

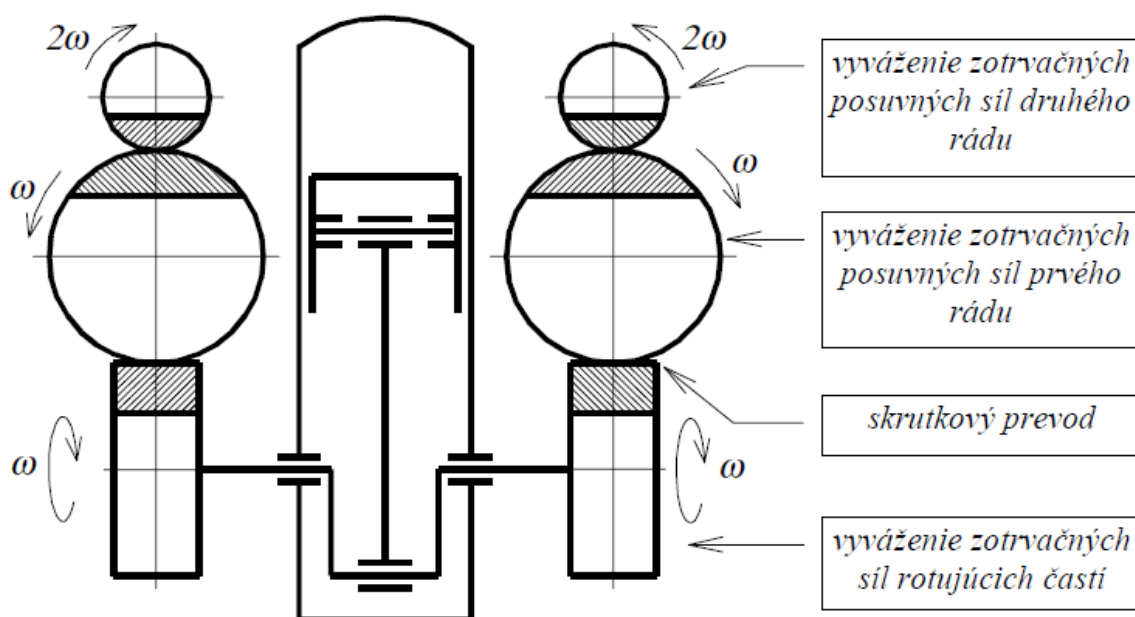
Vyvažovanie kľukového mechanizmu

V kľukovom mechanizme je potrebné vyvažovať zotrvačné sily, momenty od zotrvačných síl a nevyváženosť od rotačných zotrvačných síl.

Zotrvačná sila 1. rádu.

Zotrvačná sila 2. rádu.

Zotrvačná sila rotujúcich častí.



Cieľ vyváženia: zmenšiť prípadne odstrániť účinky zotrvačných síl a ich momentov, ktoré sa prejavujú kmitaním, hlučnosťou, únavou a pod.

Vyváženie je možné:

- vhodným usporiadaním kľukového mechanizmu,
- odstredivé sily je možné vyvažovať protizávažiami,
- zotrvačné sily je možné vyvažovať pomocou vyvažovacích hriadeľov.

Vyvažovanie zotrvačných síl posuvných častí

Vyvažovanie zotrvačných síl I. rádu:

$$F_{zpl} = m_A \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos \alpha$$

$$F_{zpl} = F_{zpl0} \cdot \cos \alpha$$

F_{zpl0} - amplitúda

Cieľom je:

$$F_{zplvysl} = 0$$



$$\sum_{i=1}^n F_{zpli} = 0$$

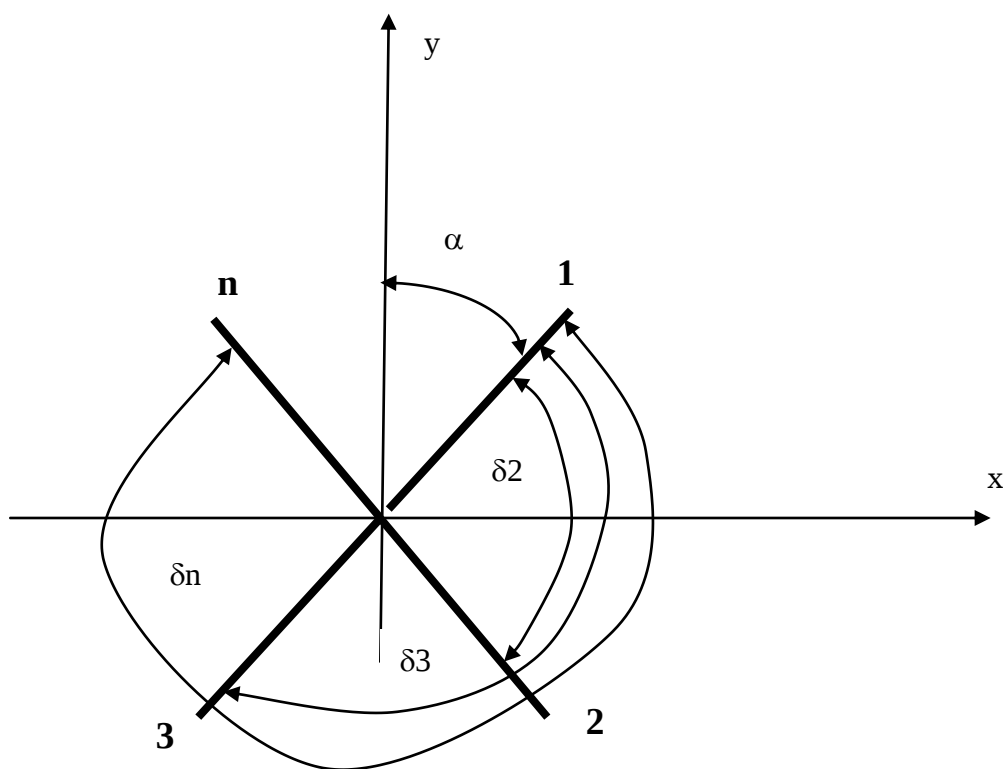
Kde:

i - poradie valca

n - celkový počet zalomení kľukového hriadeľa

α - uhol pootočenia prvého zalomenia

δ_i - nemenné uhly medzi prvým až n-tým zalomením





Rozpísaním síl I. rádu dostaneme tvar:

$$F_{zpI0} \cdot \cos\alpha + F_{zpI0} \cdot \cos(\alpha + \delta_2) + F_{zpI0} \cdot \cos(\alpha + \delta_3) + \dots + F_{zpI0} \cdot \cos(\alpha + \delta_n) = 0$$

substitúcia: $\cos(\alpha + \delta) = \cos\alpha \cdot \cos\delta - \sin\alpha \cdot \sin\delta$

$$F_{zpI0} \cdot [\cos\alpha \cdot (1 + \cos\delta_2 + \cos\delta_3 + \dots + \cos\delta_n) - \sin\alpha \cdot (\sin\delta_2 + \sin\delta_3 + \dots + \sin\delta_n)] = 0$$

pre prirodzené výváženie musí platiť:

$$1 + \cos\delta_2 + \cos\delta_3 + \dots + \cos\delta_n = 0$$
$$\sin\delta_2 + \sin\delta_3 + \dots + \sin\delta_n = 0$$

Vyvážovanie zotrvačných síl II. rádu:

$$F_{zpII} = m_A \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \lambda \cdot \cos 2\alpha$$

$$F_{zpII} = F_{zpII0} \cdot \cos 2\alpha$$

F_{zpII0} - amplitúda

Cieľom je:

$$F_{zpIIvysl} = 0$$
$$\sum_{i=1}^n F_{zpIIi} = 0$$

Rozpísaním síl II. rádu dostaneme tvar:

$$F_{zpII0} \cdot [\cos 2\alpha + \cos 2(\alpha + \delta_2) + \cos 2(\alpha + \delta_3) + \dots + \cos 2(\alpha + \delta_n)] = 0$$

pre prirodzené výváženie musí platiť:

$$1 + \cos 2\delta_2 + \cos 2\delta_3 + \dots + \cos 2\delta_n = 0$$
$$\sin 2\delta_2 + \sin 2\delta_3 + \dots + \sin 2\delta_n = 0$$

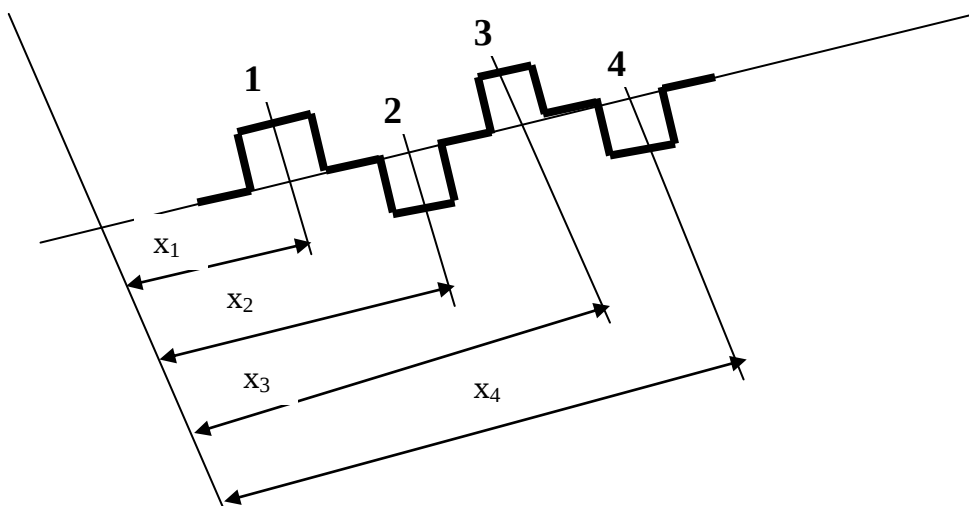
Vyvážovanie zotrvačných síl rotačných hmôt:

Cieľom je:

$$F_{zpIrvysl} = 0$$
$$\sum_{i=1}^n F_{zpIri} = 0$$



Momentové vyvaženie spaľovacieho motora



Vyvažovanie momentov od posuvných zotrvačných síl

$$M_{zp} = m_A \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \{x_1 \cdot [\cos\alpha + \lambda \cdot \cos 2\alpha] + \dots + x_n \cdot [(\cos\alpha + \delta_n) + \lambda \cdot \cos 2(\alpha + \delta_n)]\}$$

Po úprave:

Vyváženie momentov I.rádu:

$$x_1 + x_2 \cdot \cos\delta_2 + x_3 \cdot \cos\delta_3 + \dots + x_n \cdot \cos\delta_n = 0$$
$$x_2 \cdot \sin\delta_2 + x_3 \cdot \sin\delta_3 + \dots + x_n \cdot \sin\delta_n = 0$$

Vyváženie momentov II.rádu:

$$x_1 + x_2 \cdot \cos 2\delta_2 + x_3 \cdot \cos 2\delta_3 + \dots + x_n \cdot \cos 2\delta_n = 0$$
$$x_2 \cdot \sin 2\delta_2 + x_3 \cdot \sin 2\delta_3 + \dots + x_n \cdot \sin 2\delta_n = 0$$

Momenty zotrvačných síl rotujúcich častí po úprave:

$$x_1 + x_2 \cdot \cos\delta_2 + x_3 \cdot \cos\delta_3 + \dots + x_n \cdot \cos\delta_n = 0$$
$$x_2 \cdot \sin\delta_2 + x_3 \cdot \sin\delta_3 + \dots + x_n \cdot \sin\delta_n = 0$$

Výsledný moment od posuvných aj rotačných hmôt:

$$\overline{M_{vysl}} = \overline{M_{zp}} + \overline{M_{zr}}$$

Ak sa výsledný moment nerovná "0", potom je potrebné výsledný moment vyvážovať proti závažím a vyvažovacími hriadeľmi.

Veľkosť vyvažovacieho momentu bude:

$$-\overline{M_{vysl}} = \overline{M_{vyvaž}}$$



Zotrvačníky spaľovacích motorov

Počas pracovného cyklu vo válci dochádza pri prebytku energie k zrýchľovaniu hriadeľa a pri nedostatku energie k jeho spomaľovaniu. Tento rozdiel môžeme vyjadriť stupňom nerovnomernosti chodu.

$$\delta_s = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{\omega_s}$$

resp:

$$\delta_s = \frac{n_{max} - n_{min}}{n_s}$$

kde:

$$\omega_s = \frac{\omega_{max} + \omega_{min}}{2}$$

resp.

$$n_s = \frac{n_{max} + n_{min}}{2}$$

n_{max} , n_{min} - maximálne a minimálne otáčky počas pracovného cyklu!

Zmena energie pri nerovnomernom pohybe:

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} \cdot I \cdot (\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2) = \frac{1}{2} \cdot (I_z + I_o) \cdot (\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2)$$

I_z - hmotný moment zotrvačníka

I_o - hmotný moment ostatných rotujúcich častí

po úprave:

$$(\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2) = \frac{2 \cdot \Delta E_k}{(I_z + I_o)}$$

- nerovnomernosť chodu je možné ovplyvňovať ΔE_k alebo $I_z + I_o$

Snaha je o zníženie hodnoty nerovnomernosti chodu.

Zníženie ΔE_k je možné dosiahnuť zvýšením počtu valcov motora.

Zmena pomocou $I_z + I_o$ znamená zvýšenie hmotného momentu zotrvačnosti motora (väčší zotrvačník) - čo sa nepriaznivo prejavuje na zrýchľovaní hmôt motora.

Odporúčané hodnoty nerovnomernosti chodu motora:

automobilové motory $\delta_s = 1/180$ až $1/300$

letecké motory $\delta_s = 1/1000$



Určenie hmotného momentu zotrvačníka:

$$\begin{aligned}\Delta E_k &= \frac{1}{2} \cdot (I_o + I_z) \cdot (\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2) \\ &= (I_o + I_z) \cdot \frac{(\omega_{max} - \omega_{min}) \cdot (\omega_{max} + \omega_{min})}{2} \\ &= (I_o + I_z) \cdot \delta_s \cdot \omega_s^2\end{aligned}$$

$$I_z = \frac{\Delta E_k}{\delta_s \cdot \omega_s^2} - I_o$$

práca motora:

$$\Delta A = \int (M_k - M_{hn}) \cdot d\alpha$$

M_{hn} - moment odoberaný hnaným strojom

Platí:

$$I_z = \frac{\Delta A}{\delta_s \cdot \omega_s^2} - I_o$$

Ďalšie faktory zohľadňujúce návrh zotrvačníka:

- prechodové javy pri regulácií,
- čas nutný na zastavenie motora,
- tuhosť spojenia motora s hnaným strojom,
- špeciálne úlohy.