

# Тема: Основы робототехники

1. Основные термины и определения
2. Принципы построения манипуляционных роботов
3. Критерии качества манипуляторов
4. Критерии качества систем управления роботов

# 1. Основные термины и определения

- **Робот** – универсальное средство автоматизации, которое можно быстро (гибко) перепрограммировать на выполнение новой работы.
- **Робототехника** – область науки и техники, связанная с разработкой и реализацией роботов и роботехнологических комплексов на их основе.

- **Манипулятор** – кинематическая цепь из “ $n$ ” элементов (звеньев) шарнирно связанных между собой попарно в суставах (сочленениях) так, что первое звено (стойка манипулятора) неподвижна, а последнее - заканчивается рабочим органом (схватом, сварочными клещами, резаком, плазменной горелкой, пульверизатором и др.).
- **Схват манипулятора** – некоторое устройство способное захватывать и удерживать при перемещении объект манипулирования (заготовку, инструмент и т.д.).

- **Рабочий объем манипулятора** – область пространства, в котором возможно захватывание и перемещение объектов манипулирования.
- **Сенсорика робота** – совокупность датчиков информации о внутреннем состоянии робота и состоянии внешней среды, используемая для формирования законов управления.

- **Система управления робота** – это САУ, как правило иерархическая, цифровая, многомерная (по числу звеньев манипулятора  $n$ ), многоконтурная, с переменными параметрами, которые меняются в широком диапазоне в темпе движений схвата в рабочем объеме.
- **Система координат робота** – это система отражающая форму рабочего объема (прямоугольная, цилиндрическая, сферическая)

## 2. Принципы построения

# манипуляционных роботов

Обратимся к классификации

## манипуляционных роботов

Тип	Разновидности
A.I Автоматические	A.I-1 Программные (1-е поколение). A.I-2 Адаптивные (2-е поколение, роботы с оцувствлением). AI-3 Интеллектуальные (3-е поколение, роботы с элементами искусственного интеллекта)
A.II Биотехнические	AII-1 Командные (управление по отдельным степеням подвижности). AII-2 Копирующие (одно- и двустороннего действия). AII-3 Полуавтоматические (управляемые рукояткой с вычислителем).
A.III Интерактивные	AIII-1 Автоматизированные (чередование режимов AI и AII). AIII-2 Супервизорные (автоматические с целеуказательными командами от оператора). AIII-3 Диалоговые (высшие формы взаимодействия с человеком)

# Системы управления роботов отличаются:

- **Исключительной сложностью** по числу и характеру элементов (механических, электронных, биологических);
- **Многорежимностью работы** (отработка траекторий, обучение, позиционирование);
- **Специфическим и весьма сложным объектом управления** - многозвенным манипулятором.

Таким образом, структура системы управления робота, как правило, иерархическая.

В иерархии этой системы выделяют:

- **Исполнительный уровень** (манипулятор, электродвигатели в суставах, редукторы, датчики и т.д.) предназначен **для отработки запланированных траекторий**;
- **Тактический уровень** (микропроцессор, программное и математическое обеспечение и т.д.) предназначен **для “разложения” траектории движения схвата на управляющие сигналы (сплайн-функции) для каждой степени подвижности (для каждого сустава)**;
- **Стратегический уровень** (ЭВМ, МО и ПО и т.д.) **для планирования траектории движения робота.**



# Различают движения робота:

- **Глобальные** (внутрицеховые) для транспортировки заготовок и инструментов между РТК, автоматизированным складом и т.д.;
- **Региональные** (внутри рабочего объема) для переноса объектов;
- **Локальные** (ориентирующие) для ориентации объектов манипулирования.

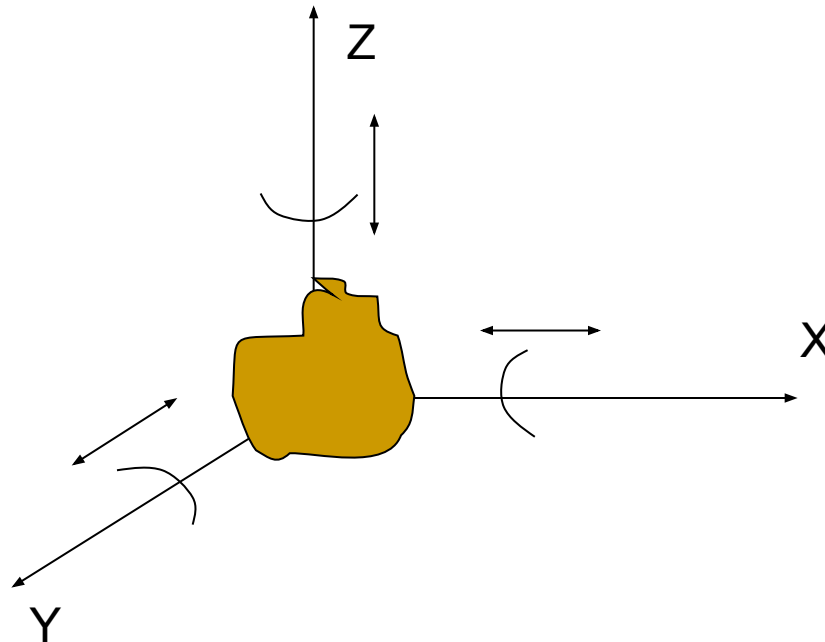
При анализе и синтезе систем управления роботами используют два принципа:

- **Принцип декомпозиции** (разбиения) систем на ряд относительно не зависимых уровней, которые поддаются анализу;
- **Принцип иерархического построения** (усложнения) системы по уровням (исполнительный, тактический, стратегический, высший)

# 3. Критерии качества манипуляторов

## 3.1. Число степеней подвижности манипулятора

Тело, свободное в пространстве имеет шесть степеней подвижности: три поступательных и три вращательных движения относительно трех взаимно-перпендикулярных осей X, Y, Z.



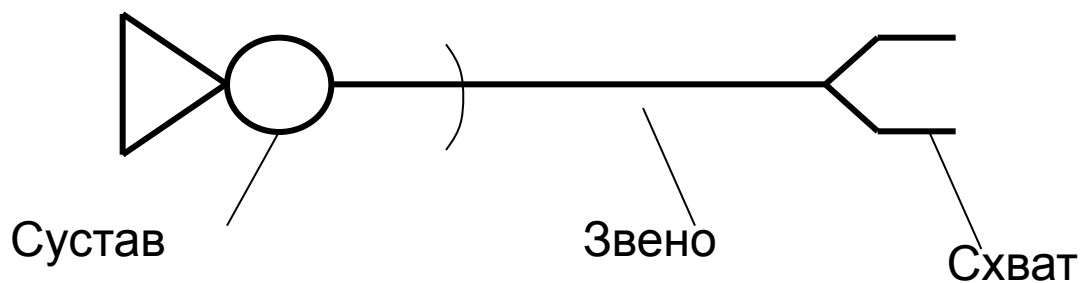
Манипулятор состоит из “ $n$ ” звеньев (тел) шарнирно соединенных в цепь, так что соседние звенья образуют в суставах кинематические пары.

**Класс кинематической пары определяется числом утраченных в суставе степеней подвижности.**

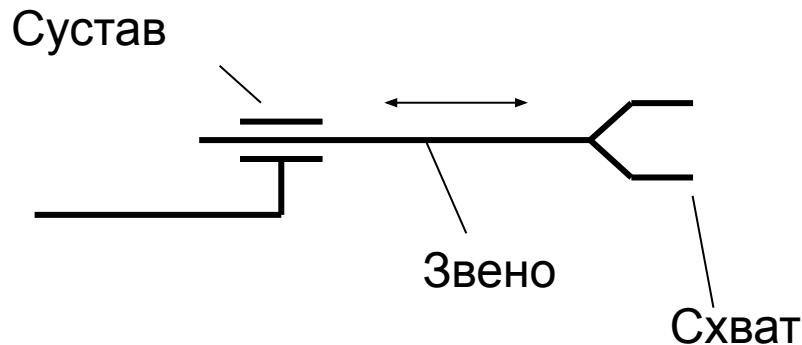
Например, выражение “пара 5-ого класса” означает, что в суставе утрачено пять степеней подвижности, т.е. остается лишь одна степень вращательного или поступательного движения.

# Различают кинематические пары:

- вращательного движения В[п]



- поступательного движения “П”



Число степеней подвижности манипулятора “ $p$ ” определяется по формуле:

$$p = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1 \quad (1)$$

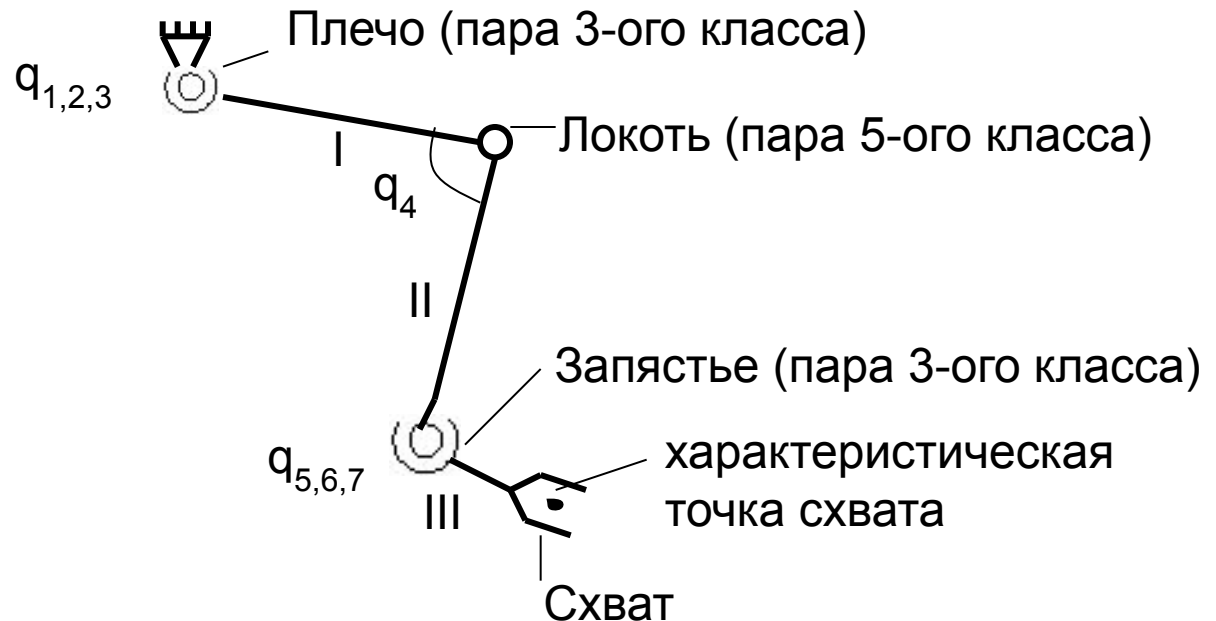
где  $n$  – число звеньев манипулятора;

$p_1, p_2, p_3, p_4$  и  $p_5$  - число сочленений (пар) соответственно первого, второго, третьего, четвертого и пятого классов.

# ПРИМЕР

Пусть манипулятор имеет антропоморфную (человекоподобную) кинематику:

$q_{1,2,3 \dots 7}$  – обобщенные координаты



И так, манипулятор имеет три подвижных звена: I, II и III ( $n=3$ ) одно сочленение пятого класса (в локте) и два – третьего класса (в плече и запястье). Подставляя  $p_5=1$  и  $p_3=2$  в уравнение (1) получим:

$$p = 6 \cdot 3 - 5 \cdot 1 - 3 \cdot 2 = 7$$

т.е. число степеней подвижности данного манипулятора равно 7

Обычно в универсальных манипуляторах  $r=6$  и этого достаточно для произвольной ориентации несимметричных тел в рабочем объеме.

Однако, довольно много моделей роботов имеют  $r < 6$ , что упрощает и удешевляет конструкцию робота.



Рука человека содержит 18 подвижных звеньев, т.к. к трем звеньям обозначенным на рисунке добавляется еще 15 звеньев (по 3 фаланги на 5 пальцах). При этом в кинематической схеме руки имеет место 2 пары 3-го класса (в плече и запястье), 5 пар 4-го класса (в сочленениях пальцев с ладонью) и 11 пар 5-го класса (в локте и между фалангами пальцев).

Число степеней подвижности руки человека равно:

$$p_{\text{руки}} = 6 \cdot 18 - 5 \cdot 11 - 4 \cdot 5 - 3 \cdot 2 = 27 \text{ (!!!)}$$

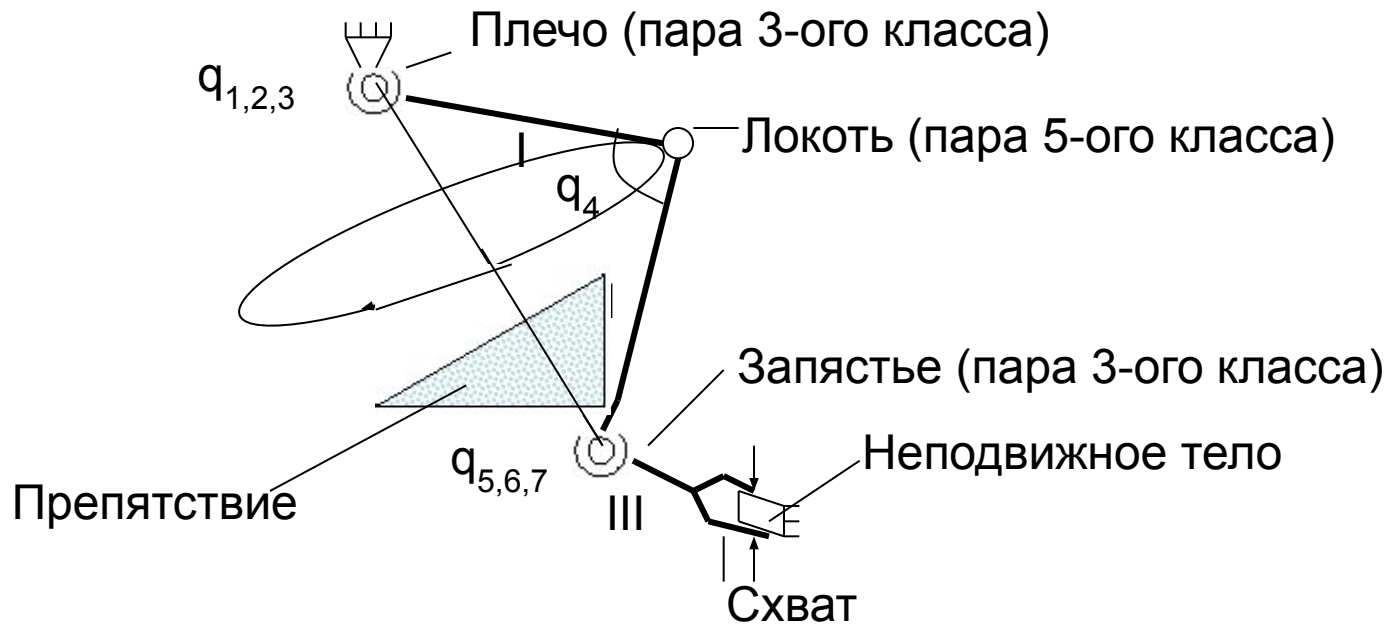
## 3.2 Маневренность манипулятора

Маневренностью “ $m$ ” называется число степеней подвижности манипулятора при закрепленном схвате:

$$m = 6(n - 1) - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1 \quad (2)$$

В соответствии с (2) для рассматриваемого манипулятора имеем:

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



Действительно, при закреплении схвата сохраняется возможность поворачивать локоть вокруг оси, проходящей через плечо и запястье. Маневренность полезна, т.к. позволяет обойти препятствие между плечом и схватом, однако если  $m \neq 0$ , программирование движений резко усложняется.

### 3.3 Удельный рабочий объем манипулятора

Один и тот же **рабочий объем  $V(x)$**  можно получить за счет манипуляторов, имеющих различные собственные габариты.

**Удельный рабочий объем  $V_y(x)$**  - это отношение величины рабочего объема  $V(x)$  к числу пар  $\Pi$  и  $B[\Pi]$ , т.е. к габаритам робота:

$$V_y(x) = \frac{V(x)}{\sum_{i=1}^n \Pi_i + \sum_{j=1}^m B_j[\Pi]} \quad (3)$$

**Минимальное** значение  $V_y(x)$  - в роботах с прямоугольной системой координат,

**максимальное** - со сферической системой,

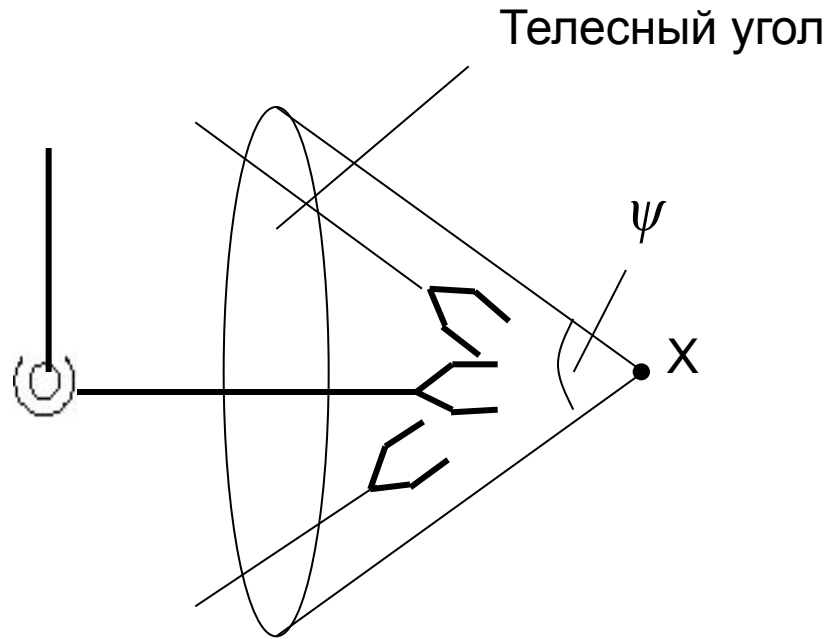
**промежуточное** значение  $V_y(x)$  – в роботах с цилиндрической системой координат.

## 3.4 Сервис манипулятора

Под **углом сервиса манипулятора  $\Psi$**  понимают телесный угол, внутри которого можно подвести рабочий орган к заданной точке  $X$ , а под **коэффициентом сервиса  $C_x$**  понимают отношение этого угла к полному телесному углу, равному  $4\pi$  т.е.:

$$C_x = C(x) = \frac{\Psi}{4\pi}$$

(4)



Коэффициент сервиса  $C_x$  зависит от координат точки “X” рабочего объема и меняется от точки к точке  $0 \leq C_x \leq 1$ .

$C_x = 0$  на границах рабочего объема.

$C_x = 1$  в точках к которым можно подвести схват со всех возможных направлений.

Для **плоского манипулятора, звенья которого находятся в одной плоскости** под сервисом понимают не телесный, а плоский угол, и, следовательно, коэффициент сервиса в этом случае находится как:

$$C_x = \frac{\Psi}{2\pi} \quad (5)$$



Очевидно, что та кинематическая схема качественнее, которая обеспечивает наибольший средний коэффициент сервиса  $K_c$  по рабочему объему  $V(x)$ , т. е. **критерий качества манипулятора по сервису** имеет вид:

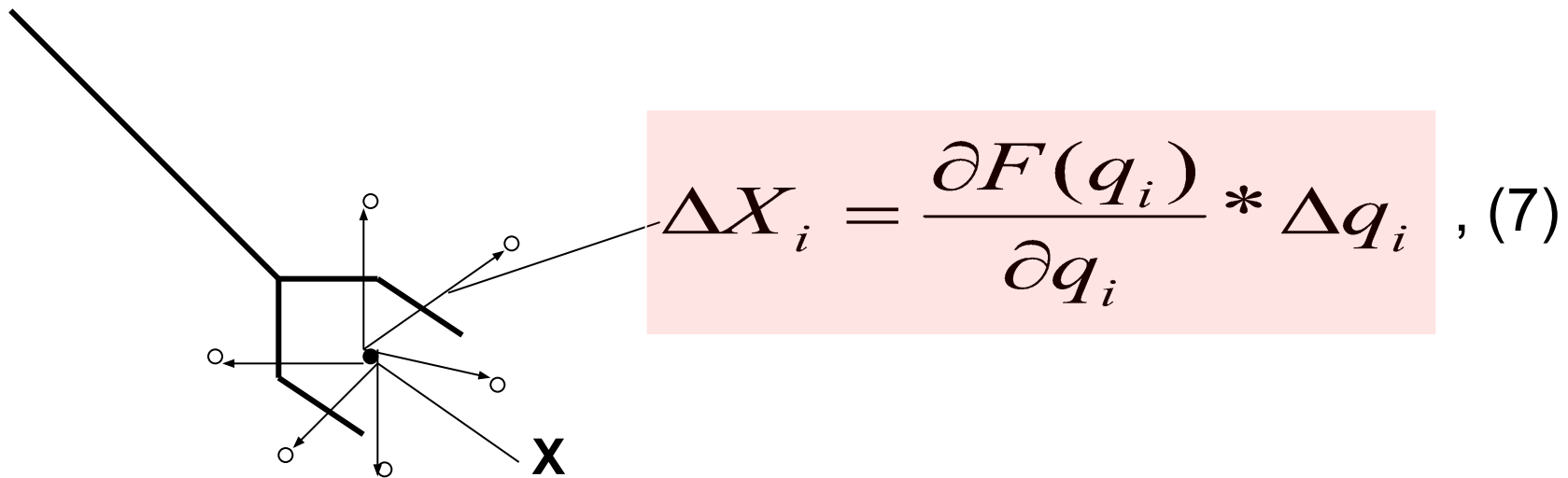
$$K_c = \frac{1}{V(x)} \int_x C(x) dx$$

(6)

Так, в манипуляторе с антропоморфной кинематикой оказалось, что при  $K_c \rightarrow \max$ , при  $L_1 = L_2$  и  $L_3 \rightarrow 0$ , где  $L_1$ ,  $L_2$  и  $L_3$  длины звеньев. Именно так устроена рука человека. Поэтому наиболее совершенные манипуляционные роботы имеют именно такую кинематику: PUMA, PM-01, ТУР-10 и др.

# 3.5 Точность манипулятора

Из-за погрешностей  $\Delta q_i$  в отработке обобщенной координаты  $q_i$  характеристическая точка схвата попадает не в заданную точку  $X$ , а в конец одного из векторов  $\Delta x_i$ .



$F(q_i)$  – **функция положения схвата**, определяющая координаты характеристической точки  $X_i$  через обобщенные координаты  $q_i$ ,  $i=1 \dots n$

Максимум ошибки имеет место в одной из вершин **многогранника ошибок** образованного концами векторов  $\Delta x_i$ . За критерий точности манипулятора  $T_q$  принимается значение этого максимума, т.е.:

$$T_q = \max_{\substack{|\Delta q_i| \leq d_i \\ i=1,2,\dots,n}} |\Delta x_i| \quad (8)$$

**Обобщенным критерием точности** является величина

$$K_T = \frac{1}{V(x)} \int_Q T(q) dq \quad (9)$$

**Максимальную точность** имеют роботы с прямоугольной системой координат (сборочные роботы, роботы для огранки алмазов и т.д.).

**Минимальной точностью** обладают роботы со сферической системой координат (для операций “взять-положить”).

**Среднюю точность** имеют роботы с цилиндрической системой координат.

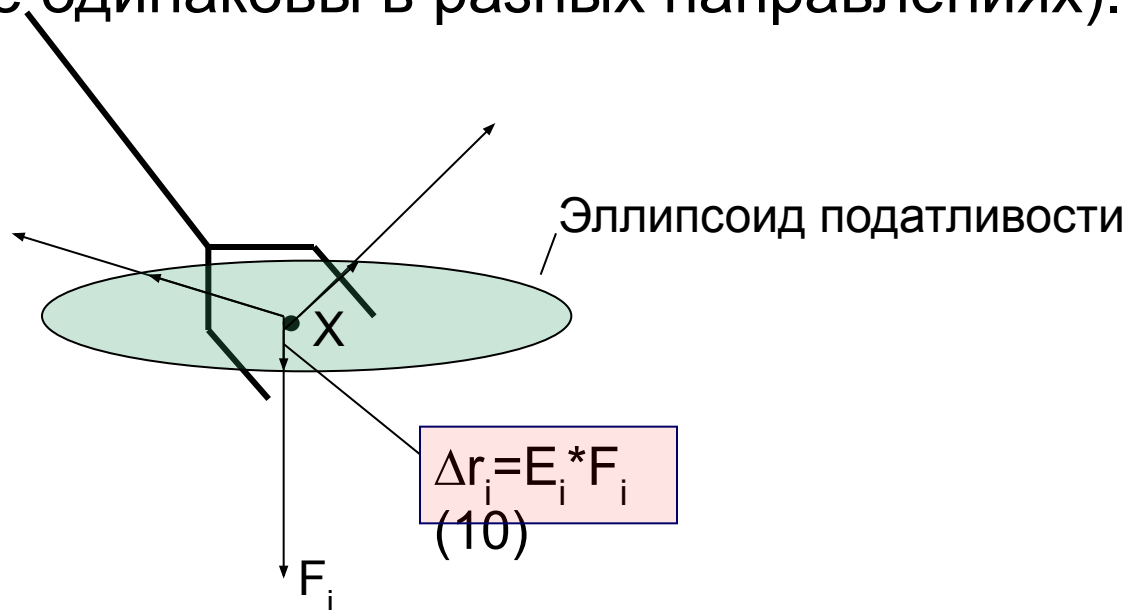
## 3.6 Податливость манипулятора

Подействуем на характеристическую точку схвата  $X$  силой  $F_i$ . Манипулятор обладает упругими свойствами и точка  $X$  сместится в конец вектора:

$$\Delta r_i = E_i * F_i,$$

где  $E_i$  – коэффициент податливости.

Меняя направления силы  $F_i$  вокруг точки  $X$  получим **эллипсоид податливости**, образованный концами векторов  $\Delta r_i$ , т.к. упругие свойства манипулятора **анизотропны** (не одинаковы в разных направлениях).



Податливость  $\Pi(q)$  представляет собой объем эллипсоида податливости:

$$\Pi(q) = \frac{1}{4\pi} \int_{S^2} |E_i F_i| dF \quad (11)$$

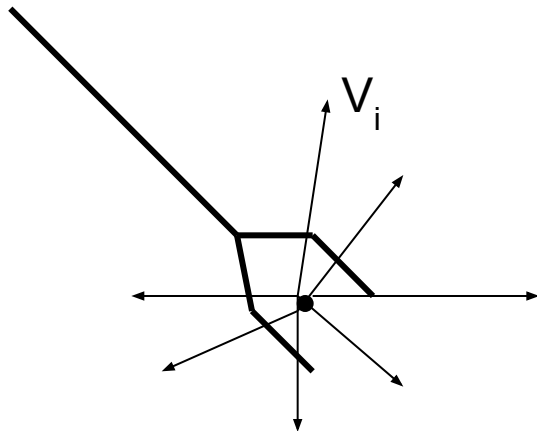
Критерий качества манипулятора по податливости  $K_p$  – это податливость усредненная по всему рабочему объему.

$$K_n = \frac{1}{V(x)} \int_x \Pi(x) dx \quad (12)$$

## 3.7 Мобильность манипулятора

Будем изменять с максимальной скоростью каждую из обобщенных координат манипулятора  $q_i$ . Характеристическая точка  $X$  при этом будет двигаться со скоростями  $V_i$  концы которых образуют некий многогранник.

Мобильностью  $M_q$  называется объем многогранника образованного концами “ежика скоростей”  $V_i$ .



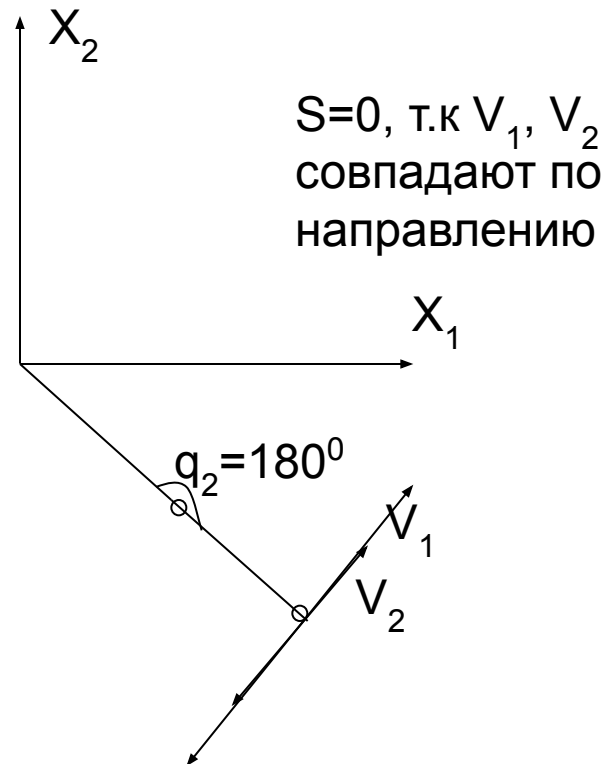
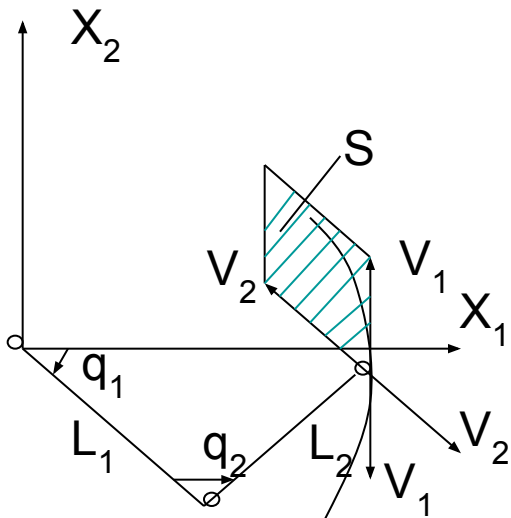


# ПРИМЕР

Рассмотрим плоский двухзвенный манипулятор со звеньями  $L_1$  и  $L_2$  и обобщенными координатами  $q_1$  и  $q_2$ .

**Мобильность в этом случае** – это площадь параллелограмма построенного на векторах скоростей  $V_1$  и  $V_2$  (заштрихована на рисунке).

Можно показать, что максимум мобильности имеет место в том случае если  $q_2=90^0$ .



Мобильность манипулятора характеризует одновременно как скоростные возможности робота, так и многообразие направлений перемещения характеристической точки (поза вратаря, ожидающего штрафной удар).

Усредняя мобильность по всему рабочему объему можно получить **глобальную мобильность** или критерий качества манипулятора по мобильности:

$$K_m = \frac{1}{V(Q)} \int_Q M(q) dq \quad (13)$$

Выражение 13 интегрирование проводится по всему объему  $Q$  пространство обобщенных координат  $q_i$ .

Понятие мобильности весьма полезно использовать при проектировании РТК (располагая манипулятор таким образом, чтобы его мобильность оказалась максимальной). Это позволяет увеличить производительность труда работа при обслуживании некоторого количества единиц оборудования (станок, бункер, накопитель и т.д.).

## 4. Критерии качества систем управления роботов

Эта группа критериев характеризует  
качество работы системы управления  
робота.

## 4.1 Объем движений манипулятора

Предположим схват манипулятора необходимо переместить из начального положения  $x_0 = F(q_0)$  в конечное положение  $x_1 = F(q_1)$ .

**Объемом движения манипулятора** называется величина:

$$D_1 = \sum_{i=1}^n c_i |q_i^1 - q_i^0| \quad (14),$$

где  $c_i$  – некоторые весовые коэффициенты;  
 $q_i$  – обобщенные координаты.

Из всех возможных траекторий движений схвата можно выбрать такую, при которой:

$$D_1 \rightarrow \min \quad (15)$$

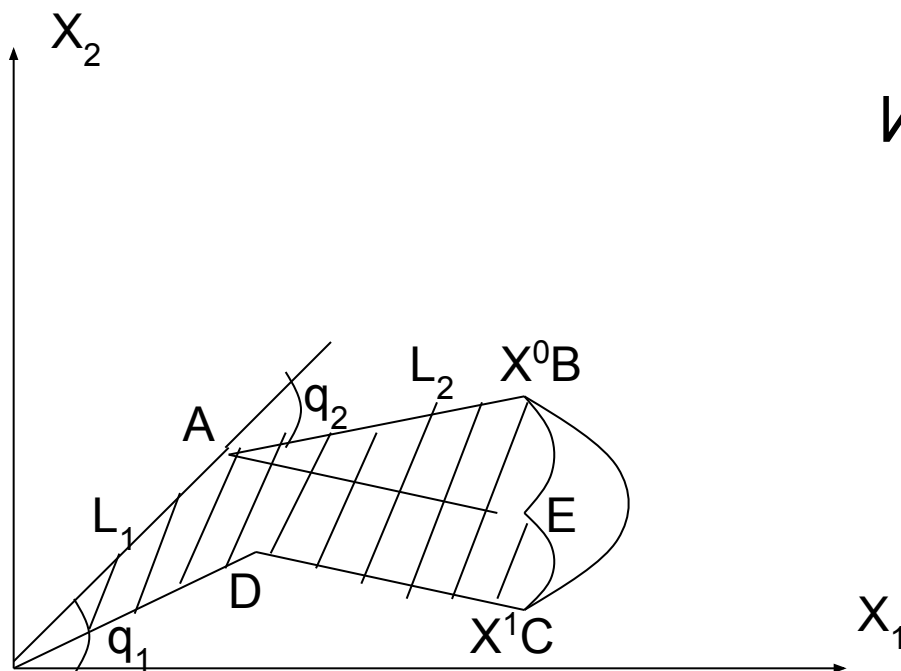
Такая траектория очевидно будет являться оптимальной (наилучшей) по объему движений выполняемых роботом.

## 4.2 “Заметаемая” площадь

При движении манипулятора его звенья вычерчивают (замечывают) в пространстве некоторые поверхности. Можно потребовать при планировании траектории такое движение подвижных звеньев при которых достигается минимум “заметаемой” площади.



# Рассмотрим двухзвенник



Из рисунка видно, что можно найти такие законы изменения  $q_1(t)$  и  $q_2(t)$  при которых “заметаемая” площадь минимальна (заштрихована на рисунке).

Понятие “заметаемой” площади полезно использовать при проектировании РТК в тесных условиях цеха (чтобы манипулятор не сталкивался с другим оборудованием).

## 4.3 Критерий максимального быстродействия

Движение манипулятора заканчиваются тогда, когда движения самого медлительного сустава (караван движется со скоростью самого медленного верблюда – восточная мудрость). Поэтому **за критерий максимального быстродействия выбирают величину:**

$$B_2 = \max_{i=1, \dots, n} \left\{ c_i \frac{|q_i^1 - q_i^0|}{V_i} \right\} \quad (16)$$

где  $V_i$  – скорость обработки обобщенной  $i$ -ой координаты.

Чем меньше величина  $B$ , тем более удачно построена (спланирована) траектория движения схвата.