

# ENERGETSKI STROJI

Uvod

Pregled teoretičnih osnov

**Volumetrični stroji**

**Značilnosti**

**Črpalke**

**Kompresorji**

**Motorji z notranjim zgorevanjem**

**Parni stroji**

**Turbinski stroji**

**Energetske naprave**

## Značilnosti volumetričnih strojev

**Način delovanja**

**Batni stroji**

**Delo, moč in izkoristek**

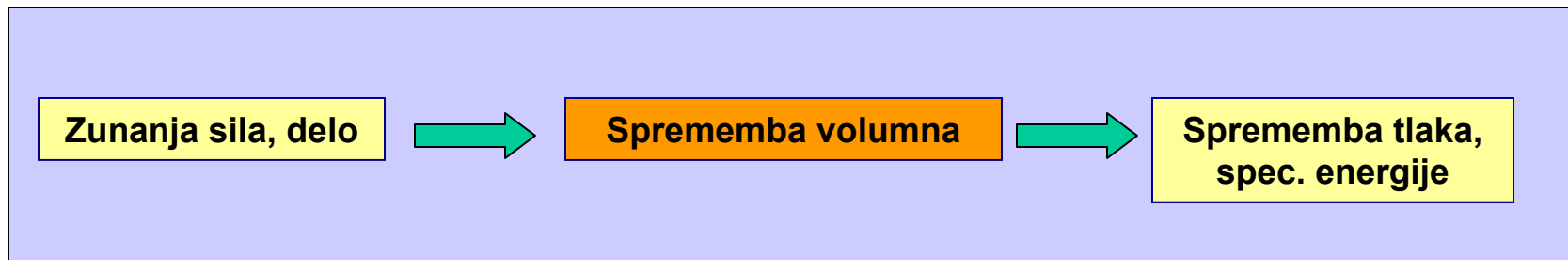
**Ročni mehanizem in vztrajnik**

**VOLUMETRIČNI STROJI**

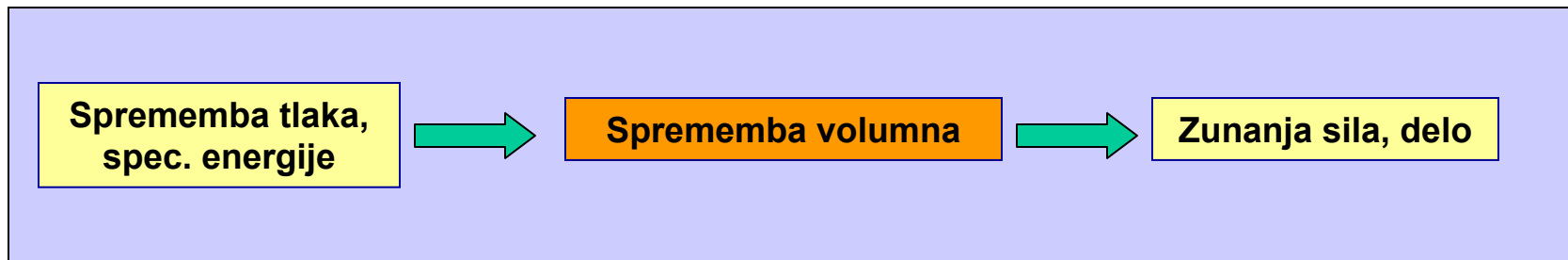
<b>Vrste volumetričnih strojev</b>		
<b>Delovni (gnani) stroji</b>	<b>Aerohidravlični stroji</b>	<b>Črpalke</b>
	<b>Toplotni stroji</b>	<b>Kompresorji</b>
<b>Pogonski (gonilni) stroji</b>	<b>Aerohidravlični stroji</b>	<b>linearni hidravlični pogoni</b>
	<b>Toplotni stroji</b>	<b>Motorji z notranjim zgorevanjem</b>

## Način delovanja

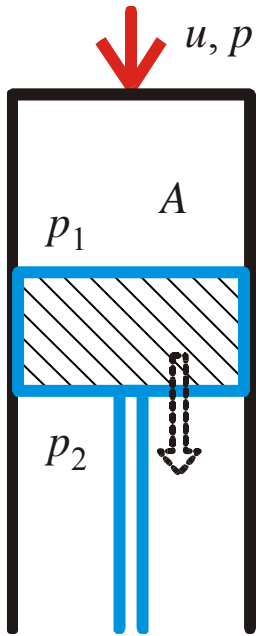
### Delovni stroji



### Pogonski stroji

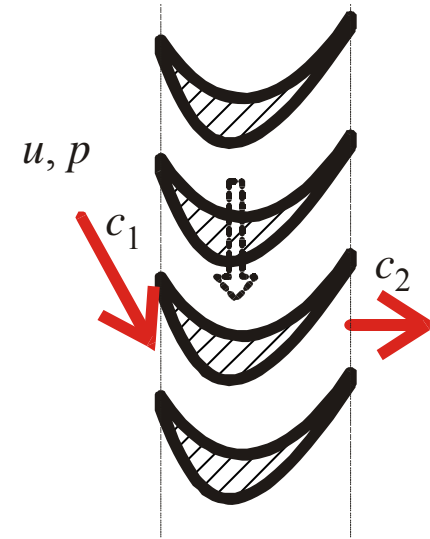


Prevladujejo tlačne sile, sile zaradi pospešenih mas delovne snovi so zanemarljive.



$$F = A \cdot (p_1 - p_2)$$

**tlak → sila**

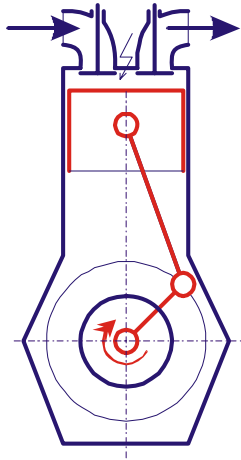


$$F = \dot{m} \cdot (c_1 - c_2)$$

**tlak → hitrost → sila**

**periodična sprememba volumna → različni mehanizmi**

## Sprememba volumna



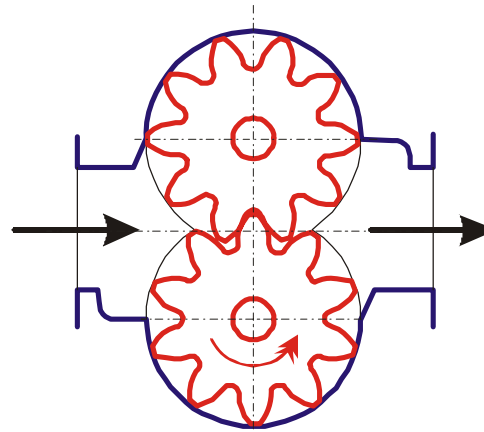
**Batni stroji:**

**batni kompresor**

**batna črpalka**

**batni motor z notranjim  
zgorevanjem**

**parni batni stroj**



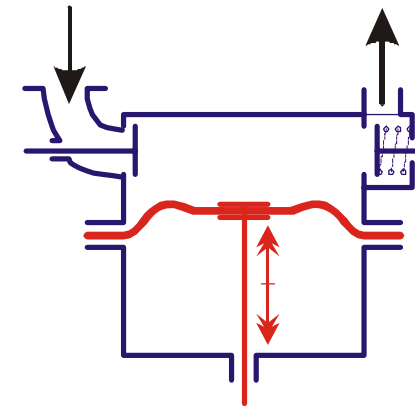
**Rotacijski stroji:**

**krilna črpalka**

**zobniška črpalka**

**vijačni kompresor**

**Wankel-ov motor**

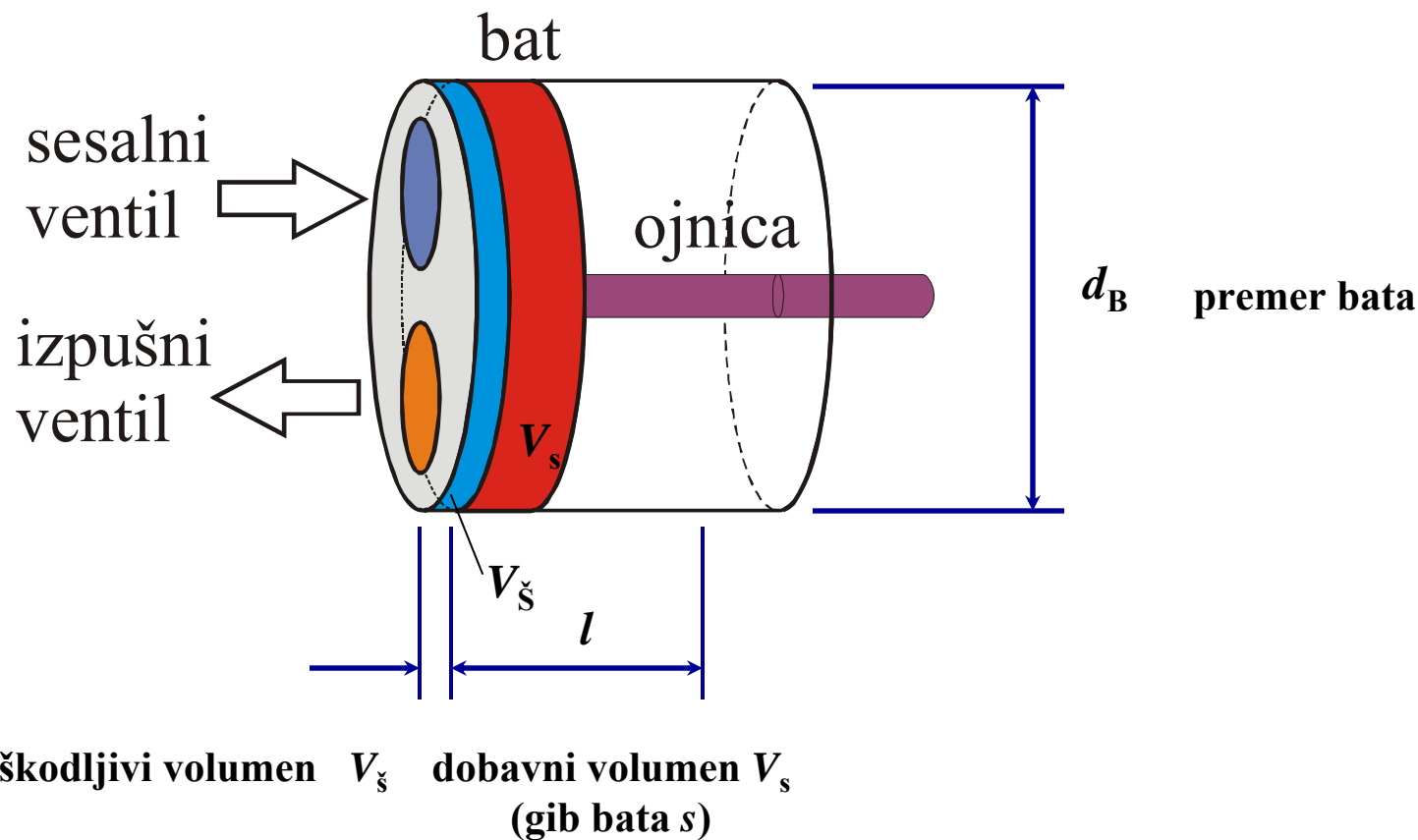


**Membranski stroji:**

**membranski kompresor**

**membranska črpalka**

## Batni stroji



## Gibna prostornina batnih strojev

Enostransko delujoči stroji

$$V_G = A_B \cdot l = \frac{\pi \cdot d_B^2}{4} \cdot l$$

Dvostransko delujoči stroji

$$\begin{aligned} V_G &= V_{G1} + V_{G2} = (A_{B1} + A_{B2}) \cdot l = \\ &= \frac{\pi}{4} (2 \cdot d_B^2 - d_{Ba}^2) \cdot l \end{aligned}$$

*n*-valjni batni stroji

$$V_G = V_{G1} + V_{G2} + \dots + V_{Gn}$$



## Škodljiva prostornina $V_{\check{s}}$

Močan negativni vpliv pri strojih s stisljivim delovnim medijem (plini, pare)

vedno prisotna, zaradi varnosti obratovanja

nepravilne geometrije (ventili, drsni obroči,...)

## Srednja hitrost bata

$$v_m = 2 \cdot l \cdot n = l \cdot \frac{\omega}{\pi}$$

INDICIRANA MOČ

$$P_i = p_i \cdot V_G \cdot n$$

$$P_i = p_i \cdot \frac{\dot{m}}{\rho_i}$$

**INDICIRANI IZKORISTEK**

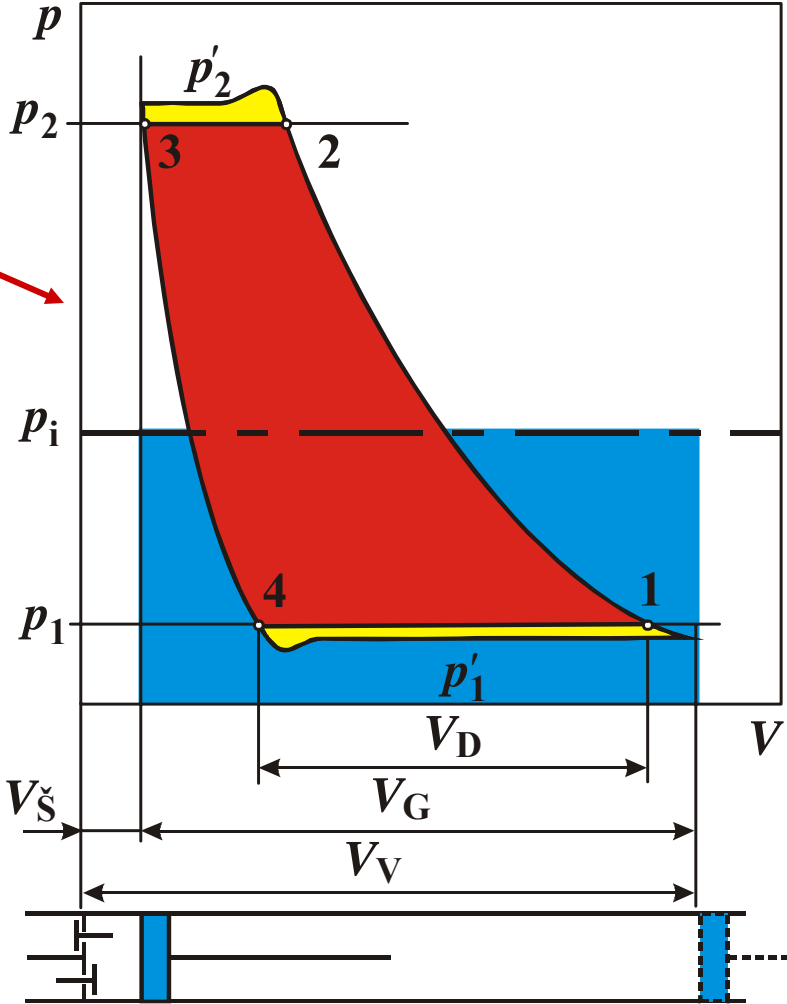
delovni stroji  $\eta_i = \frac{W}{W_i}$

pogonski stroji  $\eta_i = \frac{W_i}{W}$

$$\eta_i = \eta_h \cdot \lambda_v$$

stopnja dobave  $\lambda_v = \frac{V_D}{V_G}$

Primer: enostopenjski kompresor



## Ročni mehanizem in vztrajnik

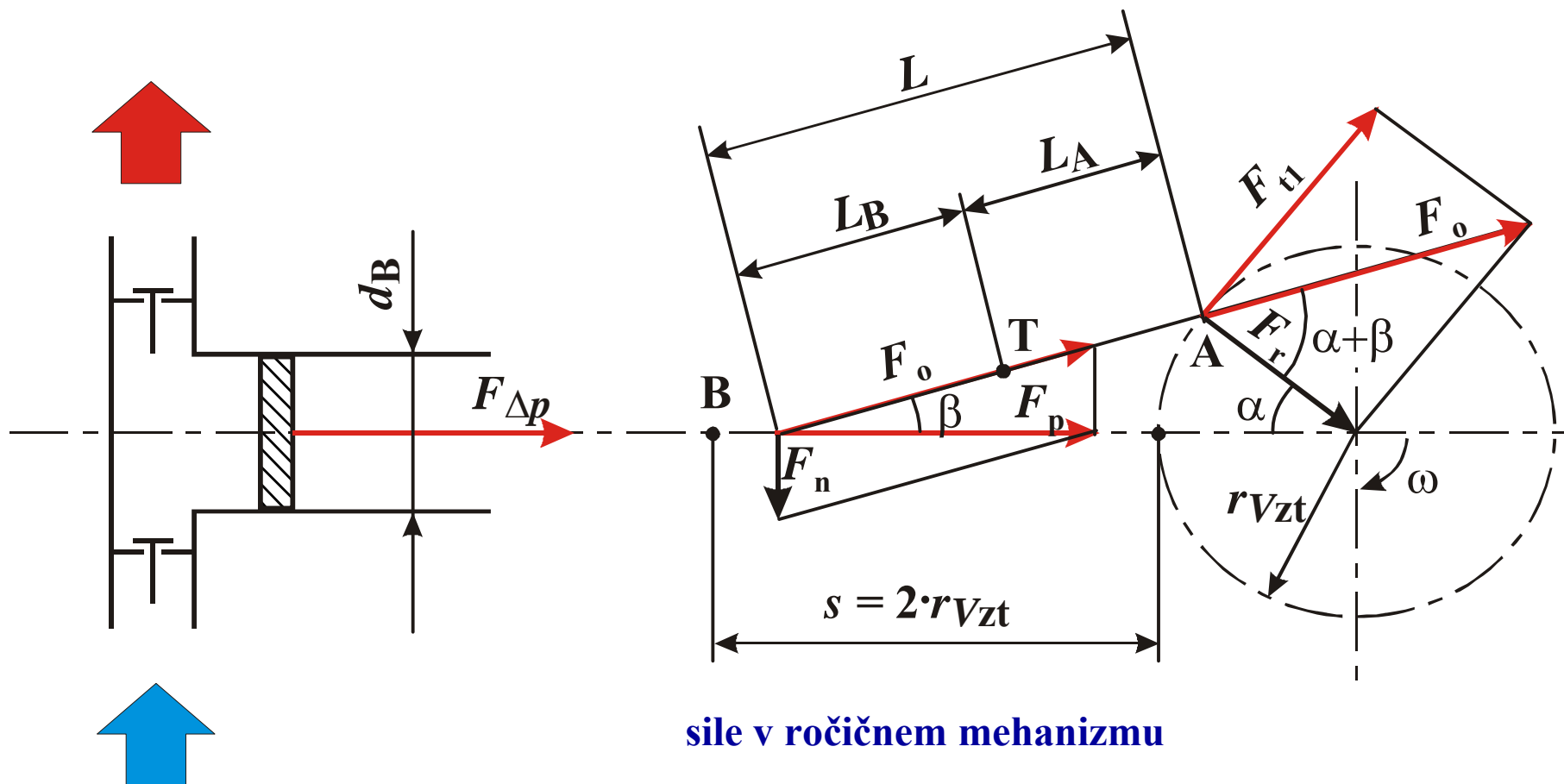


**Sile:**

- tlačna sila
- masne vztrajnostne sile
- sila teže
- sila trenja

- neenakomerna
- neenakomerna
- enakomerna
- neenakomerna

### Tlačne sile



sile v ročičnem mehanizmu

## Tlačne sile

Tlačna sila

$$F_{\Delta p}(\alpha) = A_B \cdot (p(\alpha) - p_0) = \frac{\pi}{4} \cdot d_B^2 \cdot (p(\alpha) - p_0)$$

Sila na ojnico

$$F_o = \frac{F_{\Delta p}}{\cos \beta}$$

Normalna sila

$$F_o = F_{\Delta p} \cdot \tan \beta$$

Tangencialna sila

$$F_{tl} = F_o \cdot \sin(\alpha + \beta) = F_p \cdot \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta}$$

Radialna sila

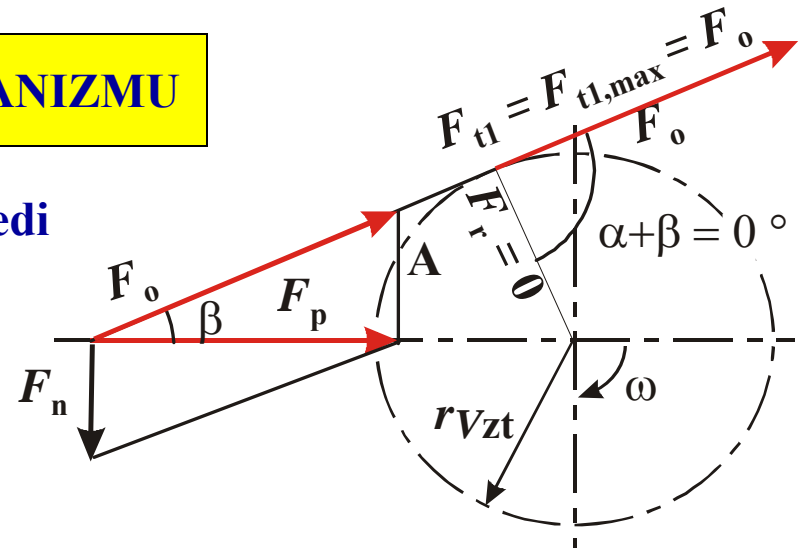
$$F_r = F_o \cdot \cos(\alpha + \beta) = F_p \cdot \frac{\cos(\alpha + \beta)}{\cos \beta}$$

**SILE V ROČIČNEM MEHANIZMU**

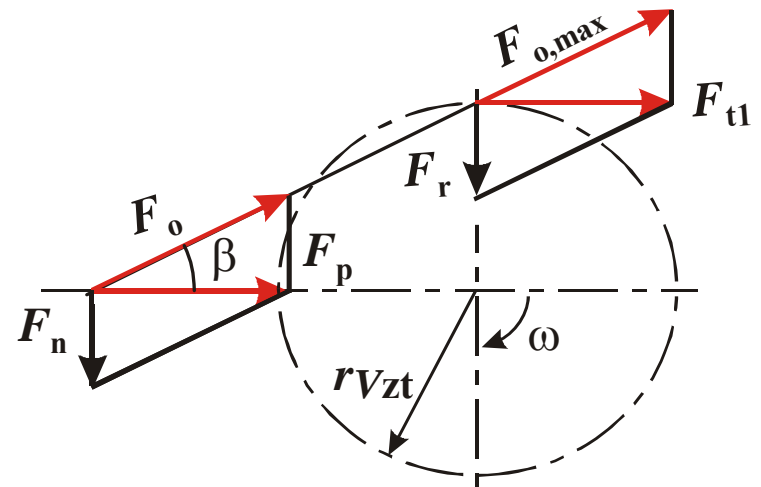
Kota  $\alpha$  in  $\beta$  sta funkciji lege gredi

Ekstremi:

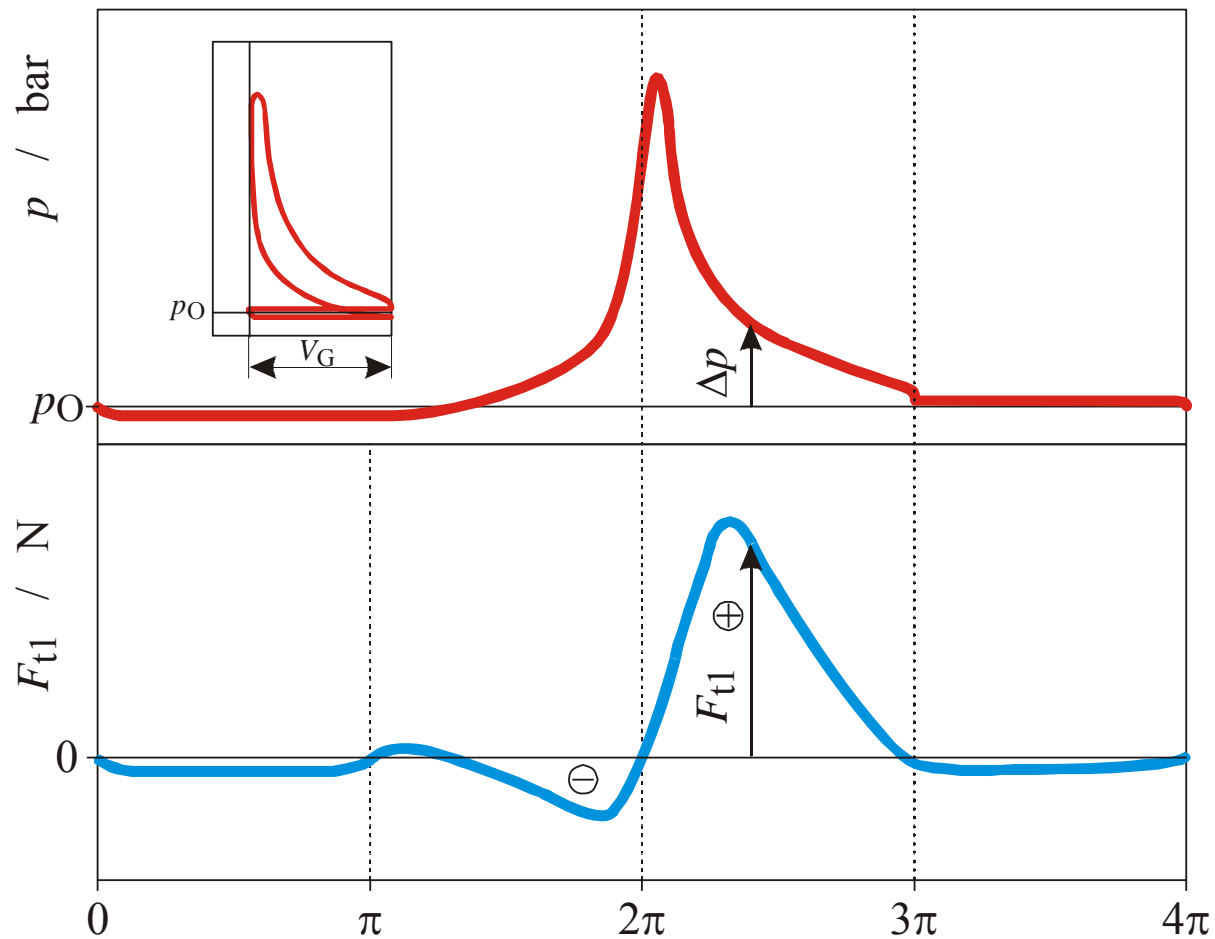
$$(\alpha + \beta) = 90^\circ \Rightarrow F_r = 0; F_{t1} = F_{t1,max} = F_o$$



$$\alpha = 90^\circ \Rightarrow F_o = F_{o,max} = \frac{F_{\Delta p}}{\sqrt{1 - \frac{r_{Vzt}}{(2 \cdot L)^2}}}$$



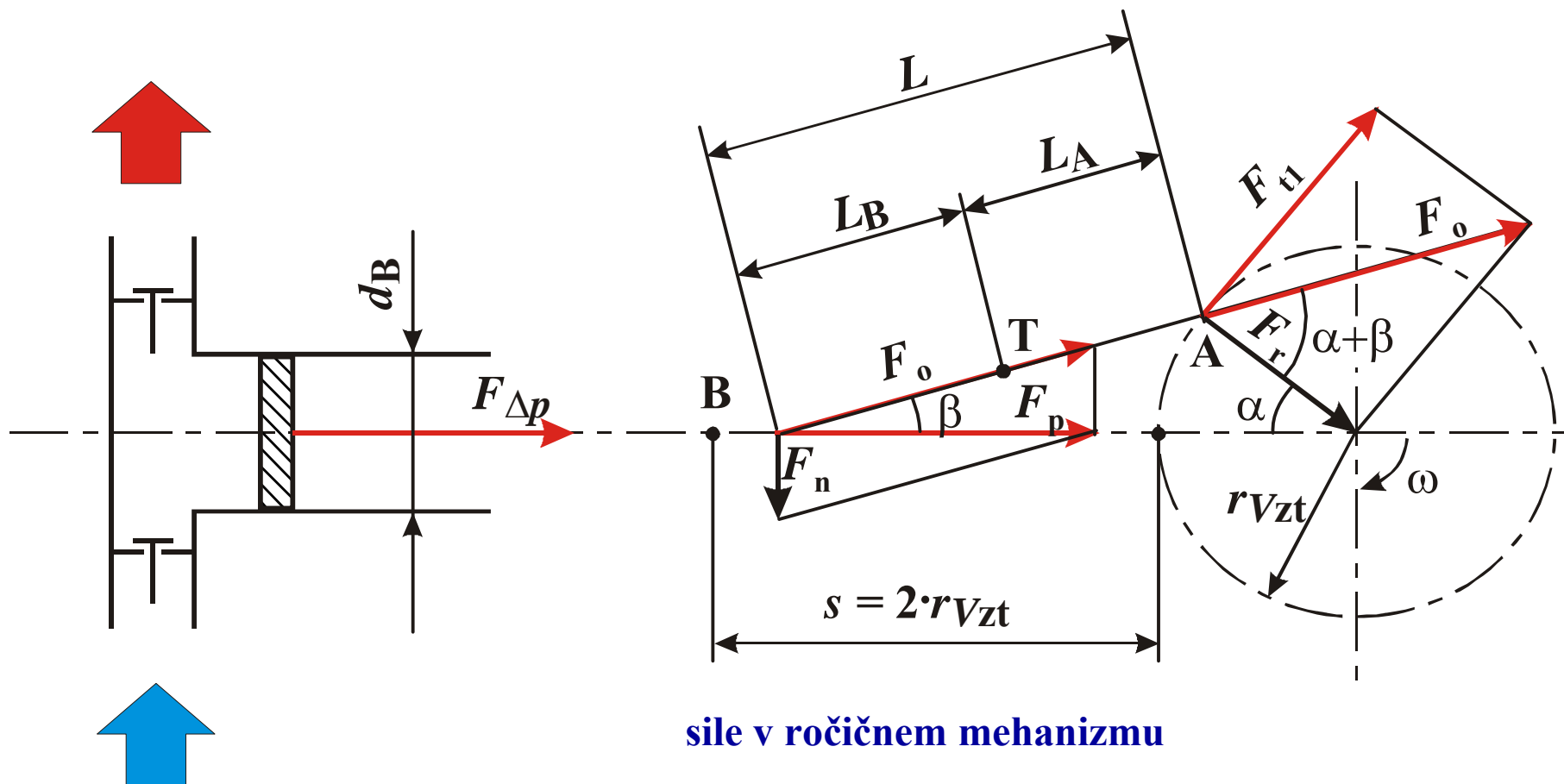
## Tlačne sile



Primer: 4-taktni motor Otto



### Masne vztrajnostne sile



## Masne vztrajnostne sile

### Sestavljeno gibanje ojnice

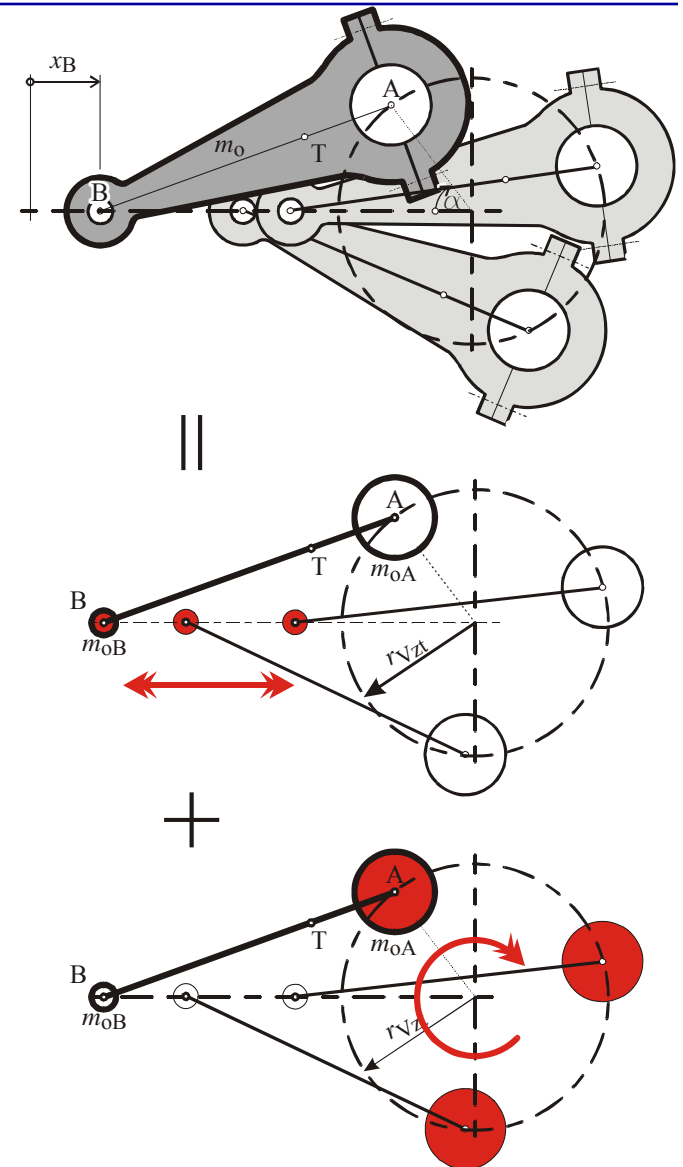
Neenakomerno premo gibanje (translacija)  
mase ojnice:

$$m_{o,s} = m_o \cdot \frac{L_2}{L}$$

Neenakomerno krožno gibanje (rotacija)  
mase ojnice:

$$m_{o,u} = m_o \cdot \frac{L_1}{L}$$

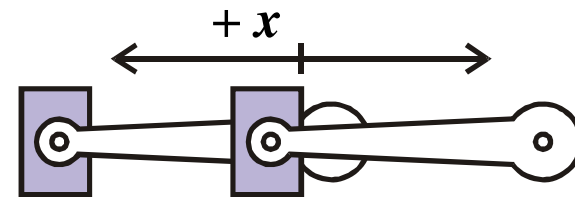
Rotacija povzroča centrifugalno silo in  
ne prispeva k vrtilnemu momentu



## Masne vztrajnostne sile Gibanje bata

Masna vztrajnostna sila zaradi neenakomernega translatornega gibanja (bata, ojnice, sornika,...)

$$F_s = (m_s + m_{o,s}) \cdot a; \quad a = \ddot{x} = \frac{d^2 x}{dt^2}$$



Tangencialna komponenta masne vztrajnostne sile:

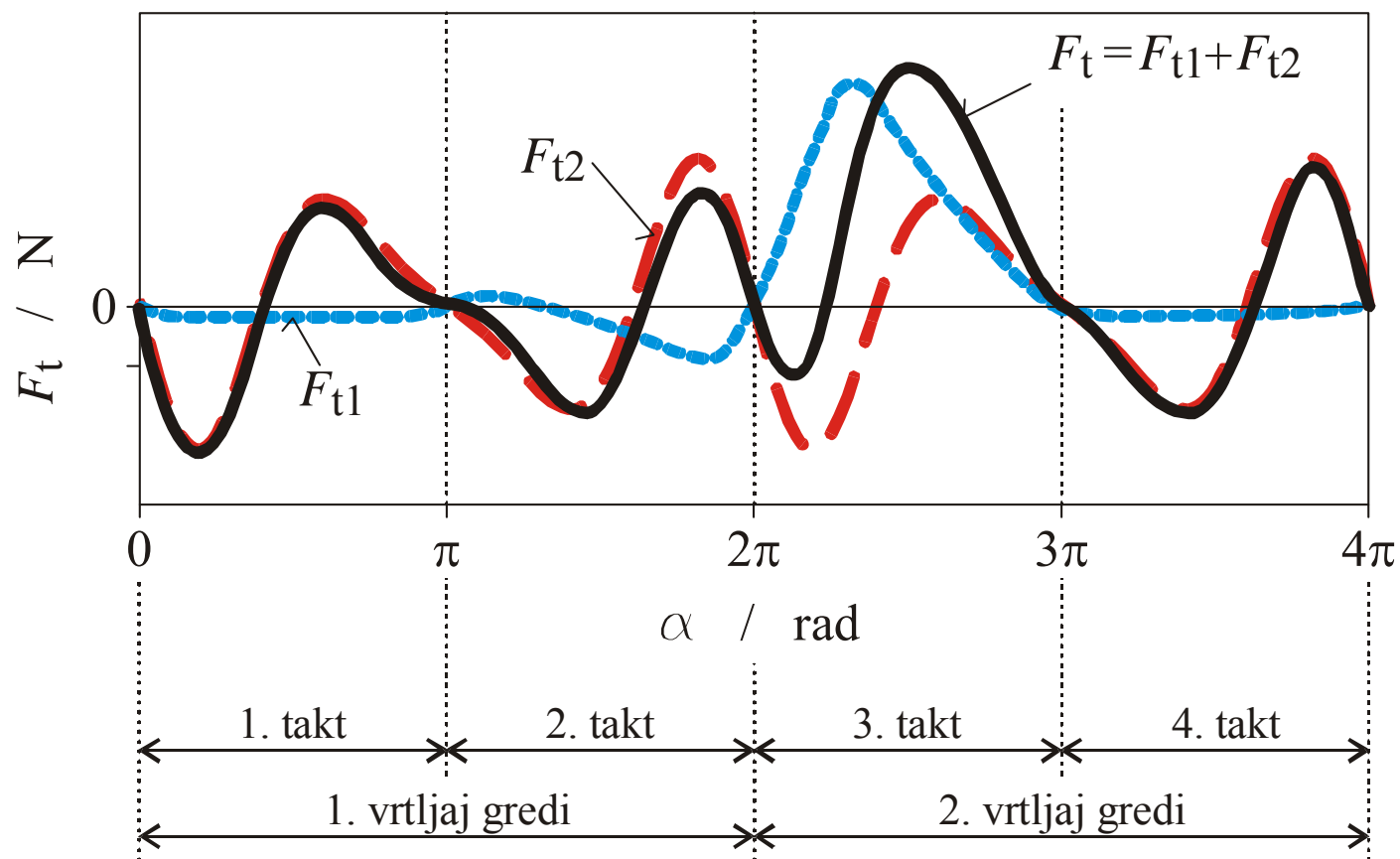
$$F_{t2} = F_s \cdot \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta}$$

Rezultanta tangencialnih sil:

$$F_t = F_t(t) = F_{t1}(t) + F_{t2}(t)$$

**Rezultanta tangencialnih sil se v teku ene periode spreminja, zato se spreminja tudi vtrilni moment na gredi batnega stroja!**

## Rezultanta tlačnih in masnih vztrajnostnih sil



## Vztrajnik

**Bilanca energij v času ene periode**

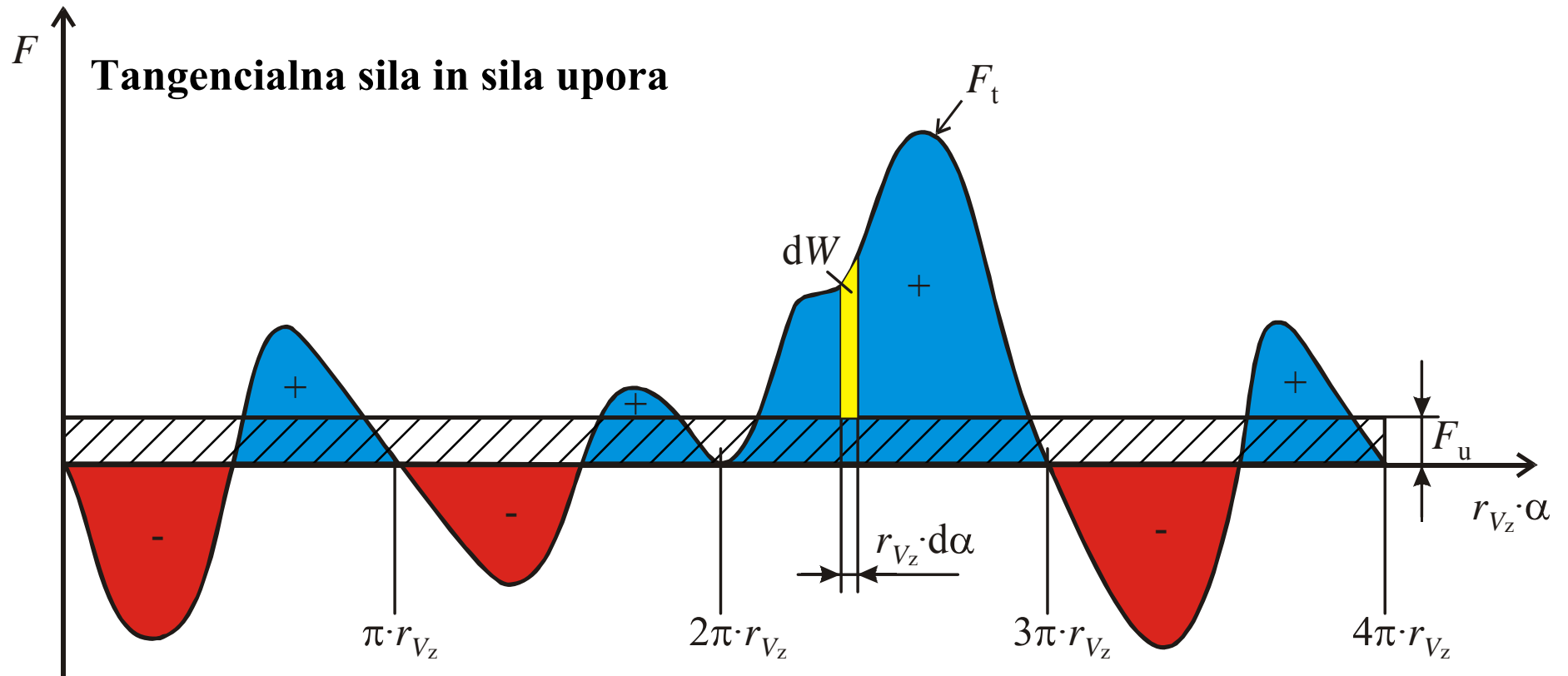
$$\int_0^{\alpha_{\text{Per}}} F_t(\alpha) \cdot r_{\text{Vzt}} \cdot d\alpha = F_U \cdot r_{\text{Vzt}} \cdot \alpha_{\text{Per}}$$

**Razlika med trenutnim delom batnega stroja  
(npr. motorja z notranjim zgorevanjem) in silo upora:**

$$dW = (F_t - F_U) \cdot r_{\text{Vzt}} \cdot d\alpha$$

**Razlika se v času periode spreminja po velikosti in predznaku:  
presežek sile pospešuje vrtenje  
primanjkljaj upočasnjuje vrtenje**

## Vztrajnik



## Vztrajnik

Kotna hitrost se v intervalu spreminja:

$$\omega_{\min} \leq \omega \leq \omega_{\max} : \omega = \dot{\alpha} = \frac{d\alpha}{dt}$$

Srednja kotna hitrost:

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

Stopnja neenakomernosti

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m}$$

Batni stroji	Stopnja neenakomernosti $\delta$
Letalski motorji	0,001
Motorji za vozila	0,003-0,007
Generatorji izmeničnega toka	0,003
Kompresorji	0,010-0,030
Črpalke	0,030-0,050
Ladijski motorji	0,050

## Vztrajnik

**Trenutna kinetična energija vztrajnika:**

$$W_{Vz} = m_{Vzt} \cdot \left( r_{Vzt}^2 \cdot \frac{\omega^2}{2} \right) = J_{Vzt} \cdot \frac{\omega^2}{2}$$

**Spreminjajoča se kinetična energija vztrajnika:**

$$\Delta W_{Vzt} = I_{Vzt} \cdot \frac{(\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2)}{2} = I_{Vzt} \cdot \omega_{\min}^2 \cdot \delta$$



## ČRPALKE

**Namen:** dovajanje mehanske energije tekočinam (nestisljivim fluidom)

**Posledica:** povečanje totalnega tlaka med prirobnicama črpalke

**Značilnosti:** majhne pretočne količine

veliko povečanje tlaka

samosesalnost

velik izkoristek

velika poraba prostora glede na pretočno količino

majhni vrtljaji

neenakomerna dobava

stroški nabave

**Področje uporabe:** transport tekočin z veliko viskoznostjo

dozirne črpalke

visokotlačne črpalke pri obdelovalnih strojih

črpalke v hidravličnih regulacijskih sistemih

**Delo (teoretično)**

Izentropna kompresija; izentropa sovpada z izohoro:

$$p \cdot dV \approx 0$$

Tehnično delo kompresije

$$W_{tK} = V_1 \cdot (p_2 - p_1)$$

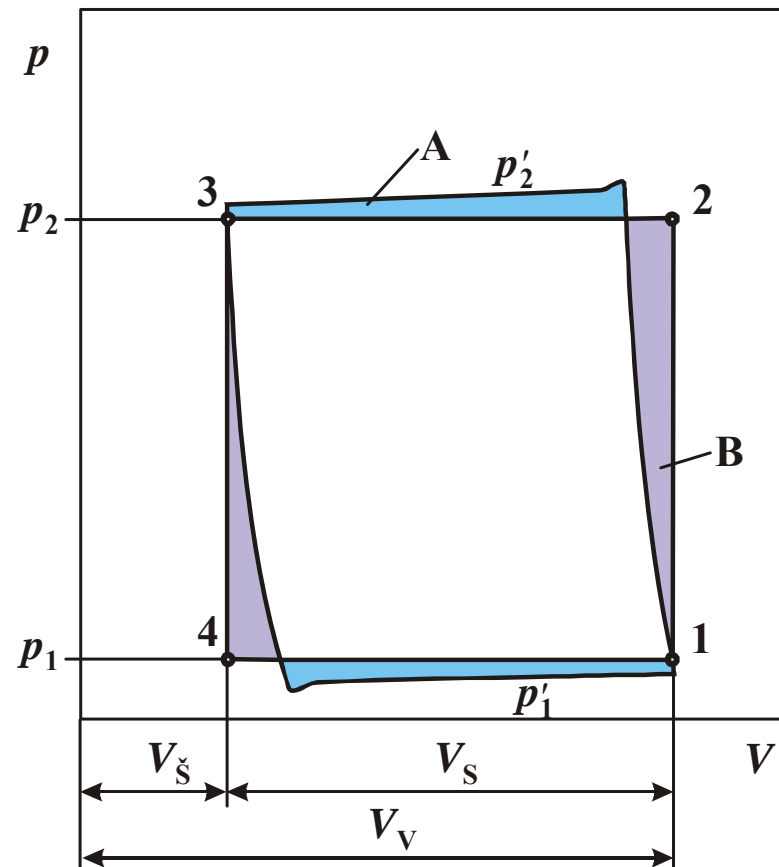
Tehnično delo ekspanzije

$$W_{tE} = V_4 \cdot (p_3 - p_4)$$

$$p_1 = p_4; \quad p_2 = p_3; \quad V_1 - V_4 = V_d$$

Delo črpalke:

$$W = W_{tK} - W_{tE} = V_d \cdot (p_2 - p_1)$$



**Izgube**

**Hidravlične izgube**

**izgube tlaka pri sesanju  
in iztiskanju**

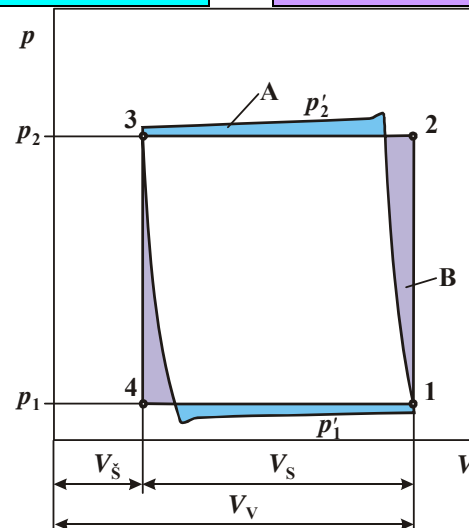
**odpiranje in zapiranje  
ventilov**

**Volumetrične izgube**

**netesnosti med valjem  
in batom**

**netesnosti ventilov**

**izločanje inertnih plinov**

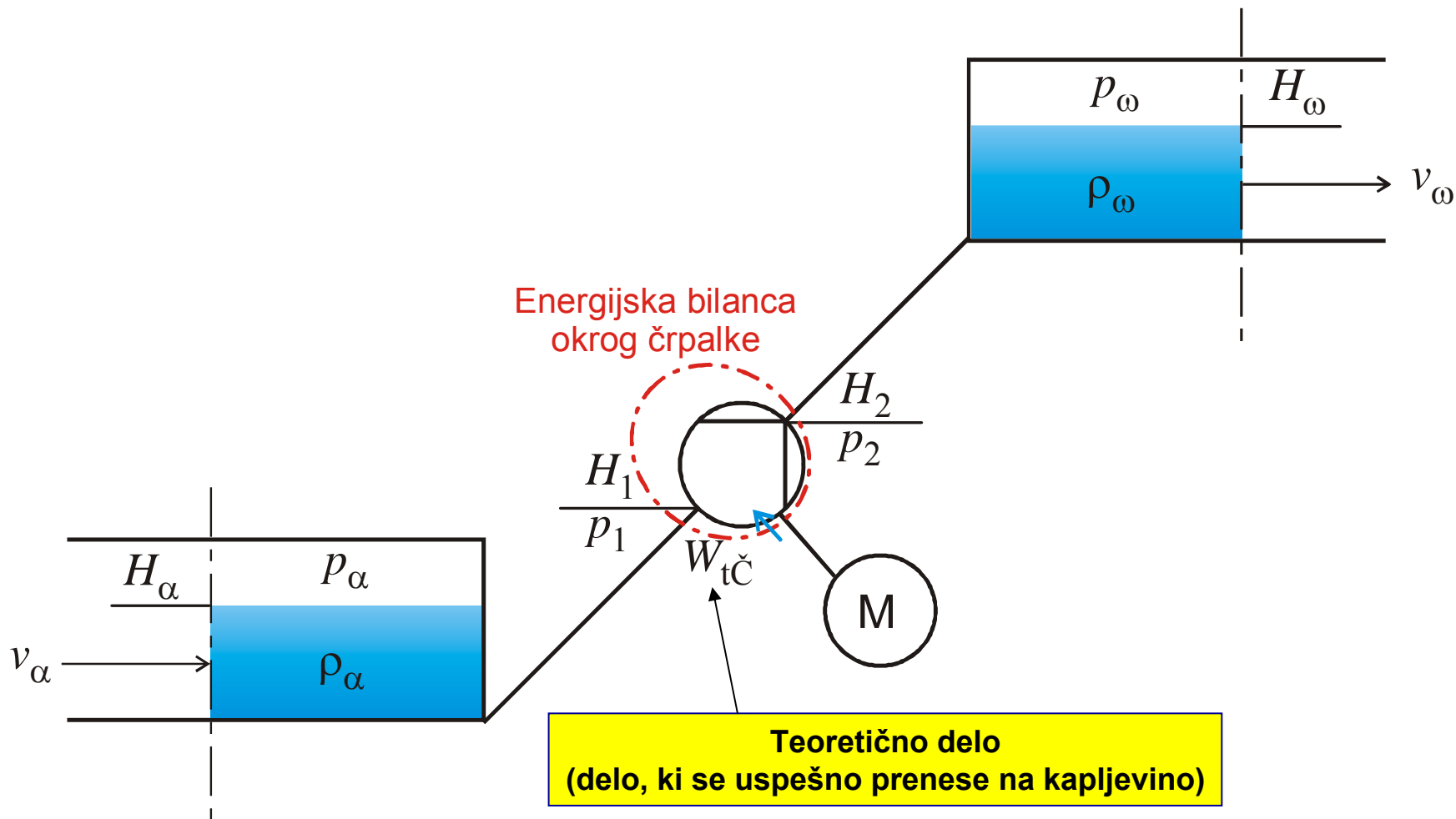


**Dejansko (efektivno) delo črpalke**

$$W_e = \frac{V_d \cdot (p_2 - p_1)}{\eta_e}$$

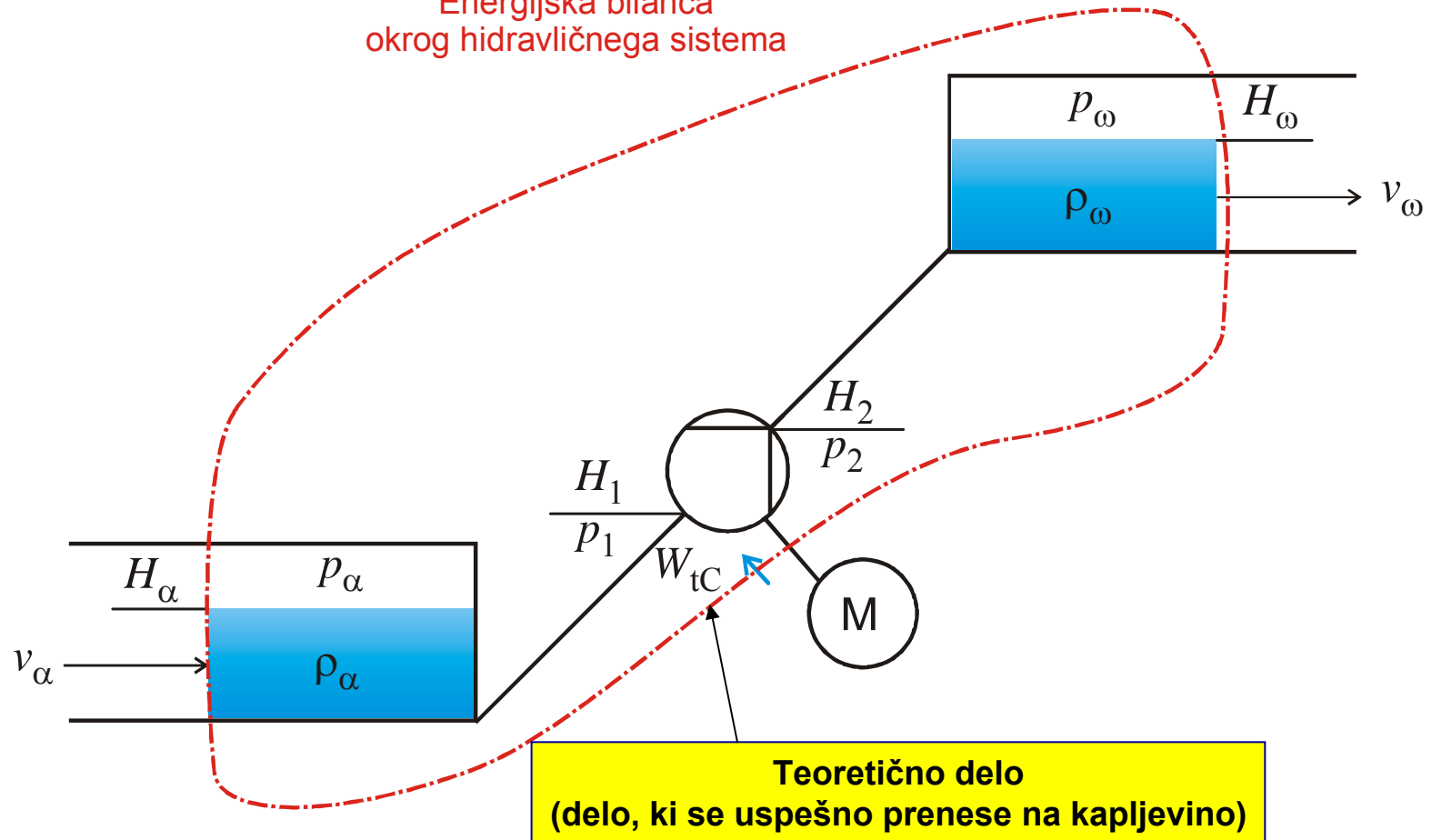
$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_m$$

**Energijska enačba za črpalko**



**Črpalka v sistemu**

Energijska bilanca  
okrog hidravličnega sistema



**Teoretično dovedeno delo in dobavna višina črpalke**

$$W = m \cdot g \cdot \left[ \frac{u_2 - u_1}{g} + \frac{p_2 - p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g} + (H_2 - H_1) \right] =$$
$$= m \cdot g \cdot H_{\check{c}}$$

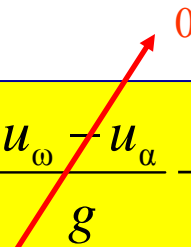
*Tehniško sprejemljive predpostavke ?!*

$$W = V \cdot \Delta p_{\check{c}} = \frac{m \cdot \Delta p_{\check{c}}}{\rho} = m \cdot g \cdot H_{\check{c}}$$

$H_{\check{c}}$  ... dobavna višina črpalke

Črpalka in sistem

$$u_{\alpha} + \frac{p_{\alpha}}{\rho} + \frac{v_{\alpha}^2}{2} + g \cdot H_{\alpha} + g \cdot \sum H_{\alpha I} + \frac{W}{m} =$$
$$u_{\omega} + \frac{p_{\omega}}{\rho} + \frac{v_{\omega}^2}{2} + g \cdot H_{\omega} + g \cdot \sum H_{\omega I}$$

$$W = m \cdot g \cdot \left[ \frac{u_{\omega} - u_{\alpha}}{g} + \frac{p_{\omega} - p_{\alpha}}{\rho \cdot g} + \frac{v_{\omega}^2 - v_{\alpha}^2}{2 \cdot g} + (H_{\omega} - H_{\alpha}) + \sum H_I \right] =$$
$$= m \cdot g \cdot H_C$$


$H_C$  ... dobavna višina sistema



Črpalka in sistem

Stacionarno obratovanje črpalke v sistemu (obratovalna točka):

$$g \cdot H_{\check{c}} = g \cdot H_C \Rightarrow H_{\check{c}} = H_C$$

izgube zaradi tekočinskega trenja v ceveh in armaturah 

$$W = m \cdot g \cdot \left[ \frac{u_{\omega} - u_{\alpha}}{g} + \frac{p_{\omega} - p_{\alpha}}{\rho \cdot g} + \frac{v_{\omega}^2 - v_{\alpha}^2}{2 \cdot g} + (H_{\omega} - H_{\alpha}) + \sum H_I \right]$$

0 

razlika geodetske višine 

razlika kinetične energije 

razlika tlakov med sesalno in tlačno posodo 

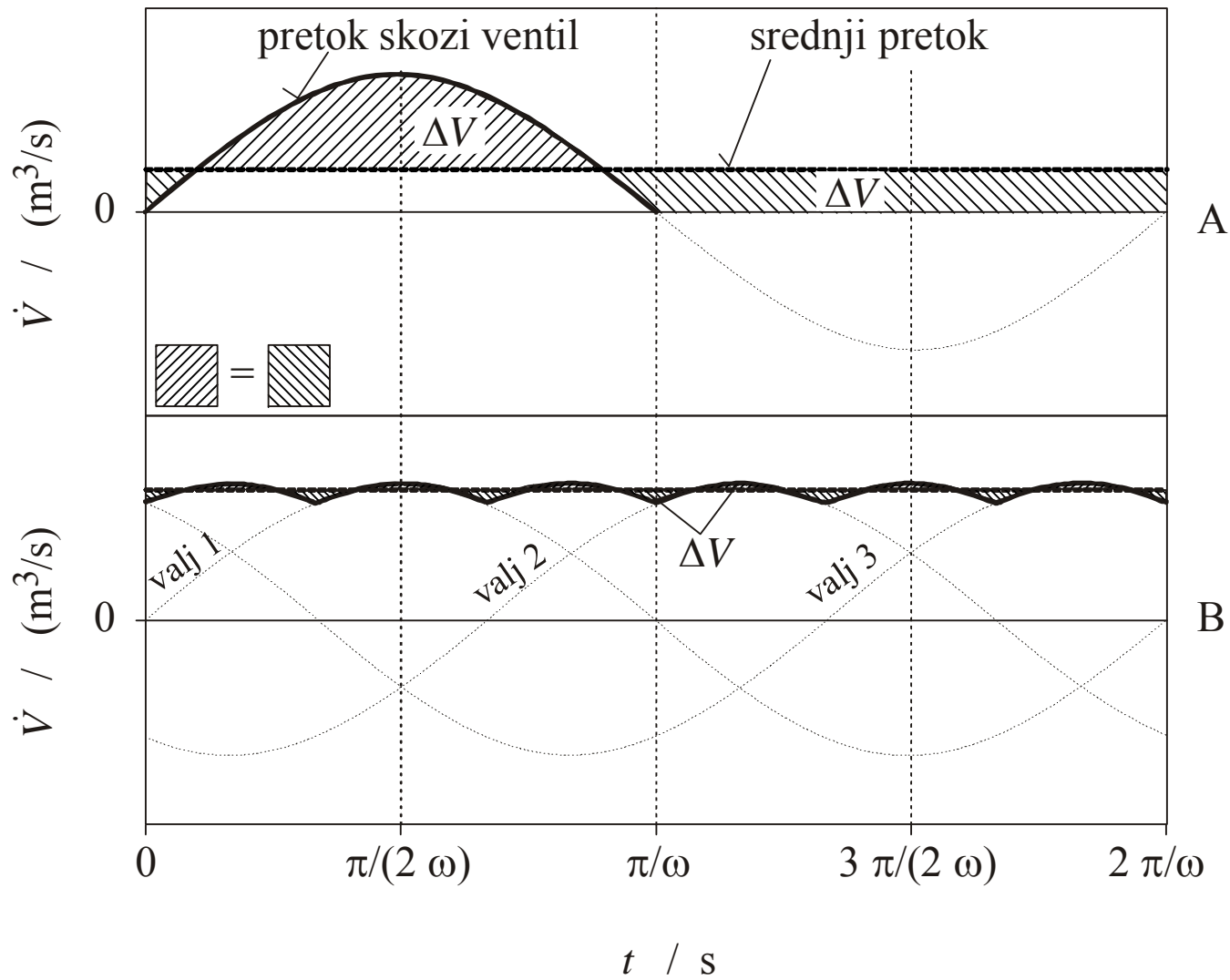
**Dobavna količina batne črpalke ni konstantna**  
**Razlog: kinematika ročičnega mehanizma**  
**Rešitev: več vzporedno nameščenih valjev**  
**vetrnik**  
**Krmiljenje pretoka: sprememba vrtilne hitrosti motorja**

**Srednja dobavna količina:**

$$\dot{V} = \frac{V_d}{\Delta t_{\text{Per}}}$$

**Dejanska moč:**

$$P_e = \frac{\dot{m} \cdot g \cdot H_{\check{c}}}{\eta_e} = \frac{\rho \cdot \dot{V} \cdot g \cdot H_{\check{c}}}{\eta_e} = \frac{\rho \cdot \dot{V} \cdot y}{\eta_e}$$



**Dopustna sesalna višina**

**Bernoullijeva enačba za sesalni del sistema:**

$$\frac{p_{\alpha}}{\rho \cdot g} + \frac{v_{\alpha}^2}{2 \cdot g} + H_{\alpha} = \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + H_1 + \sum H_{\alpha l}$$

**Sesalna višina:**

$$H_s = H_1 - H_{\alpha} = \frac{p_{\alpha}}{\rho \cdot g} - \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_{\alpha}^2 - v_1^2}{2 \cdot g} - \sum H_{\alpha l}$$

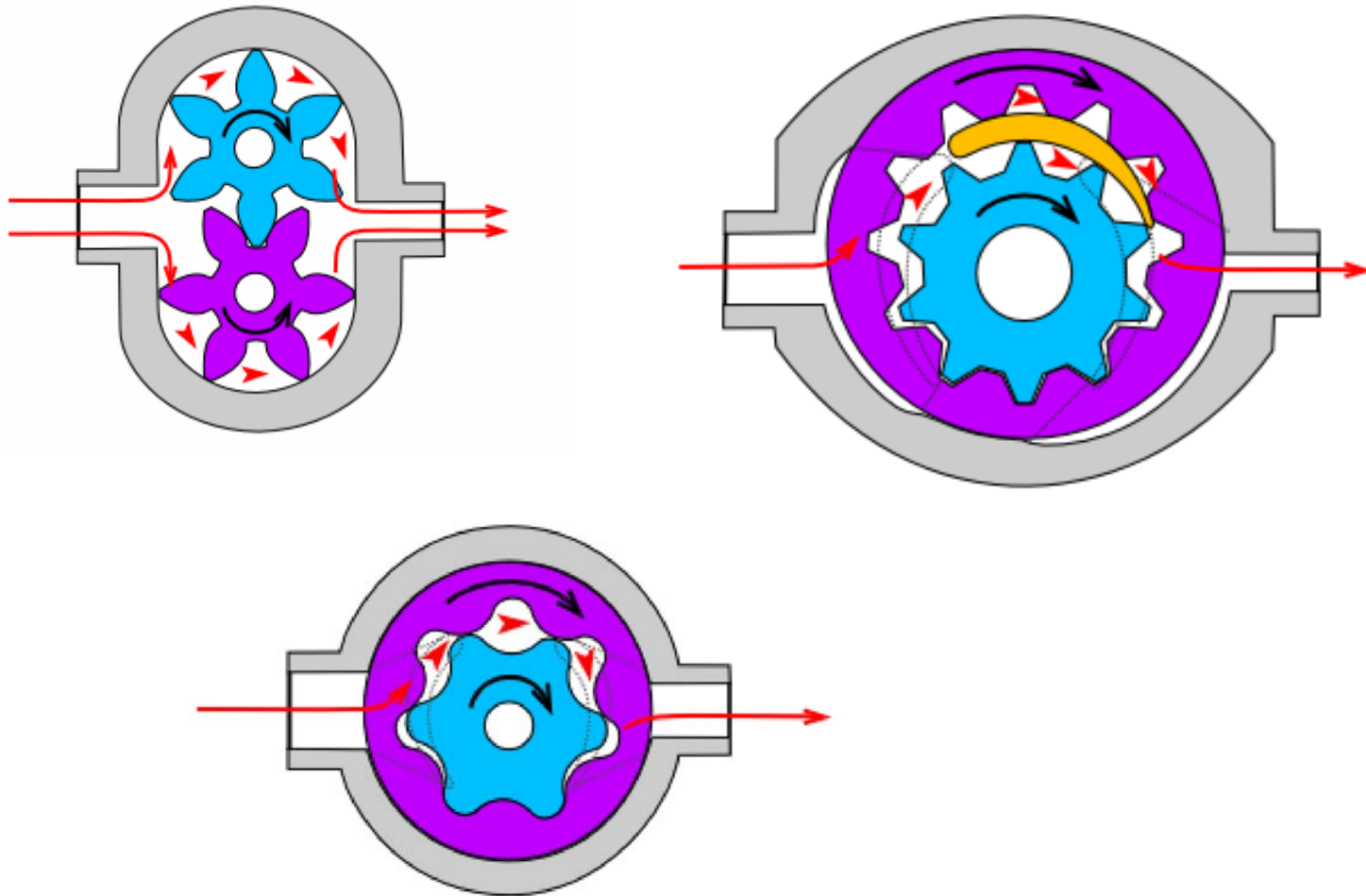
$$p_1 > p_T \Rightarrow H_{s, \text{dop}} \leq \frac{p_{\alpha}}{\rho \cdot g} - \frac{p_T}{\rho \cdot g} + \frac{v_{\alpha}^2 - v_1^2}{2 \cdot g} - \sum H_{\alpha l}$$

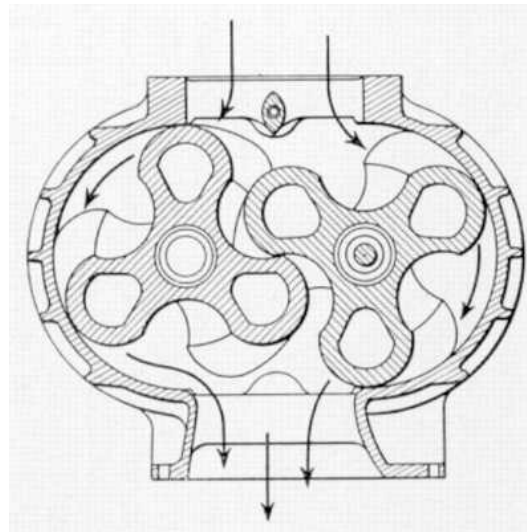
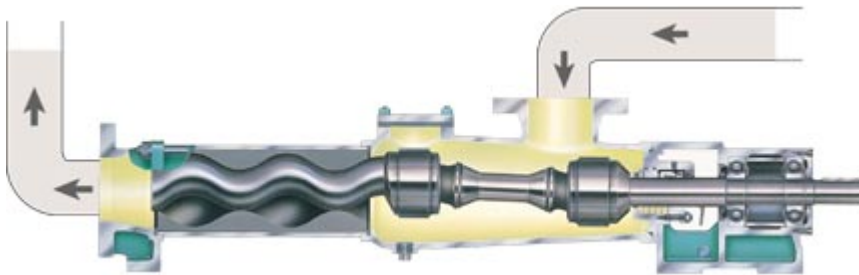
**Zobniške črpalke, rotacijski volumetrični stroj**

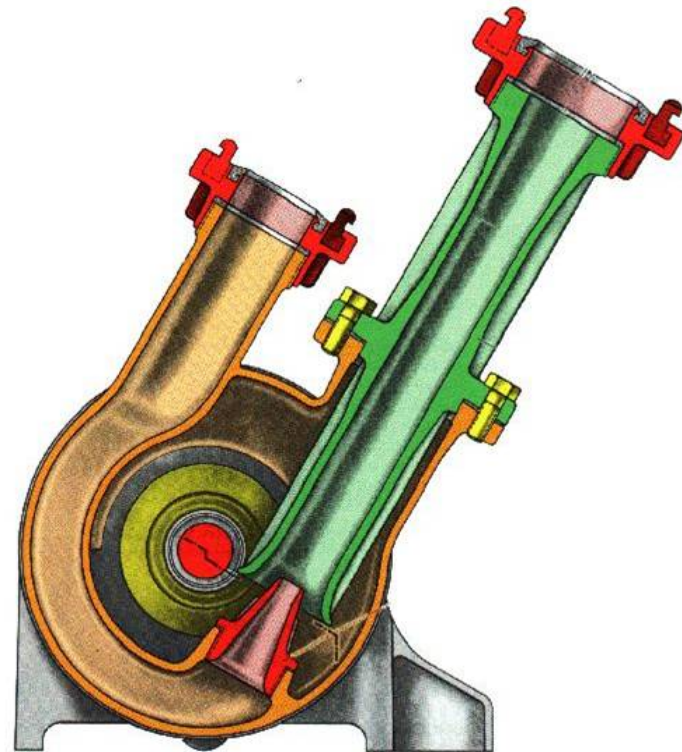
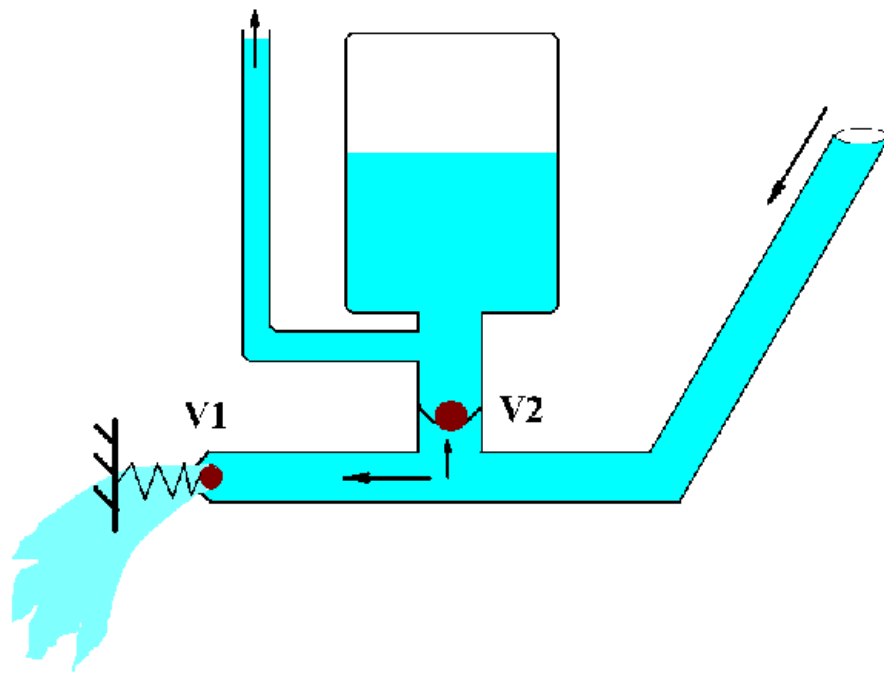
$$V = \lambda_v \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_z^2 - D_n^2) \cdot B \cdot n$$

$\lambda_v$  ...stopnja dobave : 0,85-0,90

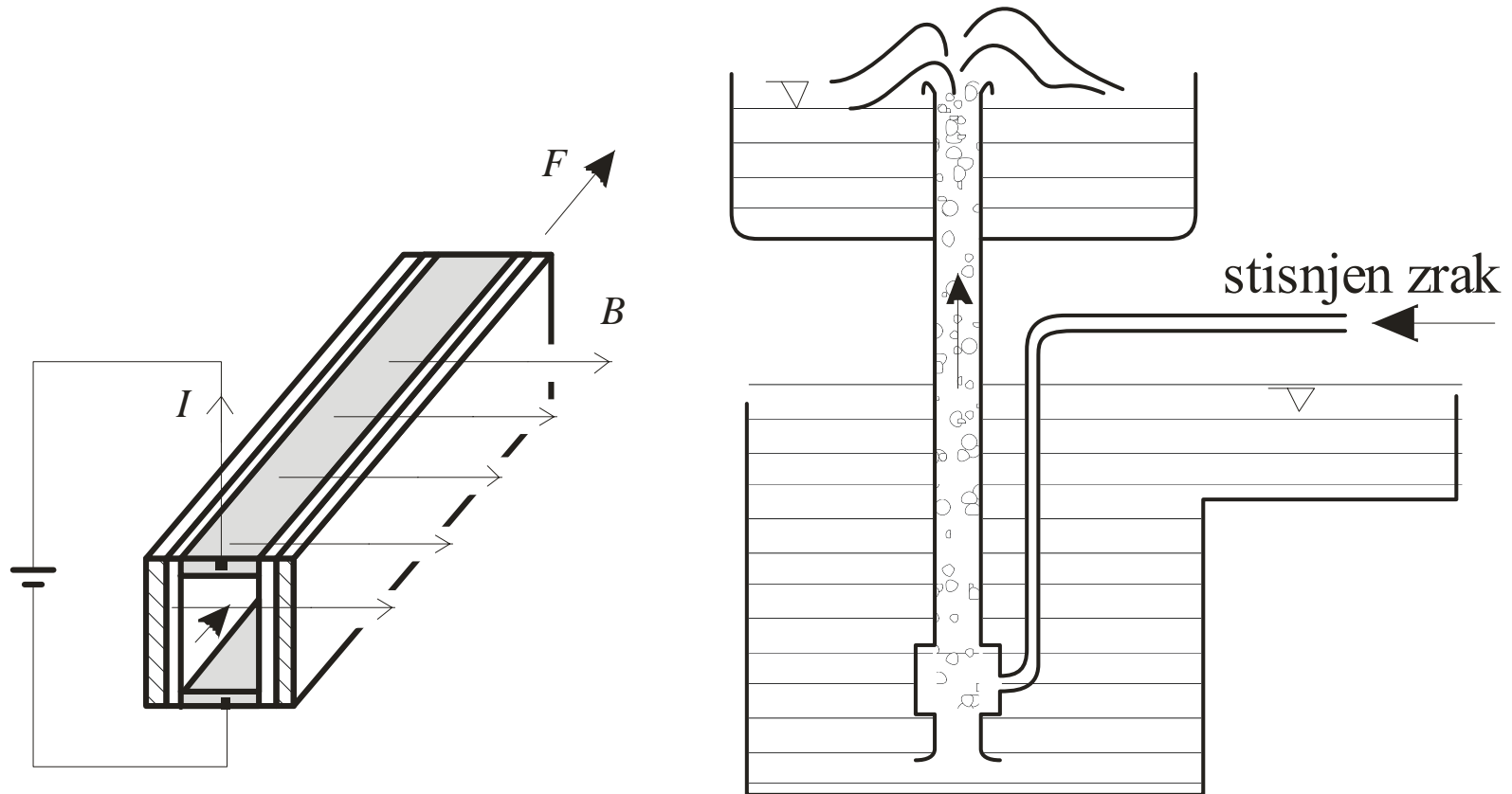
**Uporaba: oljna črpalka za mazalne sisteme strojev**



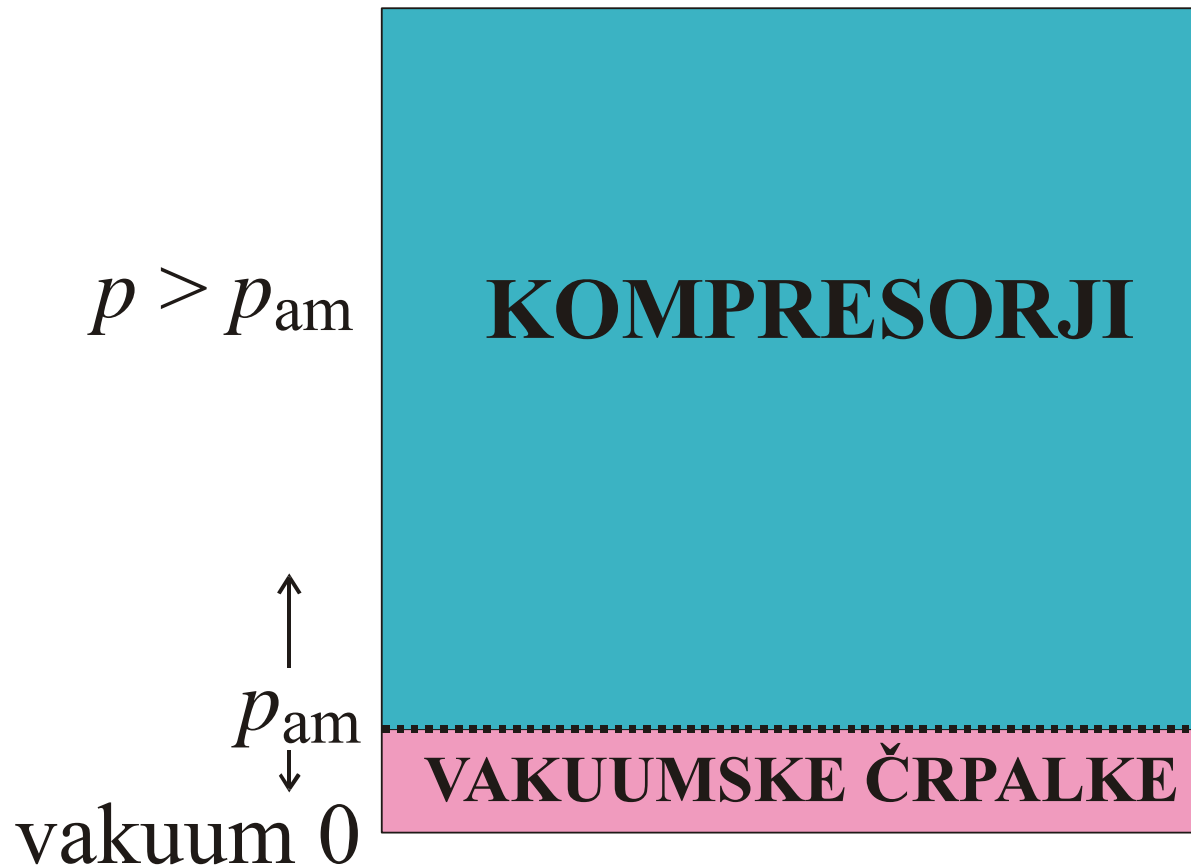




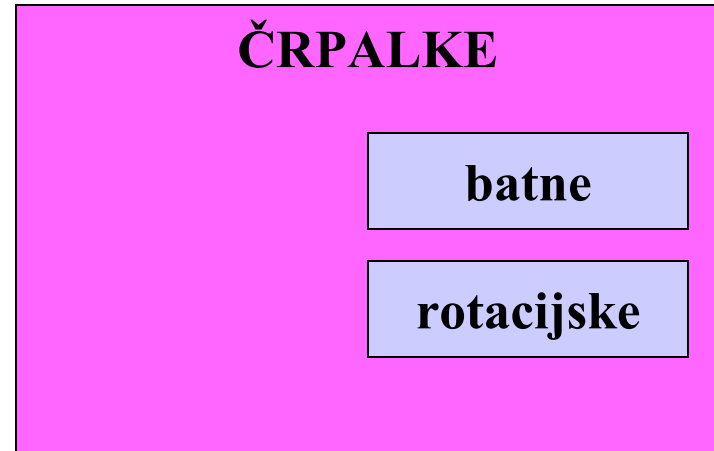
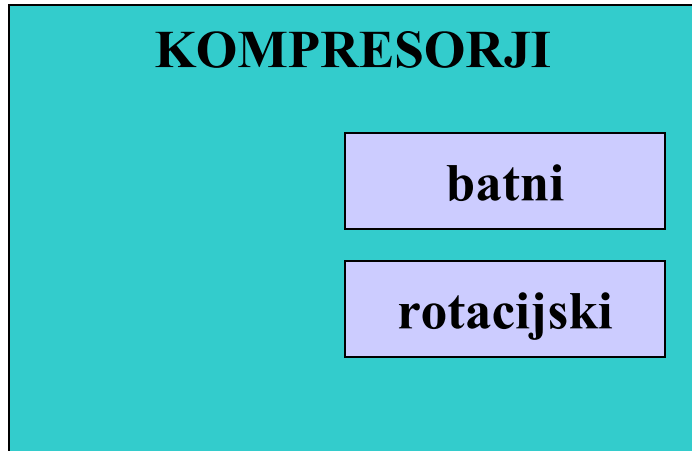




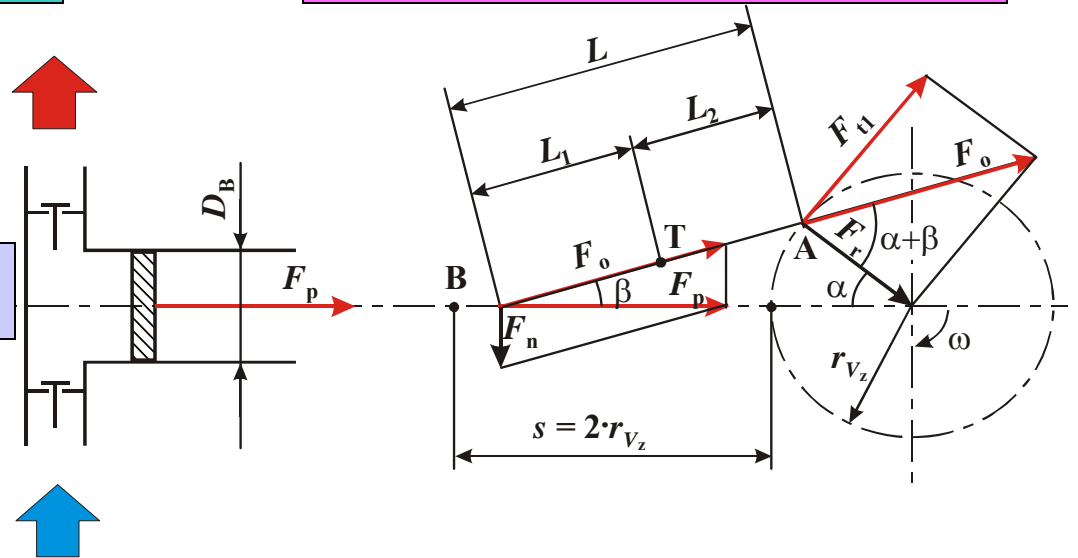
**VOLUMETRIČNI KOMPRESORJI**



**VOLUMETRIČNI KOMPRESORJI**



batni stroji → ročni mehanizem



**KOMPRESORJI**

**Namen:** dovajanje mehanske energije plinom in param (stisljivim fluidom)

**Posledica:** povečanje statičnega tlaka (temperature) specifični volumen se zmanjša

**Značilnosti:** majhne pretočne količine  
veliko povečanje tlaka

**KOMPRESORJI**

<b>Medij</b>	<b>Področje uporabe</b>
<b>Zrak</b>	<b>pnevmatska tehnika, transport, krmilna tehnika, procesna tehnika</b>
<b>Vodna para</b>	<b>procesna tehnika</b>
<b>Gorilni plini: zemeljski plin, CO</b>	<b>zgorevalna tehnika, energetika, procesna tehnika</b>
<b>Tehnični plini: kisik, vodik, dušik, acetilen</b>	<b>procesna tehnika, hladilna tehnika, varilska tehnika</b>
<b>Hladiva: freoni, amoniak</b>	<b>hladilna in klimatska tehnika, procesna tehnika, procesna tehnika</b>

**VAKUUMSKE ČRPALKE**

**Namen:** izsesavanje (evakuiranje) plinov iz posod

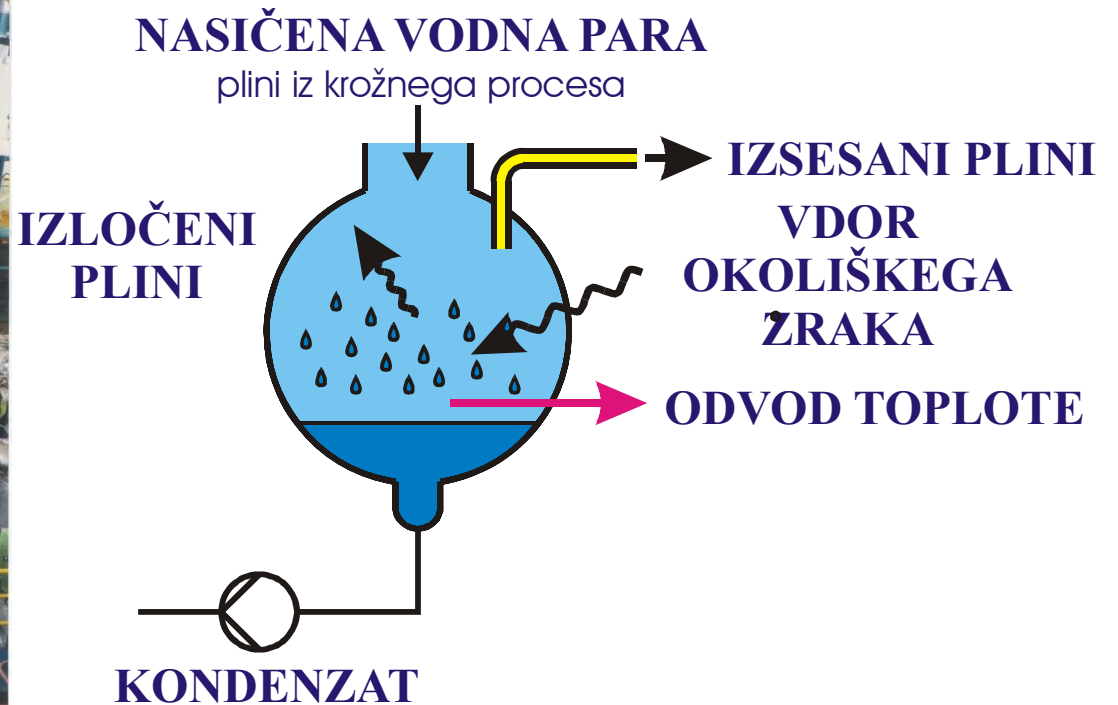
**Posledica:** povečanje statičnega tlaka izsesavanega plina (zmanjšanje tlaka v izsesavani posodi)

**Področje uporabe:** vakuumna tehnika, procesna tehnika - krožni procesi

**Značilnosti:** majhne pretočne količine  
veliko povečanje tlaka (velik podtlak)

VAKUUMSKE ČRPALKE

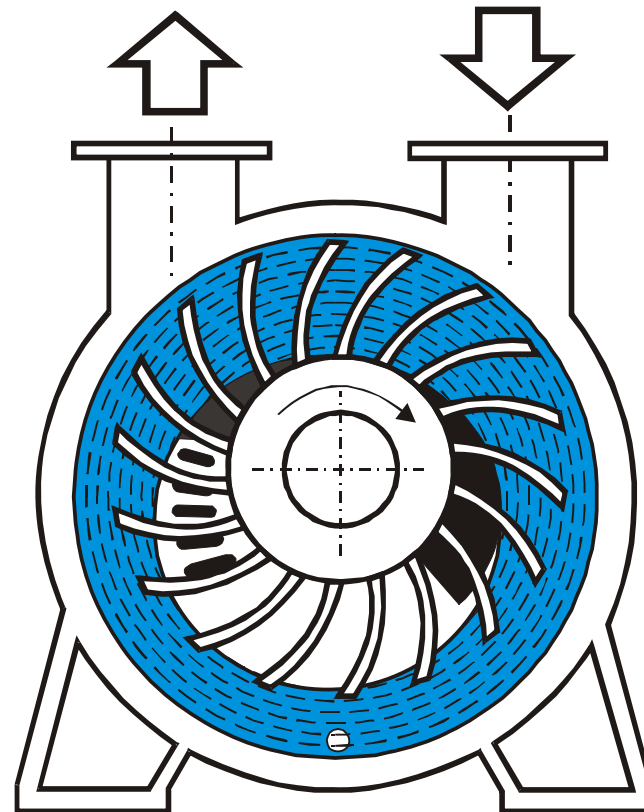
Primer: evakuacija inertnih plinov iz kondenzatorja parnega krožnega procesa



## VAKUUMSKE ČRPALKE

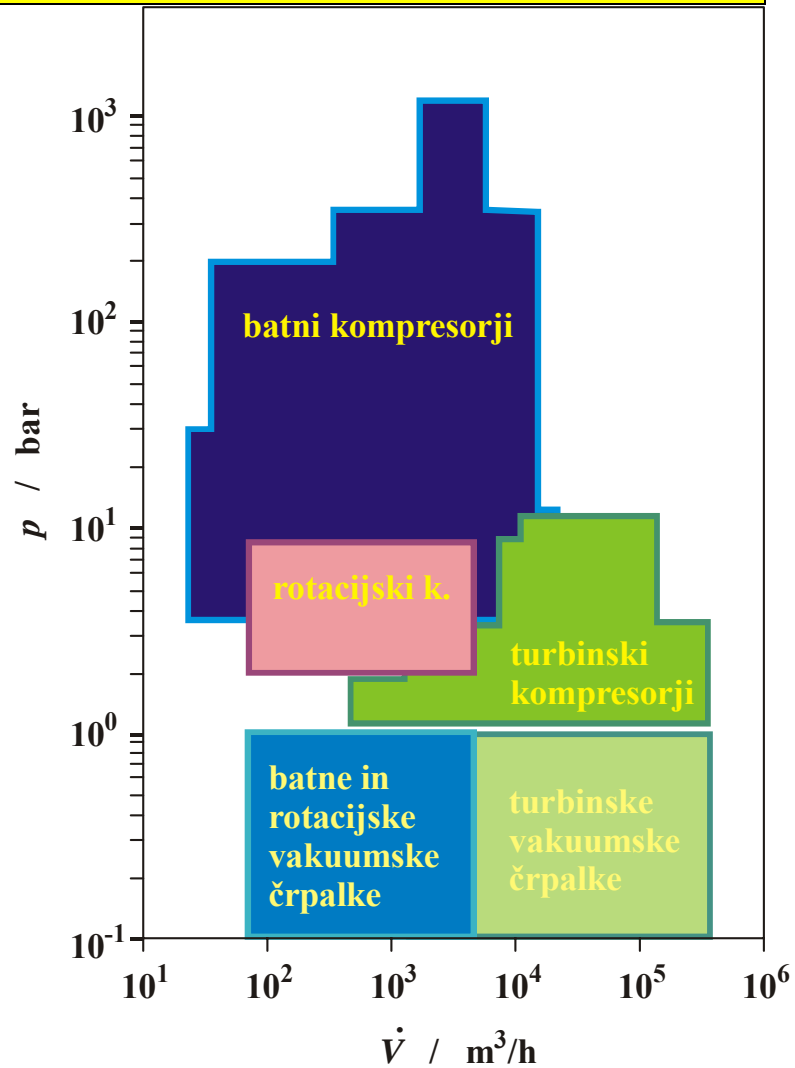
Primer: evakuacija inertnih plinov iz kondenzatorja parnega krožnega procesa

ELMO-ČRPALKA

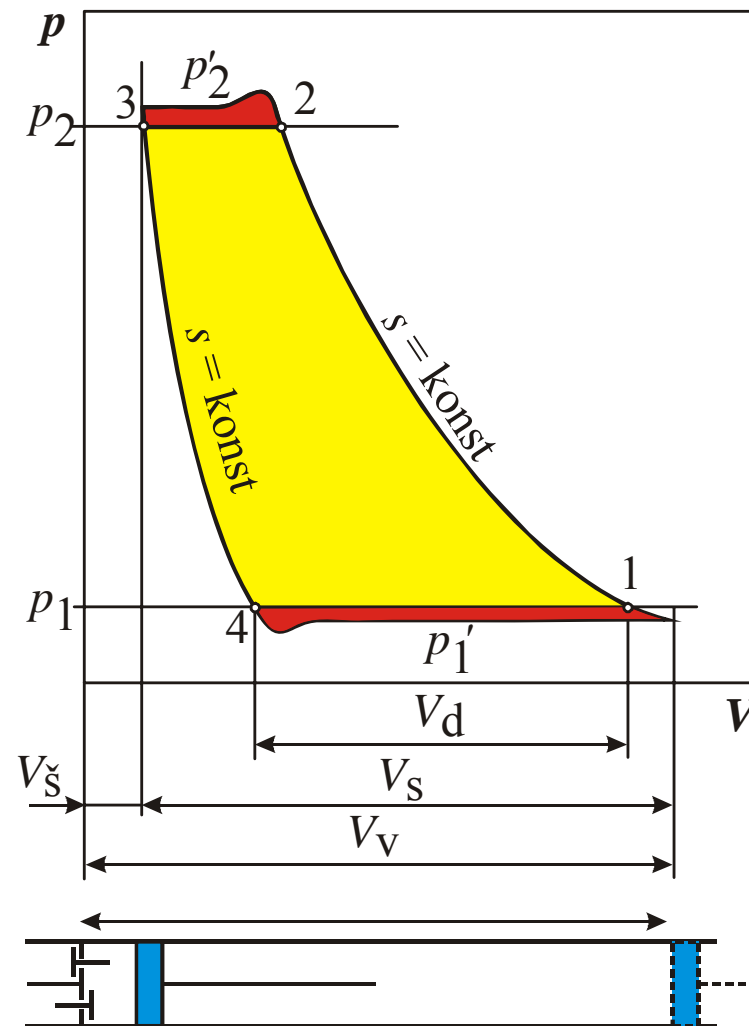
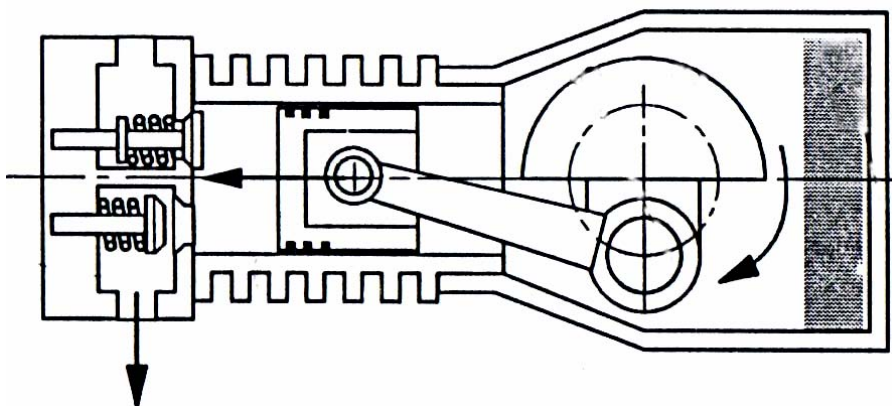




**VOLUMETRIČNI KOMPRESORJI**

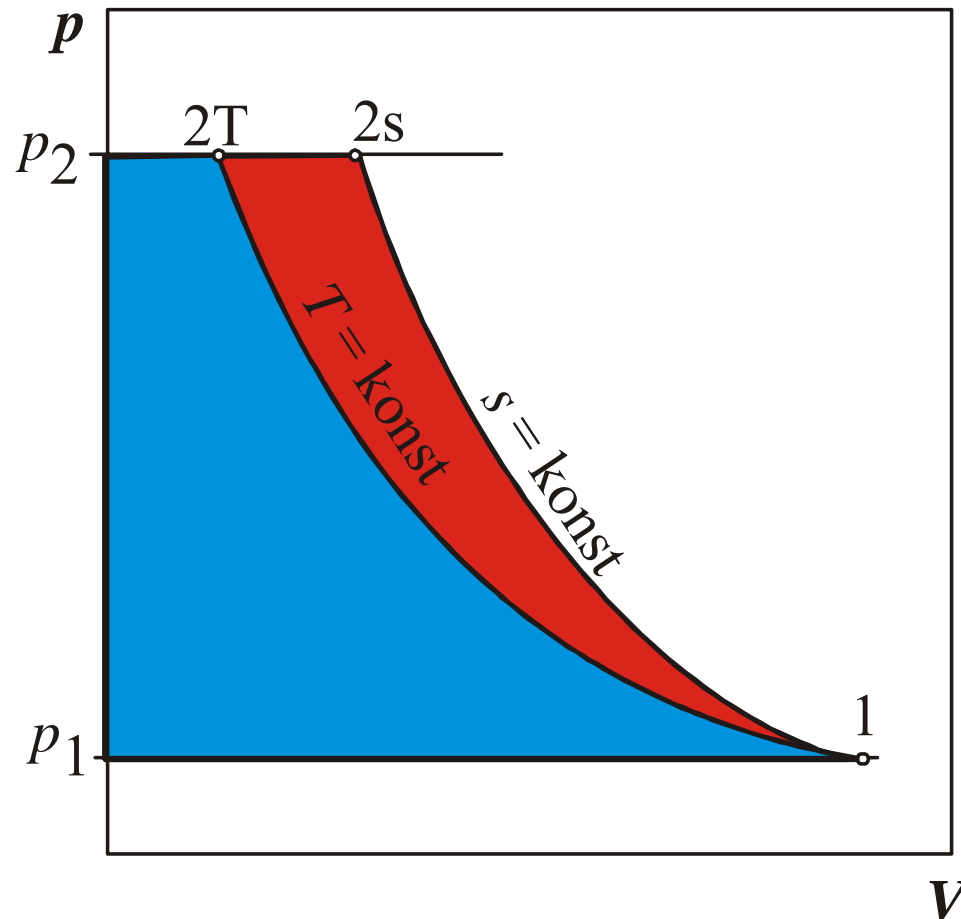


**BATNI KOMPRESORJI**



**BATNI KOMPRESORJI**

**Primerjava med izentropno in izotermno kompresijo**



**Delo kompresije**

**Izentropna kompresija**

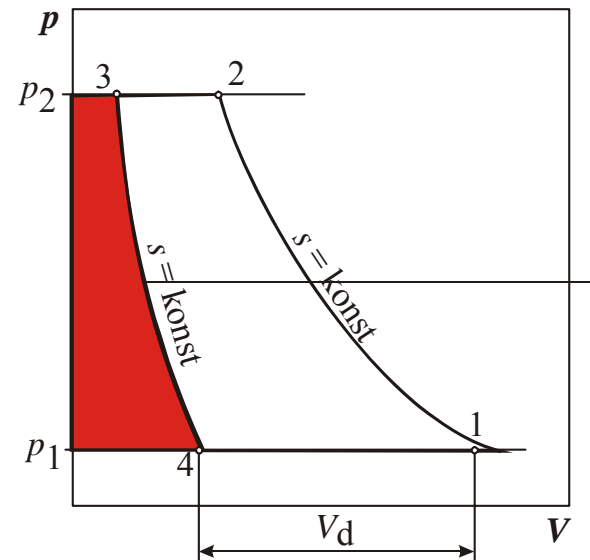
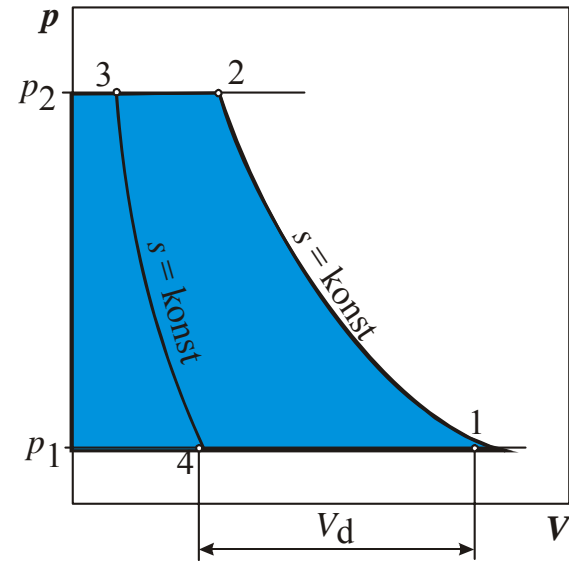
$$W_{tK} = \int_{p_1}^{p_2} V dp = m \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot R \cdot T_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]$$

**Sprememba temperature**

$$T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

**Izentropna ekspanzija škodljivega volumna**

$$W_{tE} = m \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot R \cdot T_4 \left[ \left( \frac{p_3}{p_4} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]$$



**BATNI KOMPRESORJI**

**Teoretično delo kompresorja pri izentropni kompresiji**

**Delo, ki je potrebno za to, da se delovni snovi poveča tlak:**

$$\Delta p = p_2 - p_1$$

## Dejanska kompresija

Nepovračljiva adiabatna:  $n > \kappa$

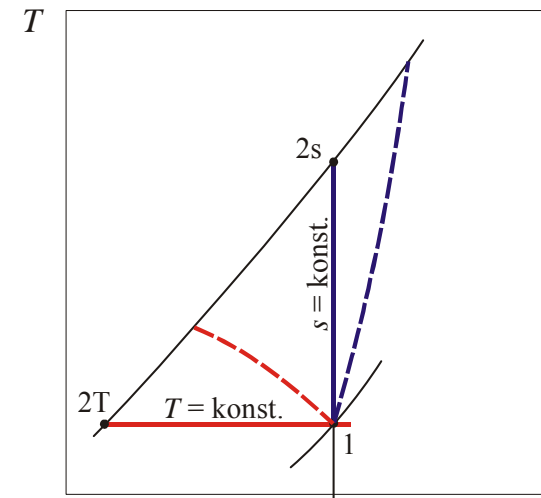
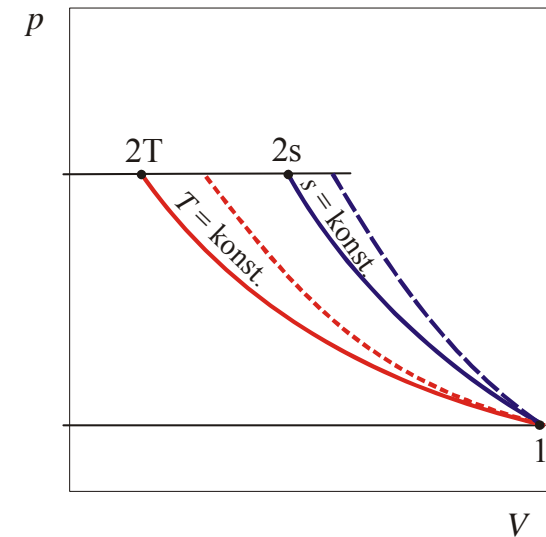
$$s_{2dej} > s_{2id}$$

Delo kompresorja pri dejanski kompresiji:

$$W = p_1 \cdot V_D \cdot \frac{n}{n-1} \cdot \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

Delo na gredi kompresorja

$$W_e = W \cdot \eta_e$$



**Kompresor in sistem**

**VEČSTOPENJSKA KOMPRESIJA**

$$V_D \approx (V_V - V_4)$$

$$V_{\check{s}} = (0,04 - 0,08) \cdot V_V$$

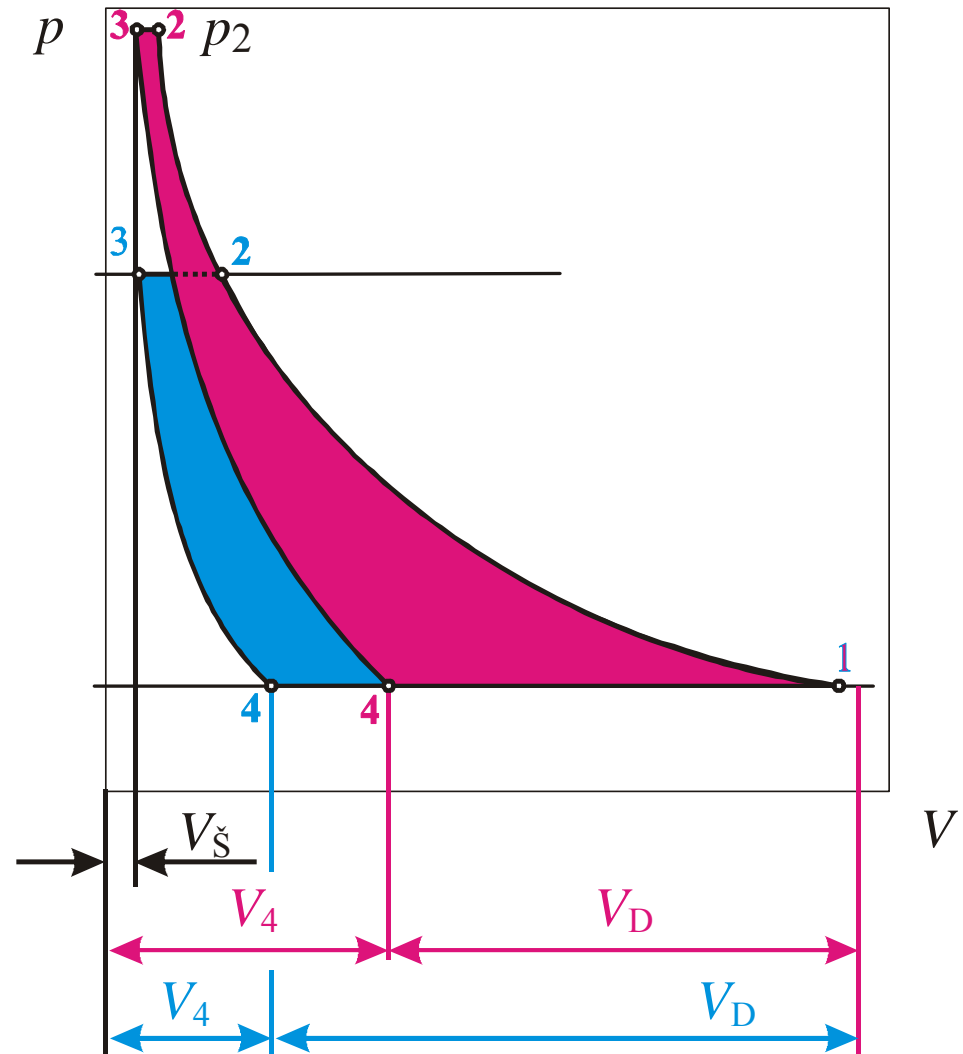
$$V_V = V_4 + V_D = V_{\check{s}} + V_G$$

**z naraščanjem tlaka  $p_2$  pri nespremenjeni gibni prostornini:**

$$V_4 \rightarrow V_V \Rightarrow \frac{V_D}{V_G} \rightarrow 0$$

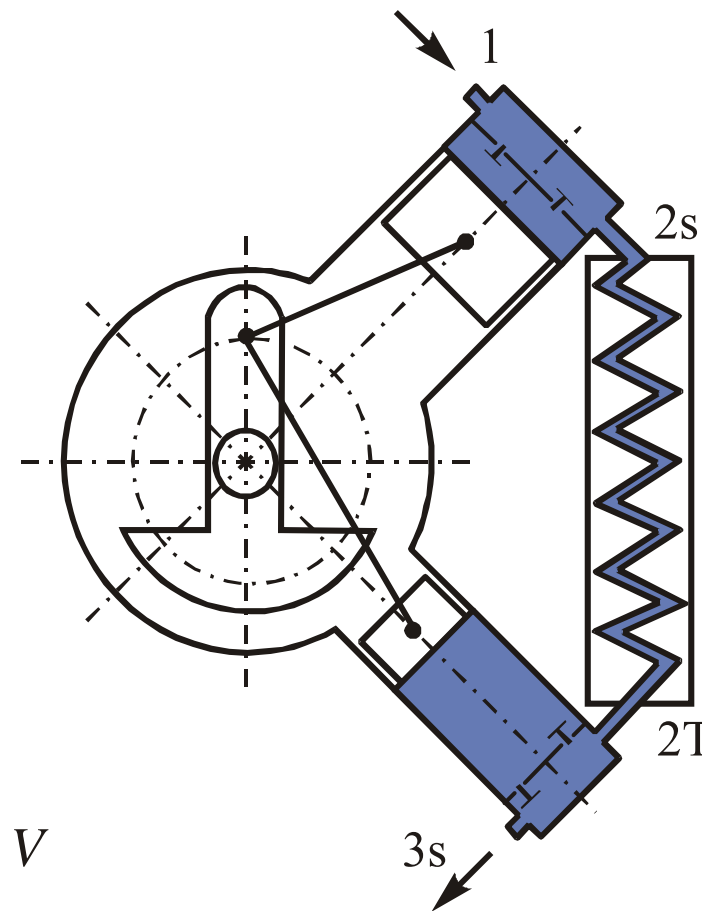
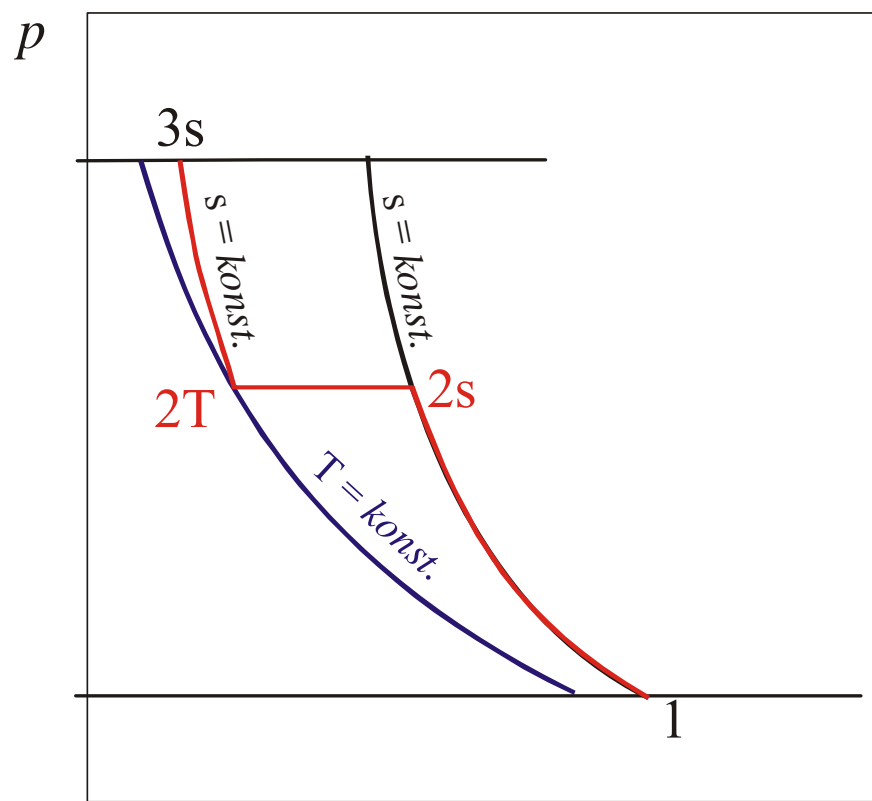
**Kompresijsko razmerje ene stopnje:**

$$\frac{p_2}{p_1} < 5$$





**VEČSTOPENJSKA KOMPRESIJA**



## VEČSTOPENJSKA KOMPRESIJA

**Predpostavke:**

škodljivega volumna ni;  $V_{\xi} = 0$

$$T_1 = T_2$$

povračljive kompresije;  $p \cdot v^{\kappa} = konst.$

**Primer: dvostopenjska kompresija:**

$$W = W_{t12} + W_{t23} = m_d \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot R \cdot T_1 \cdot \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] + m_d \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot R \cdot T_2 \cdot \left[ \left( \frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]$$

$$\frac{\partial(W_{t1} + W_{t2})}{\partial p_2} = 0 \Rightarrow \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_2} \Rightarrow \frac{p_2}{p_1} = \sqrt[2]{\frac{p_3}{p_1}}$$

**VEČSTOPENJSKA KOMPRESIJA**

*n*-stopenjska kompresija

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_2} = \frac{p_4}{p_3} = \dots = \frac{p_n}{p_{n-1}} \Rightarrow \frac{p_2}{p_1} = \sqrt[n]{\frac{p_n}{p_1}} = \sqrt[n]{\frac{p_\omega}{p_\alpha}}$$

**Število stopenj**

$$n \geq \frac{\ln \frac{p_n}{p_1}}{\ln \frac{p_2}{p_1}} = \frac{\ln \frac{p_\omega}{p_\alpha}}{\ln \frac{p_2}{p_1}}$$

**VEČSTOPENJSKA KOMPRESIJA**

**Prihranek dela**

