольной системе координат (рис. 12) объект перемещается в заданную точку пространства  $P$  путем прямолинейных перемещений звеньев манипулятора по взаимно перпендикулярным осям: для плоской – по двум (рис. 12, а), для пространственной – по трем (рис. 12, б).

Полярная система координат представлена цилиндрической (рис. 13, а) и сферической системой (рис. 13, б). Цилиндрическая система характеризуется перемещением объекта в направлении радиус-вектора  $r$  и углов  $\gamma$ ,  $\theta$ , а также по оси  $z$ . В сферической системе координат (рис. 13, б) объект перемещается линейно по направлению  $r$  и поворотом на углы  $\theta$  и  $\gamma$  в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

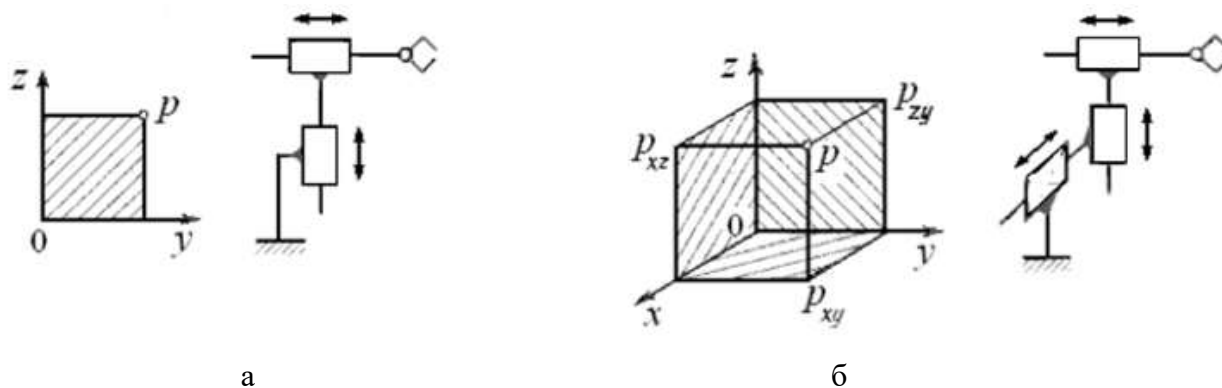


Рис. 12. Прямоугольная система координат: а – плоская, б – пространственная

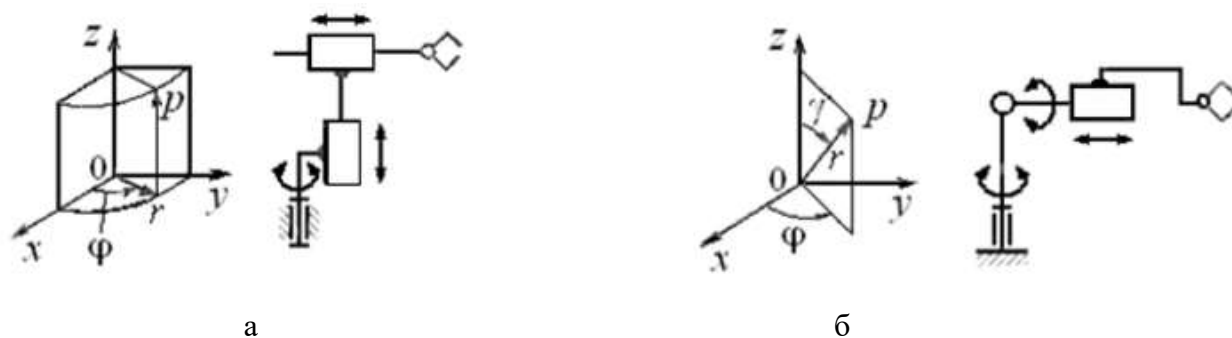


Рис. 13. Полярная система координат: а – цилиндрическая, б – сферическая

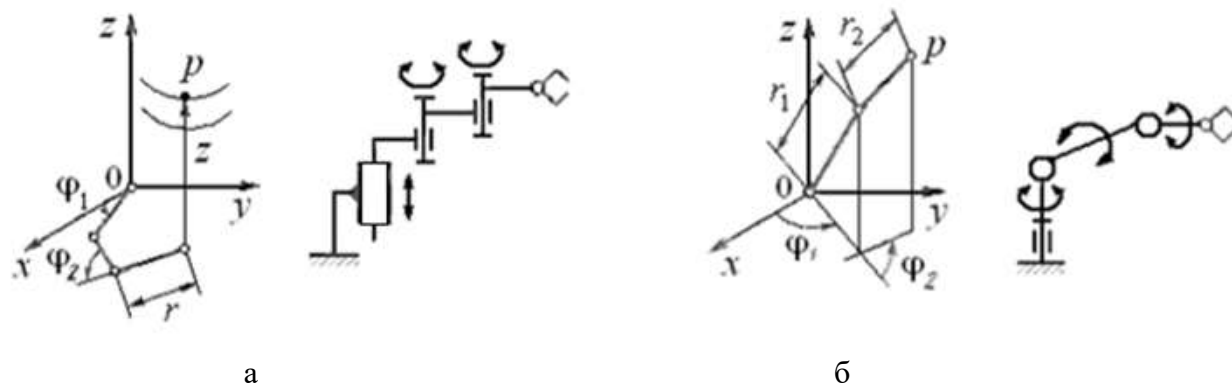


Рис. 14. Ангулярная система координат: а – цилиндрическая, б – сферическая

Цилиндрическая и сферическая системы относятся к криволинейным. Разновидностью криволинейной системы является также ангулярная (угловая) система координат, характерная для движений многосвязных шарнирных рук манипуляторов (рис. 14). В ангулярной плоской системе (на рис. 14, а она не показана) объект перемещается в координатной плоскости благодаря относительным поворотам звеньев руки, имеющих постоянную длину. Ангулярная цилиндрическая система характеризуется дополнительным смещением относительно основной координатной плоскости в направлении оси  $z$ . В ангулярной сферической системе (рис. 14, б) перемещение объекта в пространстве происходит только за счет относительных угловых поворотов звеньев руки, при этом хотя бы одно звено имеет возможность поворота на углы  $\theta$  и  $\gamma$  в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Звенья манипулятора соединяются друг с другом с помощью кинематических пар пятого порядка, вращательных и поступательных. Каждое звено имеет свое наименование. Так, с неподвижным основанием связана колонна, с колонной связана каретка, с кареткой – рука, с рукой – кисть, с кистью – захват (рис. 15).

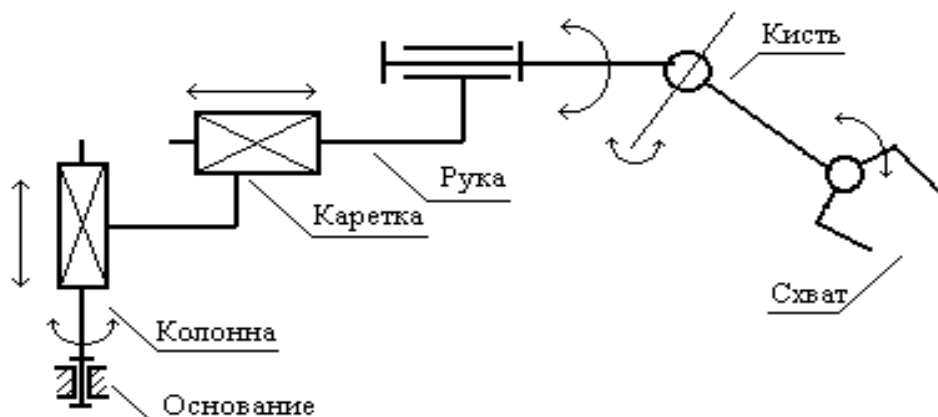


Рис. 15. Кинематика манипулятора промышленного робота

Эти звенья образуют друг с другом кинематические пары V класса, имеющие по одной степени подвижности. Каждая кинематическая пара получает движение от управляемого привода.

Исполнительный механизм промышленного робота в процессе функционирования может иметь различную структуру. Во время движения в пространстве его можно рассматривать как незамкнутую кинематическую цепь. При выполнении технологической операции на движение исполнительного механизма накладываются дополнительные связи и он превращается в замкнутый механизм.

Манипулятор, изображенный на рис. 15, содержит 5 подвижных звеньев (исключая неподвижное основание и внутреннее подвижное звено в захвате), образующих 5 кинематических пар 5-го класса. Поэтому

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

**Объектом манипулирования** называют тело, перемещаемое в пространстве манипулятором. К объектам манипулирования относят заготовки, детали, вспомогательный, мерительный или обрабатывающий инструмент, технологическую оснастку и т.п.

**Рабочий орган** – составная часть исполнительного устройства промышленного робота для непосредственного выполнения технологических операций и/или вспомогательных переходов.

### Классификация кинематических схем манипулятора

Число степеней подвижности и каждое движение робота обеспечивается соответствующей кинематической схемой его механизмов. Кинематические схемы роботов имеют определенные структуры кинематики рук и кисти, которые зависят от вида и последовательности расположения вращательных (В) и поступательных (П) кинематических пар. Разработана классификация кинематических структурных схем руки и манипуляторов, состоящая из пар:

- 1 – ВВВ, трех вращательных;
- 2 – ВВП, двух вращательных и одной поступательной;
- 3 – ПВП, ВПП, ППВ, двух поступательных и одной вращательной;
- 4 – ППП – трех поступательных.

Форма рабочей зоны и возможности манипулирования объектом также определяют кинематическую структурную схему кисти манипулятора (жесткая, В, ВВ, ВВВ).

Характер переносных степеней подвижности (поступательных и вращательных) определяет базовую систему координат манипулятора.

Если поступательных переносных степеней подвижности три ( $\Pi=3$ ), а вращательных вообще нет ( $V=0$ ), то базовая система координат является прямоугольной, а рабочая зона имеет форму параллелепипеда (рис. 16).

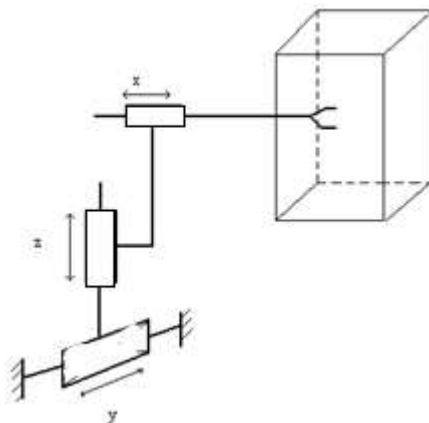


Рис. 16. Прямоугольная система координат.

Несмотря на простоту конструкции, промышленные роботы с такой системой координат встречаются довольно редко, т.к. имеют большие габариты при малом объеме рабочей зоны и характеризуются сравнительно невысоким быстродействием. Такие роботы обычно либо подвешиваются над обслуживаемым технологическим оборудованием, либо монтируются на направляющих каретках под ним.

В том случае, когда  $\Pi=2$ ,  $V=1$ , рабочая зона ПР приобретает форму неполного цилиндра (рис. 17).

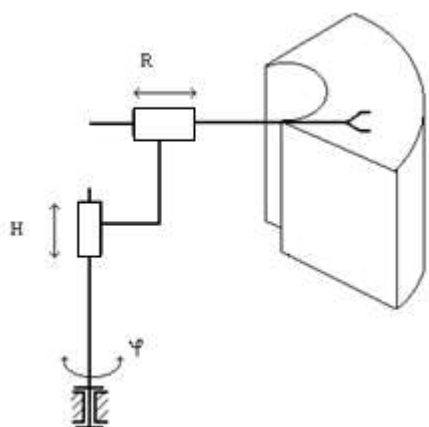


Рис. 17. Цилиндрическая система координат.

Соответствующая этому случаю базовая система координат  $R$ ,  $H$ ,  $\varphi$  удобна и получила большое распространение. Она обеспечивает обслуживание большого объема рабочей зоны, но имеет недостаток, связанный с трудностью организации манипулирования предметами на малой высоте.

Если  $\Pi=1$ ,  $V=2$ , то рабочая зона представляет собой неполный шар, а базовая система координат  $R$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$  является сферической. Это наиболее универсальная система координат.

нат (рис. 18). Она обеспечивает обслуживание большего объема рабочей зоны, чем при прямоугольной и цилиндрической системах координат. Однако конструкция манипулятора в этом случае получается более сложной.

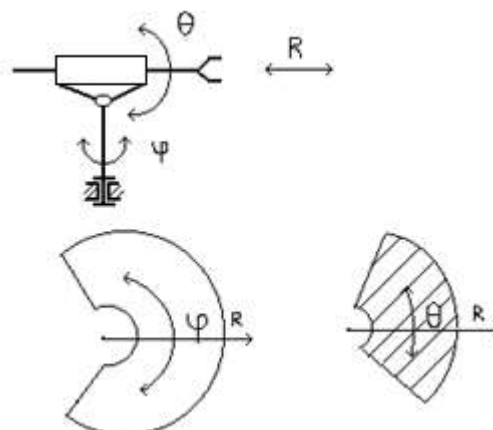


Рис. 18. Сферическая система координат.

При  $\Pi=0$ ,  $V=3$  получают ангулярную (угловую) базовую систему координат  $\gamma$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$  (рис. 19).

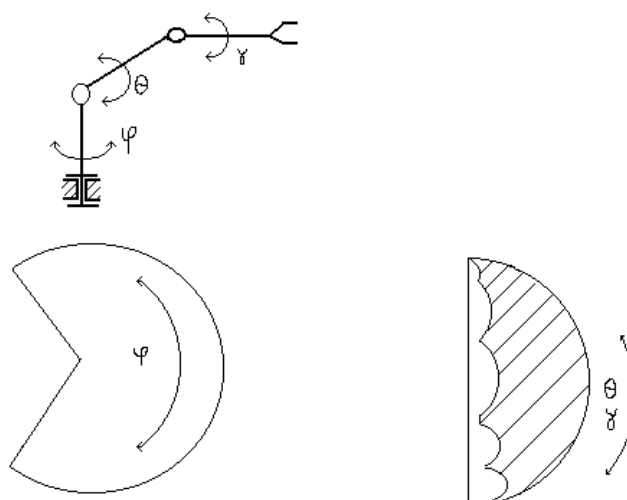


Рис. 19. Ангулярная система координат.

Такая система координат наиболее универсальна, обеспечивает обслуживание наибольшего объема рабочей зоны и позволяет строить промышленные роботы, обладающие максимальной антропоморфностью. Однако конструкция манипулятора очень сложна, громоздка и предполагает сложную систему управления. Недостатком является также то, что жесткость манипулятора в ней понижена, из-за чего возникают трудности обеспечения необходимой точности позиционирования.

Прямоугольная система координат реализуется тремя поступательными кинематическими парами, цилиндрическая – двумя поступательными и одной вращательной, сферическая – двумя вращательными и одной поступательной, угловая – тремя вращательными.

Анализ кинематических схем манипуляторов показывает две основные особенности:

- оси кинематических пар расположены параллельно либо перпендикулярно друг другу,
- звенья соединены в последовательную кинематическую цепь.

Вместе с тем они имеют ряд существенных недостатков:



- низкий показатель грузоподъемность/масса манипулятора, что обусловлено последовательной схемой соединения звеньев. Действительно, каждый привод должен перемещать не только полезную нагрузку, но и все последующие по цепи звенья.

- погрешности в перемещениях всех шарниров суммируются на концевой точке манипулятора, что приводит к низкой точности позиционирования манипуляторов по сравнению с машинами с декартовой компоновкой,

- относительно низкая жесткость манипуляционных роботов, так как упругое отклонение рабочего органа есть результат накопления деформаций по цепи по всем степеням подвижности робота. Причем весовые коэффициенты этой суммы пропорциональны расстояниям от концевой точки до осей соответствующих шарниров.

### **Библиография**

1. Википедия.
2. Марш П., Александер И., Барнетт П., Дулинг Д., Гилл К., Мэтьюз П., Моравек Г. Не счастье у робота профессий \\\Перевод с англ. Кузьмина Ю.А. Под редакцией д-ра мед. наук, проф. Гурфинкеля В.С. - Москва: Мир, 1987 - 182 с.
3. Некоторые разновидности роботов [Электронный ресурс] <http://helpiks.org/9-34656.html>
4. ГОСТ 30097-93. Роботы промышленные. Системы координат и направления движений.