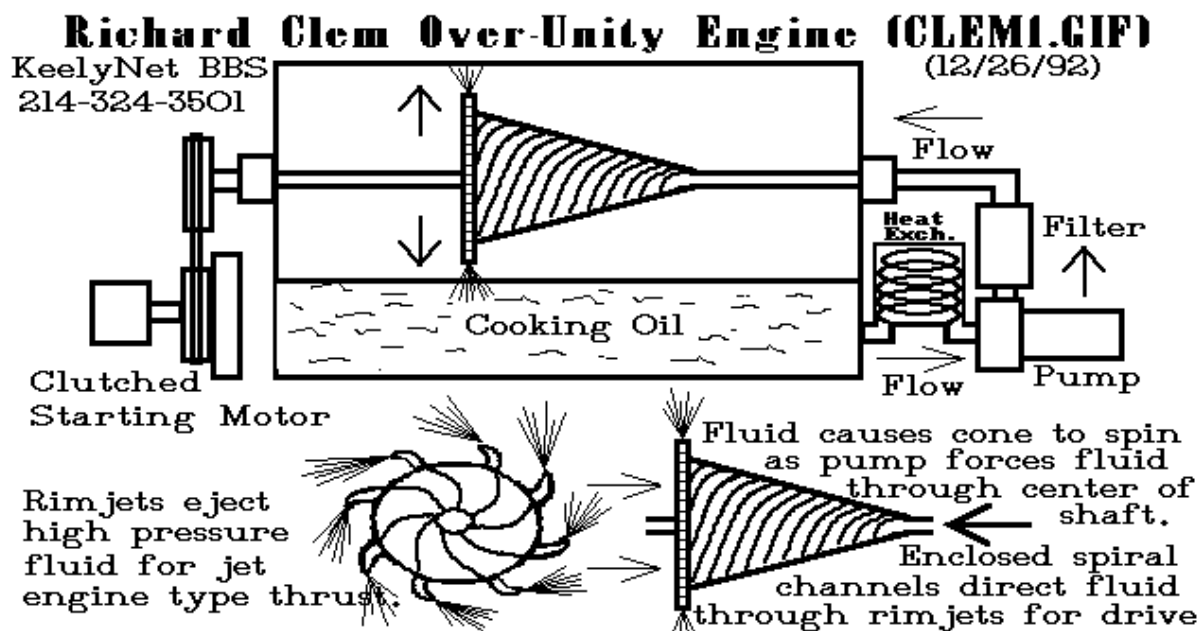


## Proč funguje Clemův motor

### Princip - výpočet - konstrukce

(c) Ing. Ladislav Kopecký, 2004

Tento článek si klade za cíl odhalit podstatu funkce Clemova motoru, provést základní výpočty a navrhnout alternativní konstrukci motoru tak, aby byl snáze výrobitelný a lépe splňoval funkční požadavky.



Princip Clemova motoru (obr. 1) je prostý. Skládá se v podstatě z odstředivého hydromotoru zvláštní konstrukce, čerpadla a spouštěcího elektromotoru. Hřídel hydromotoru je spojen s hřídelem čerpadla (na obrázku není vyznačeno) a výstup čerpadla je přiveden na vstup hydromotoru, takže oba stroje tvoří uzavřený systém s kladnou zpětnou vazbou. Po roztočení soustrojí pomocným pohonem nad kritické otáčky se systém udrží v samočinné rotaci. Tato skutečnost evidentně odporuje zákonu o zachování energie, přesto se dá matematicky a fyzikálně dokázat, že tento stroj v principu může fungovat bez přívodu vnější energie.

Nejdříve provedeme výpočet základních parametrů čerpadla. Pro příklad výpočtu Clemova motoru bylo zvoleno třístupňové odstředivé čerpadlo 32-CVI od firmy Sigma Hranice, které má tyto parametry:

- Průtok  $I = 2,3$  l/s při
- Dopravní výšce  $h = 24$  m
- Příkon  $P_p = 1130$  W
- Jmenovité otáčky  $n = 2900$  ot./min.
- Průměr výstupního potrubí  $D_1 = 32$  mm.

Numerické výpočty jsou od ostatního textu odděleny jednoduchým rámečkem.

Uvažujme ustálené proudění kapaliny o hustotě (měrné hmotnosti)  $\rho$  rychlostí  $v$  v potrubím o průřezu  $S$ . Proudící kapalina je schopná konat práci. Míra této schopnosti představuje výkon daný množstvím vykonané práce za jednotku času. Mechanický výkon obecně je dán působením síly po určité dráze za jednotku času:

$$P = F \frac{dl}{dt} = F \cdot v \quad (1)$$

Sílu  $F$  vypočítáme vynásobením tlaku v potrubí jeho průřezem.

$$F = p \cdot S \quad (2)$$

Rychlost proudění kapaliny v potrubí vypočítáme z průtoku

$$I = S \cdot v \quad (3)$$

Dosadíme-li v (1) za  $F$  podle (2) a za  $v$  podle (3), dostaneme pro výkon následující jednoduchý vztah:

$$P = p \cdot I \quad (4)$$

kde  $p$  je celkový tlak v potrubí [Pa] a

$I$  je průtok [ $\text{m}^3/\text{s}$ ].

Tlak vypočítáme pomocí Bernoulliovy rovnice:

$$p = \rho \cdot g \cdot h + 1/2 \cdot \rho \cdot v^2 \quad (5)$$

$$\text{Průřez: } S = \pi \cdot D^2/4 = \pi \cdot 32^2/4 = 804,2 \text{ mm}^2$$

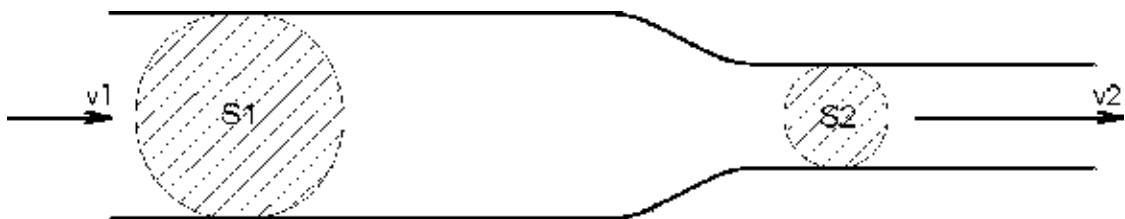
$$\text{Rychlost: } v = I/s = 0,0023/0,0008042 = 2,86 \text{ m/s}$$

$$\text{Tlak: } p = \rho \cdot g \cdot h + 1/2 \cdot \rho \cdot v^2 = 1000 \cdot 9,81 \cdot 24 + 1/2 \cdot 1000 \cdot 2,86^2 = 235440 + 4090 = 239530 \text{ Pa}$$

$$\text{Výkon: } P = p \cdot I = 239530 \cdot 0,0023 = 550,9 \text{ W}$$

$$\text{Účinnost čerpadla: } \eta = P/P_p \cdot 100 = 550,9/1130 \cdot 100 = 48,8 \%$$

Nyní určíme nejmenší průřez potrubí, kterým lze protlačit výkon, dodávaný čerpadlem.



Obr. 1. Ilustrace rovnice kontinuity

Uvažujme vodorovné potrubí, které se zúží z průřezu  $S_1$  na průřez  $S_2$ . Podle rovnice kontinuity

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 \quad (6)$$

se zvýší rychlost proudění kapaliny. Ve vodorovném potrubí není hydrostatický tlak, daný složkou  $\rho \cdot g \cdot h$ , takže tlak v potrubí bude mít pouze dynamickou složku  $1/2 \cdot \rho \cdot v^2$ . Jinými slovy, z hlediska

zatížení čerpadla je lhostejné, zda je kapalina čerpána do výšky  $h$ , nebo jestli se potrubí zúží na průřez  $S_2$ .

Kapalina, protékající průřezem  $S_2$ , bude mít rychlost

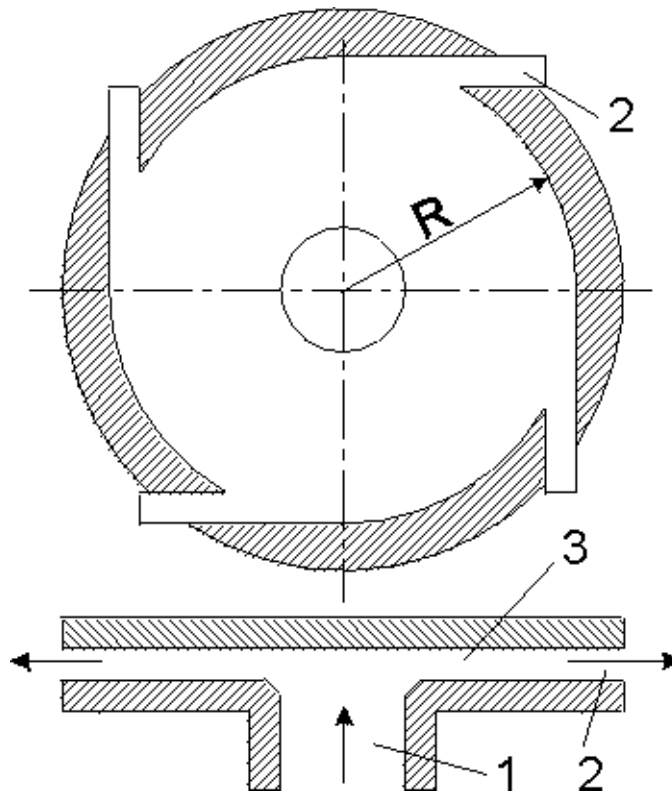
$$v_2 = \sqrt{2 \cdot p / \rho} \quad (7)$$

Minimální průřez potrubí vypočteme podle rovnice kontinuity (6):

$$S_2 = S_1 \cdot v_1 / v_2 \quad (8)$$

Rychlost kapaliny v průřezu  $S_2$ :  $v_2 = \sqrt{2 \cdot p / \rho} = \sqrt{2 \cdot 239530 / 1000} = 21,9 \text{ m/s}$

Minimální průřez potrubí:  $S_2 = S_1 \cdot v_1 / v_2 = 804,2 \cdot 2,86 / 21,9 = 105 \text{ mm}$



Obr. 2. Konstrukční uspořádání hydromotoru

Uvažujme hydromotor podle obr. 2. Voda do motoru proudí vstupním hrdlem 1 a vytéká tryskami 2, umístěnými po obvodu rotoru. Voda cestu na výstup musí protékat prostorem 3, kde je jí horní a dolní stěnou, které tento prostor ohraničují, udělen rotační pohyb. Vzdálenost horní desky od spodní je rovna průměru trysky. Je žádoucí, aby tato vzdálenost byla dostatečně malá, protože při nízké výšce vodního válce se tato voda snáze uvede do rotace. Vzdálenost mezi deskami snížíme tím, že zvolíme více trysek.

Nyní určíme reakční sílu kapaliny vytékající z trysky. Označme celkový průřez trysek  $S_2$ . Element objemu  $dV = S_2 \cdot dl$  kapaliny vytékající z trysky rychlostí  $v_2$  má hybnost

$$dH = dm \cdot v_2 = \rho \cdot dV \cdot v_2 = \rho \cdot S_2 \cdot dl \cdot v_2.$$

Reakční síla je dána časovou změnou hybnosti:

$$F = dH/dt = \rho \cdot S_2 \cdot dl/dt \cdot v_2.$$

Takže trysky po obvodu rotoru působí celkovou silou

$$F_2 = \rho \cdot S_2 \cdot v_2^2 \quad (9)$$

Výkon hydromotoru vypočítáme podle vzorce

$$P_2 = M \cdot \omega = F_2 \cdot R \cdot \omega \quad (10)$$

Zanedbáme-li zvýšení tlaku v tryskách odstředivou silou rotace vody, bude reaktivní síla, způsobená výtokem vody z trysek, daná pouze výkonem čerpadla. Takže při konstantní rychlosti otáčení  $\omega$  rotoru hydromotoru bude jeho výkon záviset pouze na velikosti jeho poloměru  $R$ .

Vzorec pro výpočet poloměru rotoru, který odvodíme z (10), bude

$$R = P/(F_2 \cdot \omega) \quad , \quad (11)$$

kde  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot n/60$ ,  $n$  jsou otáčky za minutu.

V následujícím rámečku je uveden výpočet poloměru rotoru tak, aby byly kryty ztráty pohonu čerpadla při jmenovitých otáčkách. Jinými slovy, při poloměru rotoru hydromotoru větším než  $R_{\min}$  by se po odpojení přívodu energie mělo soustrojí udržet v samočinné rotaci. Přitom nejsou uvažovány ztráty v potrubí a v hydromotoru. Na druhé straně se nebere v úvahu ani odstředivá síla vody rotující v hydromotoru, která sníží zatížení (resp. příkon) čerpadla a která zvýší účinnost hydromotoru.

Celková reaktivní síla trysek:  $F_2 = \rho \cdot S_2 \cdot v_2^2 = 1000 \cdot 0,000105 \cdot 21,9^2 = 50,36 \text{ N}$

Úhlová rychlost:  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n/60 = 2 \cdot \pi \cdot 2900/60 = 303,7 \text{ rad/s}$

Minimální průměr rotoru:  $R_{\min} = P/(F_2 \cdot \omega) = 1130/(50,36 \cdot 303,7) = 74 \text{ mm}$ .

A nakonec ještě odvodíme velikost tlaku, způsobeného odstředivou silou rotující vody.

Představme si dutý válec o poloměru  $R$  naplněný kapalinou, který rotuje rychlostí  $\omega$ . Na element objemu  $dV = dS \cdot dr$  ve vzdálenosti  $r$  od osy rotace působí síla

$$dF = dm \cdot a_n = \rho \cdot dV \cdot \omega^2 \cdot r = \rho \cdot dS \cdot dr \cdot \omega^2 \cdot r.$$

V tomto místě působí elementární tlak

$$dp = \frac{dF}{dS} = \rho \cdot dr \cdot \omega^2 \cdot r$$

Celkový tlak na stěny válce je dán integrálem elementárních tlaků přes poloměr  $R$  válce:

$$p = \int_0^R \rho \cdot \omega^2 \cdot r \cdot dr = \rho \cdot \omega^2 \left[ \frac{r^2}{2} \right]_0^R$$

Na vnitřní stěnu válce tedy působí tlak

$$p' = 1/2 \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot R^2 = 1/2 \cdot \rho \cdot v^2 \quad (12)$$

Porovnáme-li vztah (12) s Bernoulliovou rovnicí (5), zjistíme, že tlak na stěny rotujícího válce se rovná dynamickému tlaku kapaliny proudící potrubím rychlostí, která se rovná obvodové rychlosti válce.

V následujícím rámečku je uveden výpočet tlaku rotující kapaliny v případě, že všechny molekuly vody rotují stejnou rychlostí  $\omega$ .

Rychlost kapaliny způsobená čerpadlem:  $v_2 = 21,9 \text{ m/s}$

Obvodová rychlost rotoru:  $v' = \omega \cdot R = 303,7 \cdot 0,074 = 22,5 \text{ m/s}$

Tlak vyvolaný čerpadlem:  $p_2 = 1/2 \cdot \rho \cdot v_2^2 = 0,5 \cdot 1000 \cdot 21,9^2 = 239805^* \text{ Pa}$

Tlak vyvolaný odstředivou silou vody:  $p' = 1/2 \cdot \rho \cdot v'^2 = 0,5 \cdot 1000 \cdot 22,5^2 = 253125 \text{ Pa}$

\* Tento tlak by měl být 239530 Pa. Odchylka byla způsobena nepřesnostmi při výpočtech (zaokrouhlováním).

### **Závěr:**

Z výše uvedených výpočtů vyplývá, že tlak způsobený odstředivou silou kapaliny významně přispívá ke zvýšení účinnosti hydromotoru a může být dokonce větší než tlak dodaný čerpadlem. K takovému případu by v praxi dojít nemělo, protože takto vyvolaný podtlak způsobuje kavitaci s jejími nepříznivými vlivy na účinnost a životnost stroje. Proto je vhodné navrhnout hydromotor tak, aby k úplné rotaci vody v rotoru nemohlo dojít.