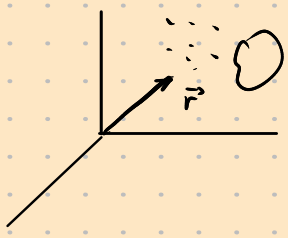
# Равновесие




$\vec{r} = \vec{r}_0 = const$ – для всех т. $\Rightarrow$ система в равновесии в данной с.к.

$\vec{r} = \vec{r}(q)$ для стац. сис-м (связи стационарны)

Полож. равновес. (п.р.) обоб. точки $x_0 = \begin{pmatrix} q_0 \\ 0 \end{pmatrix}$ $\left( x = \begin{pmatrix} q \\ \dot{q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q \\ v \end{pmatrix} \right)$

Если $q_0$ – п.р., в стац. сис-ме $\Leftrightarrow Q(q_0, 0, t) = 0$

Если $Q = -\nabla \Pi$, то в п.р. $\nabla \Pi = 0$.

## Принцип виртуальных перемещений

$\vec{r} = \vec{r}_0$ (набор точек) яв-ся п.р. $\Leftrightarrow \underline{\underline{\forall}} \delta\vec{r}$ из п.р. $\rightarrow \delta A = \int \vec{F} \cdot \delta\vec{r}\, dm = 0$.

## Об условии $Q = 0$

### Пример

$\ddot{x} = \alpha x^\beta$, $\beta \in (0;1)$

$x(0) = 0$, $\dot{x}(0) = 0$

(«Сила» $m\alpha x^\beta$ равна 0 в т. 0. Яв-ся ли т. 0 полож. равновес?)

1. $x = 0$ – реш-е.
2. Рассм. $x = at^\beta \not\equiv 0$

$$a\beta(\beta-1)t^{\beta-2} = \alpha a^\beta t^{\beta\beta}$$

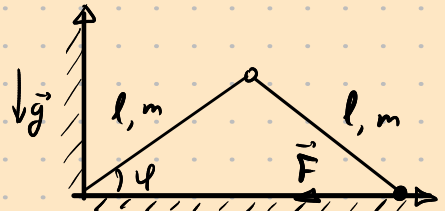
$$\beta - 2 = \beta\beta \Rightarrow \beta = \frac{2}{1-\beta} > 0 \Rightarrow x(0) = 0, \text{ причём } \dot{x}(0) = 0 \text{ тоже.}$$

$$\frac{2(1+\beta)}{(1-\beta)^2} = \alpha a^{\beta-1} \Rightarrow a = \left[\frac{2(1+\beta)}{\alpha(1-\beta)^2}\right]^{\frac{1}{\beta-1}}$$

Как так? 2 реш-я для нач. усл. $x = 0$, $\dot{x} = 0$.

А почему это $\alpha x^\beta$ не удовл. усл. Липшица! Из-за этого т. Коши не работает.

## Задача 1



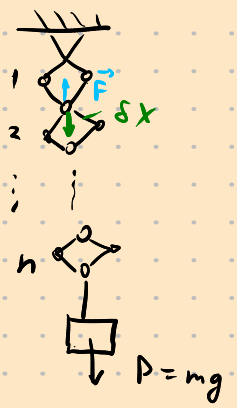

$$\Pi = 2lF\cos\varphi + mgl\sin\varphi$$

$$\Pi_{,\varphi} = mgl\cos\varphi - 2lF\sin\varphi = 0$$

$$F = \frac{mg}{2}\operatorname{ctg}\varphi$$

Чем острее угол, тем меньше нужна сила.

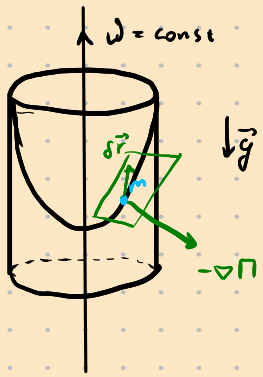
## Задача 2




$$\delta A = nP\delta x - F\delta x = 0$$

$$F = nP$$

## Задача 3




Жидкость во вращ. сосуде.

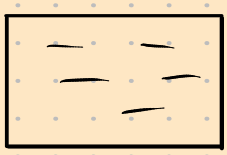
Т. массой $m$ должна нах-ся в равновесии, иначе форма пов-ти бы менялась.

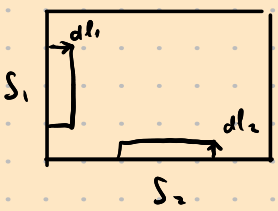
Во вращ. сис-ме отсчёта:

$$\vec{F} = -\nabla\Pi \qquad \Pi = mgz - \frac{m\omega^2}{2}(x^2+y^2)$$

$$\delta A = -\nabla\Pi\,\delta\vec{r} = 0 = -d\Pi \Rightarrow \Pi = const \Rightarrow z = \frac{\omega^2}{2g}(x^2+y^2) + C$$

## Задача 4






Несжим. жидкость.

Д-ть, что давл. жидк-ти равномерно

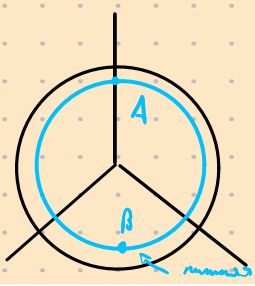
$$\begin{cases} \delta A = P_1 S_1 dl_1 + P_2 S_2 dl_2 = 0 \\ S_1 dl_1 + S_2 dl_2 = 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow dl_2 = -\frac{S_1}{S_2} dl_1 \Rightarrow \delta A = (P_1 - P_2)\, dl_1 = 0 \Rightarrow P_1 = P_2$$

## Задача 5

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = 1 \\ x + y + z = 1 \end{cases}$$

— мат. т. движется по кривой в поле тяжести



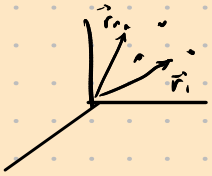

Найти полож. равновесия

1. Из принципа вирт. перемещ. – т. A и B, т.к. $\delta\vec{r} \perp m\vec{g}$

Формальное решение:

– Если связь задана в виде $F(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_n, t) = 0$, то $f_{i,\vec{r}_k} \cdot \delta\vec{r}^{\,k} = 0$

! это градиент !



$$\begin{cases} 2x\,\delta x + 2y\,\delta y + 2z\,\delta z = 0 \\ \delta x + \delta y + \delta z = 0 \\ x^2 + y^2 + z^2 - 1 = 0 \\ x + y + z - 1 = 0 \end{cases}$$

Из принципа вирт. перемещ. $\delta A = mg\,\delta z \Rightarrow \delta z = 0$

$$\begin{cases} x\,\delta x + y\,\delta y = 0 \\ \delta x + \delta y = 0 \end{cases} \Rightarrow \delta y = -\delta x, \quad x - y = 0 \Rightarrow x = y$$

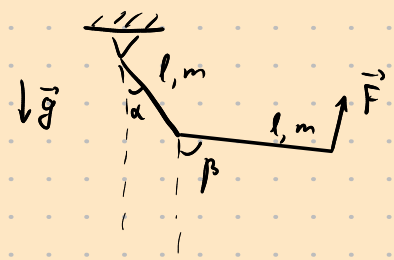
$$\begin{cases} 2x^2 + z^2 = 1 \\ z = 1 - 2x \end{cases}$$

$$2x^2 + 1 - 4x + 4x^2 = 1$$

$$\left[\begin{array}{l} x = 0 \\ x = \frac{2}{3} \end{array}\right. \Rightarrow \left[\begin{array}{l} y = 0 \\ y = \frac{2}{3} \end{array}\right. \Rightarrow \left[\begin{array}{l} z = 1 \\ z = -\frac{1}{3} \end{array}\right.$$

2. Поиск условного экстремума потенциальной энергии при уст. этих связей

## Задача 6




$F = \text{const}$

Найти п. р.

$$\begin{cases} Q_\alpha = -\Pi^g_{,\alpha} + Q^F_\alpha = 0 \\ Q_\beta = -\Pi^g_{,\beta} + Q^F_\beta = 0 \end{cases}$$

$$\Pi = -\frac{3}{2} mgl\cos\alpha - \frac{1}{2} mgl\cos\beta$$

$$Q^F_\beta = Fl \qquad Q^F_\alpha = Fl\cos(\alpha - \beta)$$

$$\begin{cases} -\frac{3}{2} mgl\sin\alpha + Fl\cos(\alpha-\beta) = 0 \\ \frac{1}{2} mgl\sin\beta + Fl = 0 \end{cases}$$

$\sin\beta = \frac{2F}{mg}$ — есть 3 случая: 1. $F > mg/2$ — нет реш.

2. $F = mg/2$ — $\beta = \frac{\pi}{2}$

3. $F < mg/2$ — $\beta_1 = \arcsin\frac{2F}{mg}$, $\beta_2 = \pi - \beta_1$

$$-\frac{3}{2} mg\sin\alpha + F(\cos\alpha\cos\beta + \sin\alpha\sin\beta) = 0$$

$$F\cos\beta + \left(F\sin\beta - \frac{3}{2}mg\right)\operatorname{tg}\alpha = 0$$

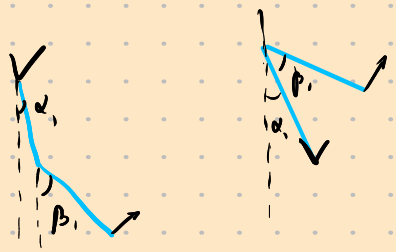
$$\operatorname{tg}\alpha = \underbrace{\frac{F\cos\beta}{\frac{3}{2}mg - F\sin\beta}}_{f(\beta)} \Rightarrow$$

$\alpha_1 = \operatorname{arctg} f(\beta_1)$ } $-\beta_1$

$\alpha_2 = \pi + \alpha_1$

$\alpha_3 = -\alpha_1$ } $-\pi - \beta_1$

$\alpha_4 = \pi - \alpha_1$



## Устойчивость по 1 матрице

$\dot{x} = Ax$, $A = const$

$x = he^{\lambda t} \Rightarrow \det(\lambda E - A) = P(\lambda) = 0 \Rightarrow \lambda_1, \dots, \lambda_n$ – корни

$x = 0$ – ас. уст. $\Leftrightarrow$ $\begin{cases} \mathrm{Re}\ \lambda_i < 0 \\ i = 1, \dots, n \end{cases}$

$P(\lambda) = a_n \lambda^n + \dots + a_1 \lambda + a_0$

Необх. усл. $\operatorname{sign} a_n = \dots = \operatorname{sign} a_0$

$$\Gamma = \begin{pmatrix} a_1 & a_0 & 0 & \dots & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 & a_0 & \dots 0 \\ & & \ddots & & \\ 0 & \dots & & 0 & a_n \end{pmatrix}, \quad a_0 > 0 \text{ в } P(\lambda)$$

Матрица Гурвица

$P(\lambda)$ уст. $\Leftrightarrow$ $\Delta_i > 0 \ \forall i = \overline{1,n}$

## Критерий Рауса – Гурвица в форме Льенара и Шипара

1. Вып. усл-е $a_i > 0$, полином приведём к виду $a_0 > 0$.
2. $\begin{bmatrix} \Delta_{2k} > 0 \\ \Delta_{2k+1} > 0 \end{bmatrix}$ (либо, либо) – проверяется то, что удобнее

3) $P(\lambda) = a_2 \lambda^2 + a_1 \lambda + a_0$. Проверим, что необх. усл. уст. совпадает с критерием:

$P(\lambda) \mapsto \frac{a_2}{a_0} \lambda^2 + \frac{a_1}{a_0} \lambda + 1$

$$\Gamma = \begin{pmatrix} \frac{a_1}{a_0} & 1 \\ 0 & \frac{a_2}{a_0} \end{pmatrix}$$

1. $P. \Gamma.$:

$\frac{a_1}{a_0} > 0$

$\frac{a_1 a_2}{a_0^2} > 0$

$\Rightarrow \operatorname{sign} a_2 = \operatorname{sign} a_1 = \operatorname{sign} a_0$

2. $P. \Gamma.$ в форме Л.–Ш.:

Всё то самое

Линеаризация ур-ий движения мех. сис-м часто приводит к ур-ям вида:

$$A\ddot{q} + B\dot{q} + Cq = 0$$

$A$ — из кин. энергии; $B$ — гироскоп. и диссипат. силы; $C$ — линеаризация консервативных сил

Нормальная форма Коши:

$$\begin{cases} \dot{q} = u \\ \dot{u} = -A^{-1}Cq - A^{-1}Bu \end{cases} \quad (1) \quad \longleftrightarrow \quad \dot{x} = Dx$$

Как искать решения? Как получить $P(\lambda)$?

Покажем, что хар.-ие-е сис-мы (1) ищется след. образом:

$$q = he^{\lambda t} \Rightarrow \det(\lambda^2 A + \lambda B + C) = 0$$

$$D = \begin{pmatrix} 0 & E \\ -A^{-1}C & -A^{-1}B \end{pmatrix} \qquad \det(\lambda E - D) = \begin{vmatrix} \lambda E & -E \\ A^{-1}C & \lambda E + A^{-1}B \end{vmatrix}$$

$$\det(\lambda E - D) = 0 \iff \det\left(F(\lambda E - D)\right) = 0 \quad \forall F,\ \det F \neq 0$$

$$F_1 = \begin{pmatrix} E & 0 \\ 0 & A \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} E & 0 \\ 0 & A \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda E & -E \\ A^{-1}C & \lambda E + A^{-1}B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda E & -E \\ C & \lambda A + B \end{pmatrix}$$

$$F_2 = \begin{pmatrix} C & 0 \\ 0 & E \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} C & 0 \\ 0 & E \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda E & -E \\ C & \lambda A + B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda C & -C \\ C & \lambda A + B \end{pmatrix} \sim$$

$\lambda = 0$ — не рем. е

$$\sim \begin{pmatrix} \lambda C & -C \\ \lambda C & \lambda^2 A + \lambda B \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} \lambda C & -C \\ 0 & \lambda^2 A + \lambda B + C \end{pmatrix}$$

$$\det \begin{pmatrix} \lambda C & -C \\ 0 & \lambda^2 A + \lambda B + C \end{pmatrix} = 0 \iff \det(\lambda^2 A + \lambda B + C) = 0 \quad \text{ЧТД}$$

**Пример**

$$\begin{cases} \ddot{x} + \dot{x} + x - \alpha y = 0 \\ \ddot{y} + \beta\dot{y} - x + y = 0 \end{cases}$$ — исследовать устойчивость н.р. $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \bar{0}$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \beta \end{pmatrix} \qquad C = \begin{pmatrix} 1 & -\alpha \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$P(\lambda) = \begin{vmatrix} \lambda^2 + \lambda + 1 & -\alpha \\ -1 & \lambda^2 + \beta\lambda + 1 \end{vmatrix} = 0$$

$$\lambda^4 + \beta\lambda^3 + \lambda^2 + \lambda^3 + \beta\lambda^2 + \lambda + \lambda^2 + \beta\lambda + 1 - \alpha = 0$$

$$\lambda^4 + (\beta+1)\lambda^3 + (\beta+2)\lambda^2 + (\beta+1)\lambda + (1-\alpha) = 0$$

т.к. $a_4 = 1 > 0$ то все коэф. должны быть $>0$ по необх. усл. $\Rightarrow$

$\Rightarrow$ приведение делать не надо, используем кр. Р.-Г. в форме Л.-Ш.

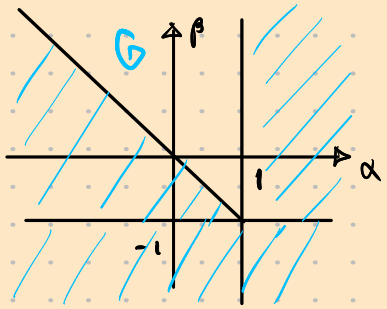
Из необх. усл. $\beta > -1$, $\alpha < 1$.

$$\Gamma = \begin{pmatrix} \beta+1 & 1-\alpha & 0 & 0 \\ \beta+1 & \beta+2 & \beta+1 & \alpha-1 \\ 0 & 1 & \beta+1 & \beta+2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$\Delta_1$ $\Delta_3$

$$\Delta_1 = \beta+1 > 0 \qquad \Delta_3 = \begin{vmatrix} \beta+1 & 1-\alpha & 0 \\ 0 & \alpha+\beta+1 & \beta+1 \\ 0 & 1 & \beta+1 \end{vmatrix} =$$

$$= (\beta+1)^2(\alpha+\beta) > 0 \Rightarrow \beta > -\alpha$$



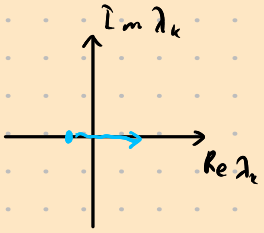

G – область устойчивости

Поведение корней на $\partial G$:

1. $\alpha = 1$

$$P(\lambda) = \lambda\,[\underbrace{\lambda^3 + \ldots + \beta + 1}_{\text{уст. полином (можно показать)}}]$$

Появился корень $\lambda_k = 0$

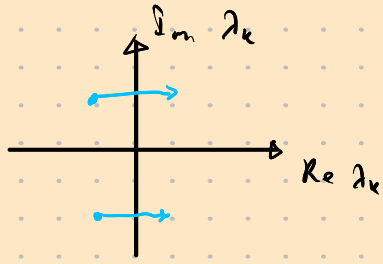



„жесткая потеря уст."

2. $\beta = -\alpha$

$$P(\lambda) = \lambda^4 + (\beta+1)\lambda^3 + (\beta+2)\lambda^2 + (\beta+1)\lambda + 1 + \beta$$

$\pm i$ – корень (можно показать)




„мягкая потеря уст."

## Первый метод Ляпунова

$\dot{x} = X(x)$, $X(0) = 0$ – автономная СДУ (нелинейная)

$X(x)$ – непр. дифф. в т. $x=0$, а $X_{,ij}$ – $\exists$ и огр. в окр-ти н.р.

Тогда эту сис-му можно линеаризовать: $\dot{x} = Ax + f(x)$

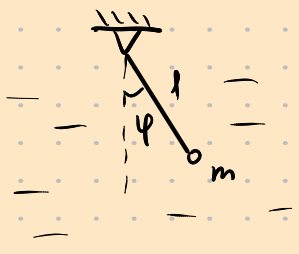
$A = X^i_{,j}(0)$ $\quad \|f\| \le a\|x\|^2$ (разл. в ряд Тейлора)

## Теорема Ляпунова об устойчивости по линейным приближениям.

Если в сис-ме $\dot{x} = Ax$ $\operatorname{Re}\lambda_i < 0$ $\forall i = \overline{1,n}$, $\lambda_i$ – корни $P(\lambda)$ (хар. многочлен), то п.р. $x = 0$ – ас. уст. и в линеаризованной, и в исходной сис-ах.

Если $\exists \lambda_i$ : $\operatorname{Re}\lambda_i > 0$, то п.р. неуст. в обеих сис-ах.

### Пример




$$ml^2\ddot{\varphi} + \beta l\dot{\varphi} + mgl\sin\varphi = 0$$

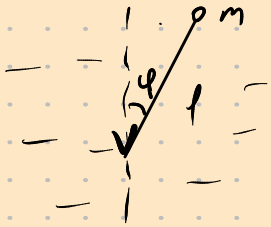
Исследовать п.р. $\varphi = 0$ на устойчивость

Линейное прибл.: $ml^2\ddot{\varphi} + \beta l\dot{\varphi} + mgl\varphi = 0$

$$\underset{\substack{\vee\\0}}{ml^2}\lambda^2 + \underset{\substack{\vee\\0}}{\beta l}\lambda + \underset{\substack{\vee\\0}}{mgl} = 0 \quad \text{– полином}$$

$\Rightarrow$ устойчив $\Rightarrow$

$\Rightarrow$ п.р. $\varphi = 0$ – ас. уст. по т. Ляпунова.




$$ml^2\ddot{\varphi} + \beta l\dot{\varphi} - mgl\sin\varphi = 0$$

$\downarrow$ лин.

$$ml^2\ddot{\varphi} + \beta l\dot{\varphi} - mgl\varphi = 0$$

$\varphi = 0$ – неуст. по т. Ляпунова.

## Второй (прямой) метод Ляпунова

$\dot{x} = X(x)$, $X(0) = 0$ – автоном. СДУ

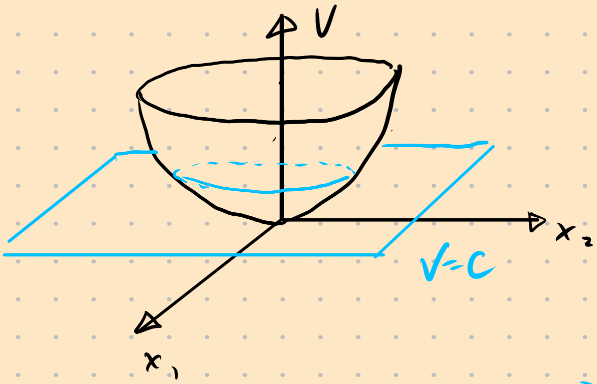
$V(x)$, $V(0) = 0$ – ф-ия Ляпунова (скалярная). $V(x)$ непр. дифф.

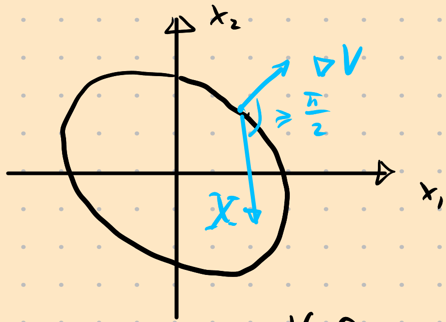
Производная в силу сис-мы: $\dot{V}_x = \nabla V \cdot X = V_{,i} X^i$.

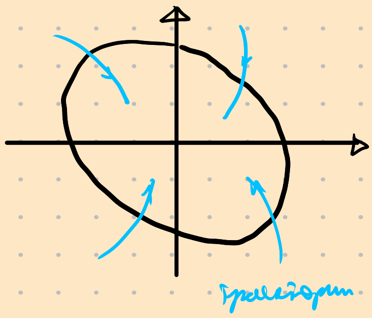
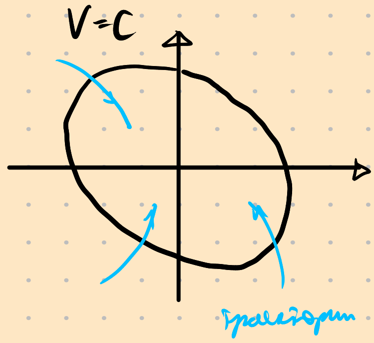
### Теорема Ляпунова

Если в окр-ти п.р. $U_\varepsilon(0)$ $\exists V(x)$ : $V(x)$ имеет в $x = 0$ строгий min, а $\dot{V}_x \leq 0$ в $U_\varepsilon(0)$ $\Rightarrow$ п.р. $x = 0$ – устойчиво.

Когда есть мнимые корни хар. многочлена, то в лин. сис-ме появляются период. реш-я с sin и cos => в исходной (с тонкой добавкой) они могут стать как уст., так и неуст. Эта т. решает проблему.




$V = C = const$