

# Lekcija 10

## *Hidraulički aktuatori*

Prof.dr.sc. Jasmin Velagić

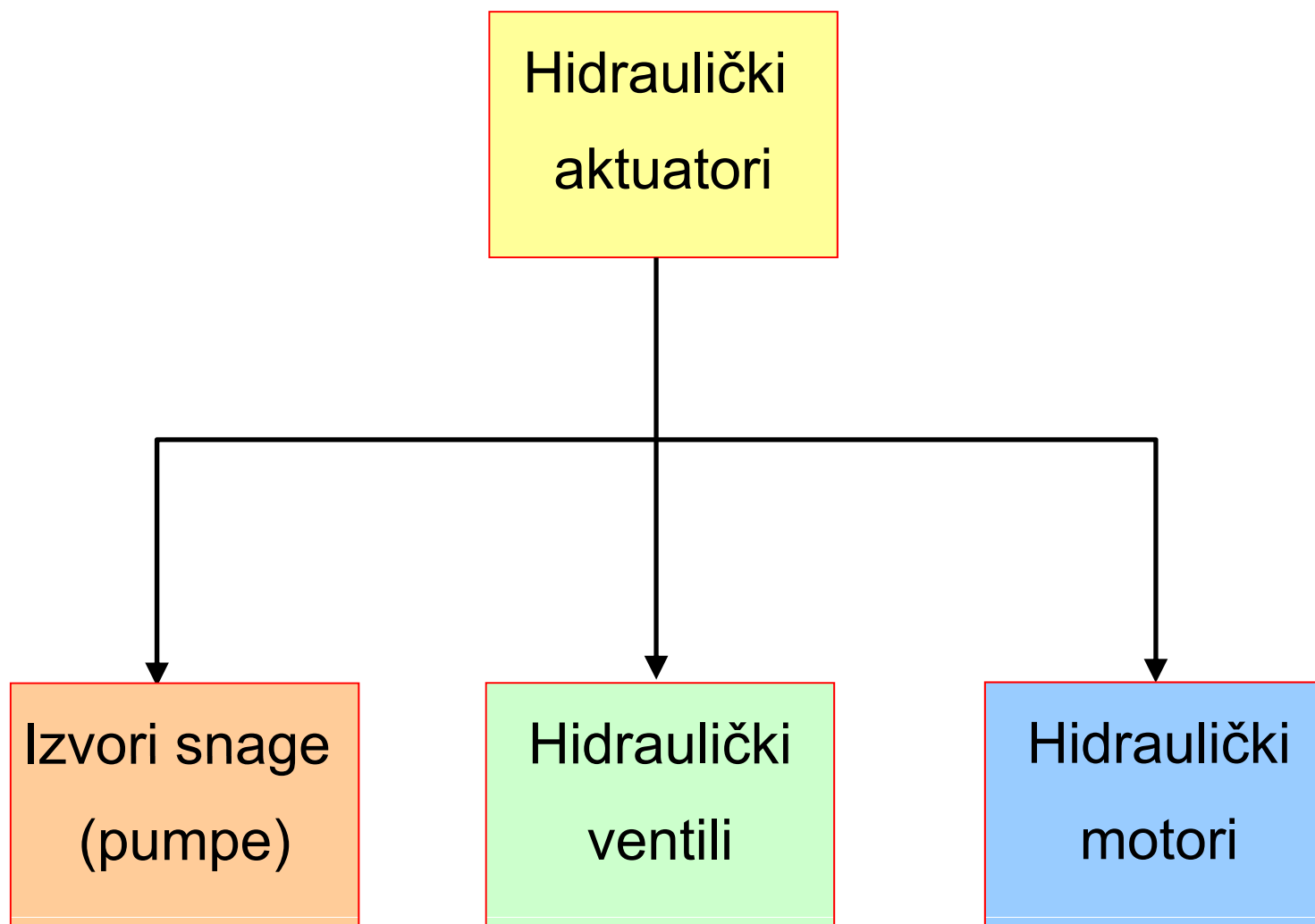
Elektrotehnički fakultet Sarajevo

Kolegij: Aktuatori

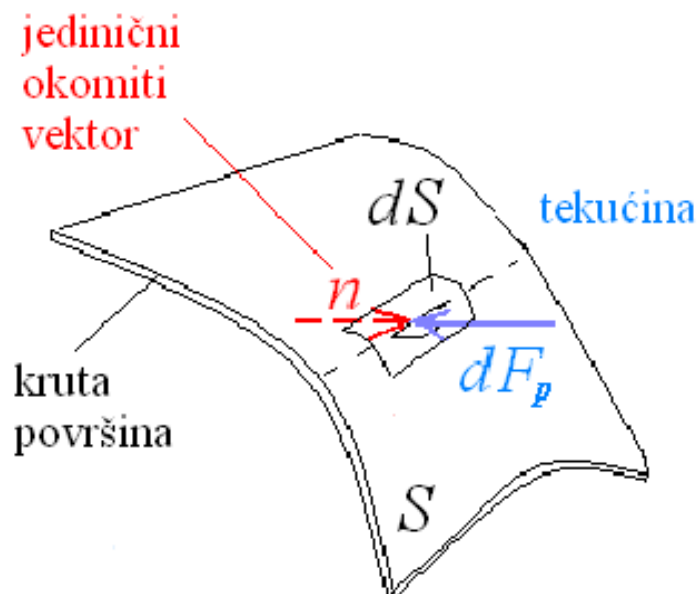
## 10.1 Osnove hidrauličkih aktuatora

- Hidraulički aktuatori transformiraju hidrauličku energiju pohranjenu u rezervoaru u mehaničku energiju pomoću prikladnih pumpi.
- Nosilac kretanja je tekućina, najčešće ulje.
- Pogodnosti hidrauličkih aktuatora:
  - velika brzina odziva (nekoliko puta manja vremenska konstanta),
  - veliki koeficijent pojačanja snage (do  $10^3$ ),
  - stabilnosti brzine,
  - manji volumen.
- Najveći nedostaci su:
  - potreban pomoćni izvor energije,
  - visoka razina šuma,
  - zagađenje okoline usljed istjecanja ulja.

## Podjela hidrauličkih akuatora



## Pritisak (sila tlaka) koji vrši tekućina



$$d\vec{F}_p = -p \vec{n} dS$$

$$\vec{F}_p = \iint_S d\vec{F}_p$$

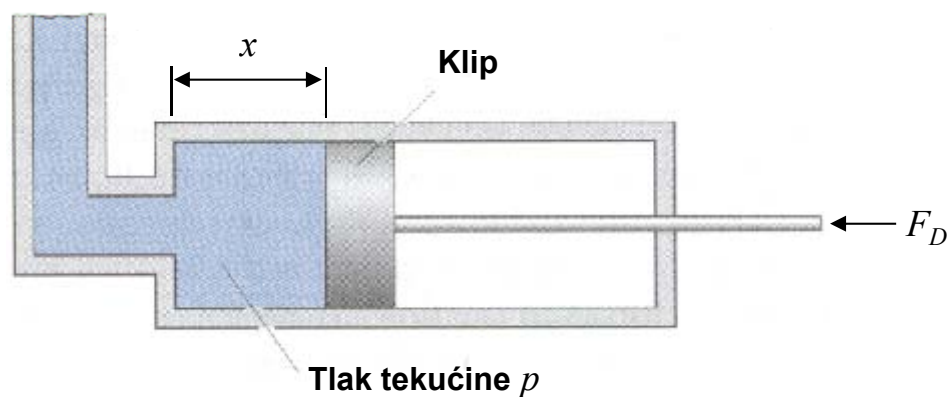
- Po definiciji, **sila tlaka (pritisak)** koji vrši tekućina na krutu površinu  $S$  je dana sa:

$$\vec{F}_p = - \iint_S p \vec{n} dS$$

$$\Rightarrow F_p = pS$$

ako je tlak fluida,  $p$ , jednolično raspoređen duž površine  $S$ .

## Hidraulički klip



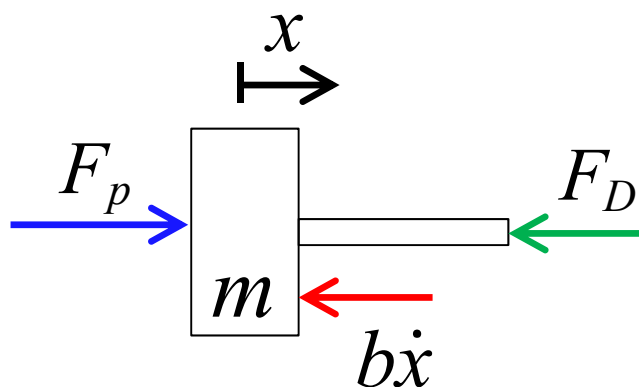
### Zadano:

- sila  $F_D$  koja djeluje na klip mase  $m$ .
- Tlak tekućine u komori je jednoličan i označen s  $p$ .

### Potrebno:

Odrediti dinamički model klipa.

## Hidraulički klip



Dinamički model:

$$F_p - F_D - b\dot{x} = m\ddot{x}$$

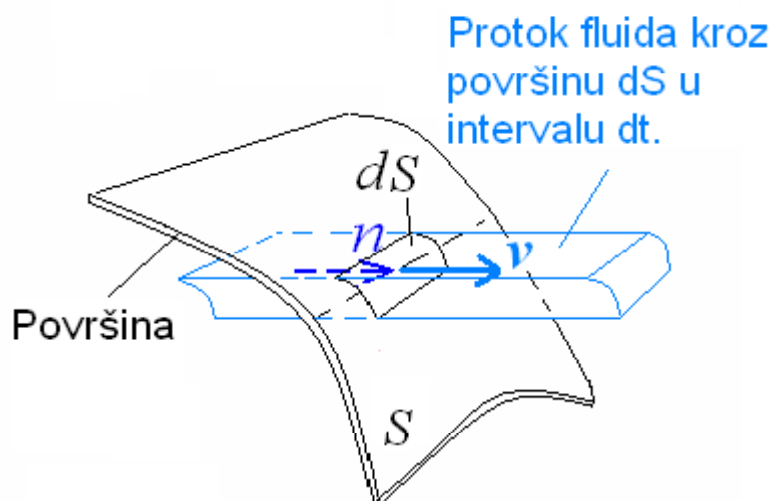
gdje je

$$F_p = p \times \frac{\pi D^2}{4}$$

Slijedi:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} = \frac{\pi D^2}{4} p - F_D$$

## Brzina toka mase



$$\delta \dot{m} = \rho \vec{v} \vec{n} dS$$

$$\dot{m} = \iint_S \delta \dot{m}$$

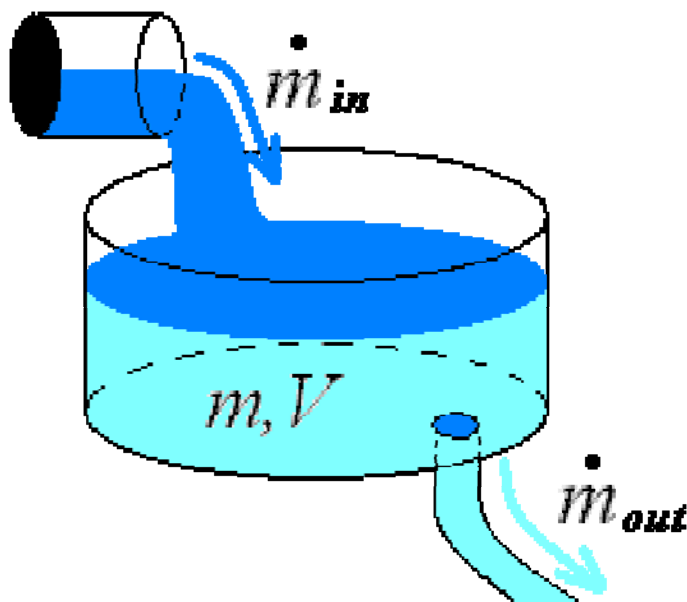
- Dan je fluid koji protječe brzinom  $v$ , tada je **brzina toka mase** kroz površinu područja  $S$  definirana sa:

$$\dot{m} = \iint_A \rho \vec{v} \vec{n} dS$$

$$\Rightarrow \dot{m} = \rho \bar{v} S$$

ako je fluid nekomprimiran ( $\rho = C$ ) i  $\bar{v}$  je prosječna brzina kroz površinu.

## Jednadžba kontinuiteta



$$\frac{d}{dt} \underbrace{(\rho V)}_{=m} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}$$

gdje:

- $\rho$  je gustoća fluida,  $V$  je volumen fluida,  $m$  je masa fluida,
- $\dot{m}_{in}$  je brzina toka mase u propisanom dijelu sistema,  $\dot{m}_{out}$  je brzina toka mase izvan propisanog dijela.



## 10.2 Pumpe

- Rade na principu pretvorbe mehaničke energije u tlačnu energiju fluida → princip istiskivanja.
- Vrste pumpi:
  - zupčaste
  - klipne
  - vijračne

**WILO – Star – RS**  
**Cirkulacijska pumpa**



# Pumpe

## ▪ Karakteristike

- jednostruka horizontalna centrifugalna pumpa,
- 3 brzine vrtnje,
- kućište može biti iz bronce ili iz lijevanog željeza, rotor je iz GF – PP, a vratilo iz nehrđajućeg čelika,
- radni fluid može biti: voda ili mješavina vode i glikola u omjeru 1:1,
- brzina vrtnje 1100 do 2200 okr/min,
- temperatura radnog medija: -10°C do 110°C,
- maksimalni radni tlak 10 bar,
- pokreće je jednofazni dvopolni asinhroni motor.

## ▪ Primjene

- sistemi za grijanje, hlađenje i klimatizaciju (kao cirkulacijska i recirkulacijska pumpa).

## Pumpe

- Maksimalna količina ulja koja se može istisnuti:

$$Q_i = V_i n,$$

gdje je:  $Q_i$  – idealna (maksimalna) vrijednost protoka,  
 $V_i$  – istisni volumen (određen dimenzijama pumpe),  
 $n$  – broj okretaja pumpe.

- Efektivna količina ulja:

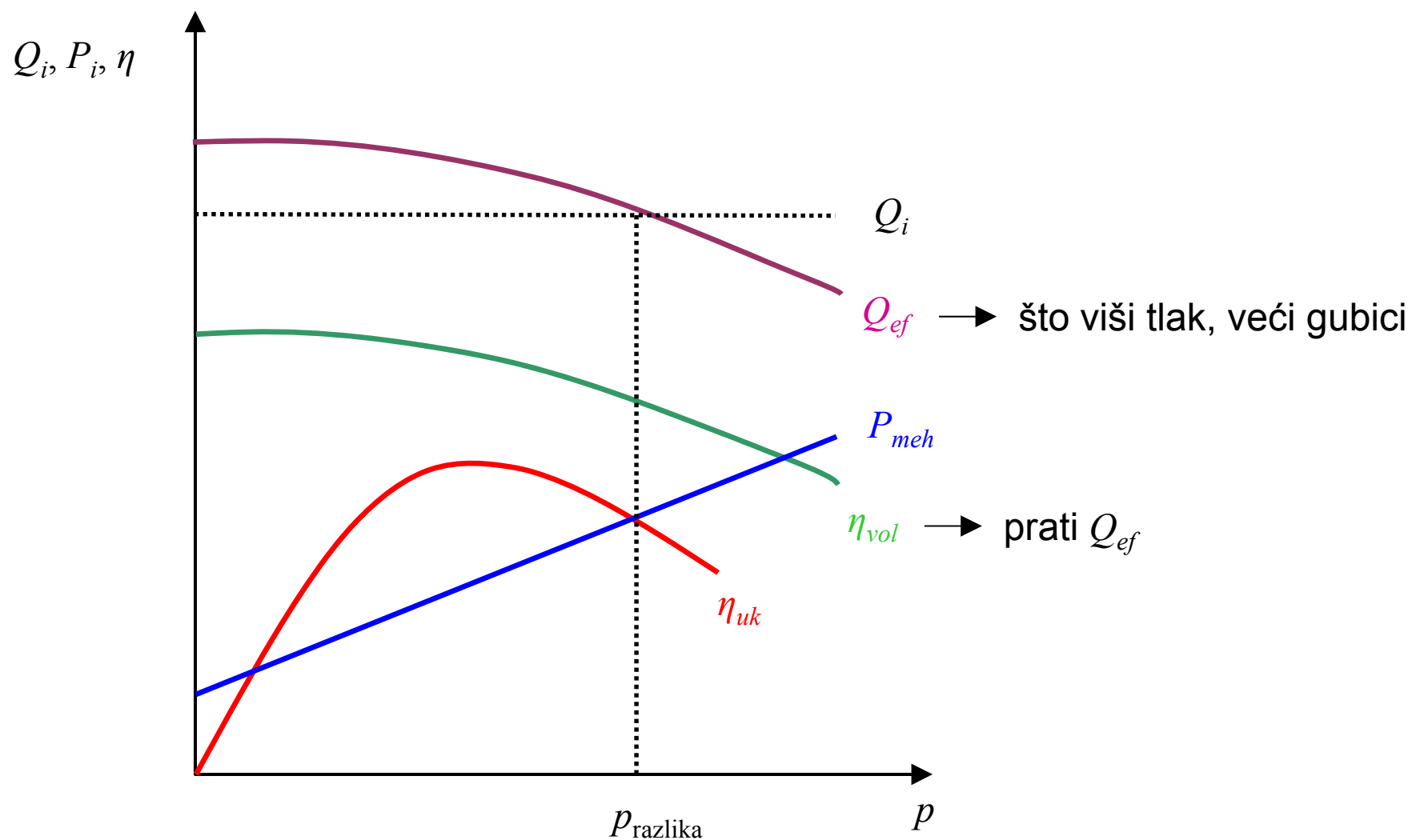
$$Q_{ef} = Q_i - Q_g = Q_i \eta_{vol},$$

gdje je:  $Q_g$  – količina izgubljenja zbog nesavršenog brtvljenja,  
 $\eta_{vol}$  – količinski (volumenski) stupanj djelovanja.

- Potrebna snaga:

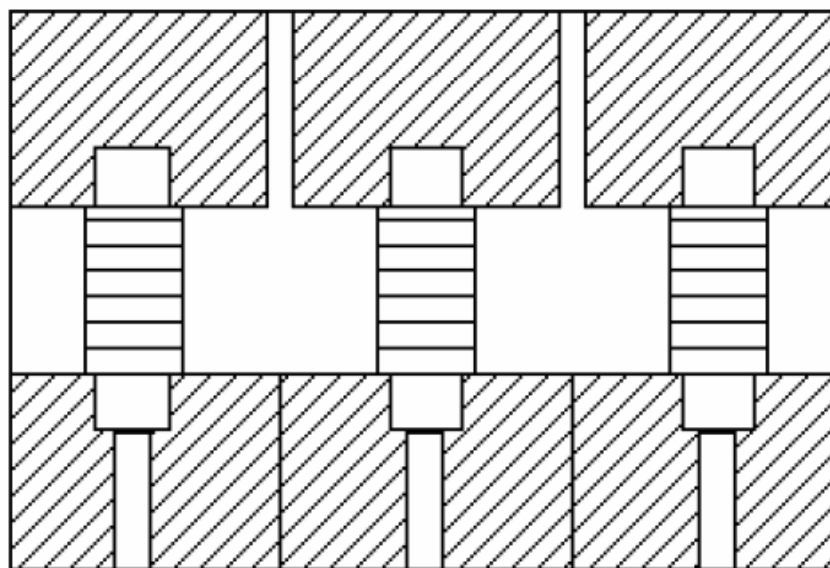
$$P_{meh} = \frac{Q_i p}{\eta_{meh}} = \frac{Q_{ef}}{\eta_{vol}} \frac{p}{\eta_{meh}} = \frac{Q_{ef} p}{\eta_{uk}}.$$

# Statične karakteristike pumpe

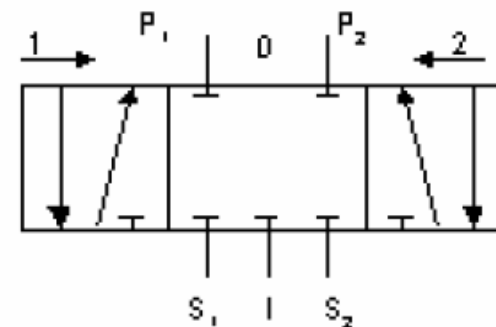


## 10.3 Hidraulički ventil

- Upravljaju protokom ulja od izvora energije (pumpe) do potrošača (motora).
- Karakteristične vrijednosti kod hidrauličkog ventila:
  - nazivni tlak → do 40 Mpa (maksimalni trajni tlak, koji još omogućuje besprijekorni rad),
  - nazivni promjer → 4 – 63 mm (unutarnji promjer priključnog voda → maksimalno dozvoljena protočna količina),
  - način napajanja → ugradnja u cjevovod, baterijsko ili pločasto ulančenje.



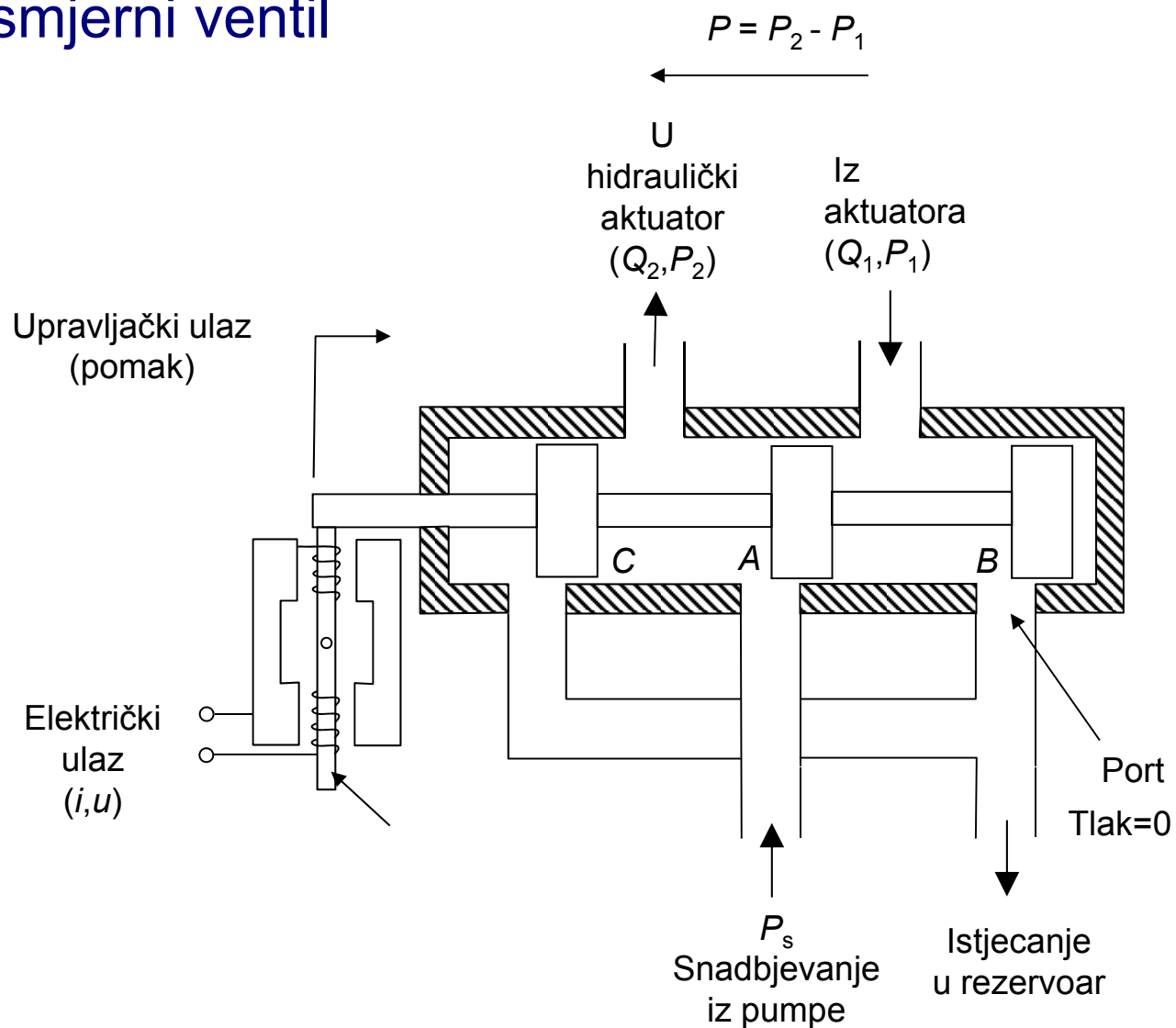
5 upravljanih priključaka  
3 sklopna položaja → oznaka 5/3



I - PUMPA  
P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> - potrošač  
S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> - spremnici ulja

# Hidraulički ventil

## Višesmjerni ventil



## Hidraulički ventil

- Jednadžba ventila je inherentno nelinearna.
- Linearizirana jednadžba ventila u radnoj tački može se napisati kao:

$$dQ = k_q \delta U - k_c \delta P,$$

$$Q = k_q u - k_c p,$$

gdje su:

$$Q = \frac{Q_1 + Q_2}{2}$$

– prosječni volumni protok u hidraulički aktuator.

$$P = P_2 - P_1$$

– razlika tlakova na klipu hidrauličkog aktuatora.

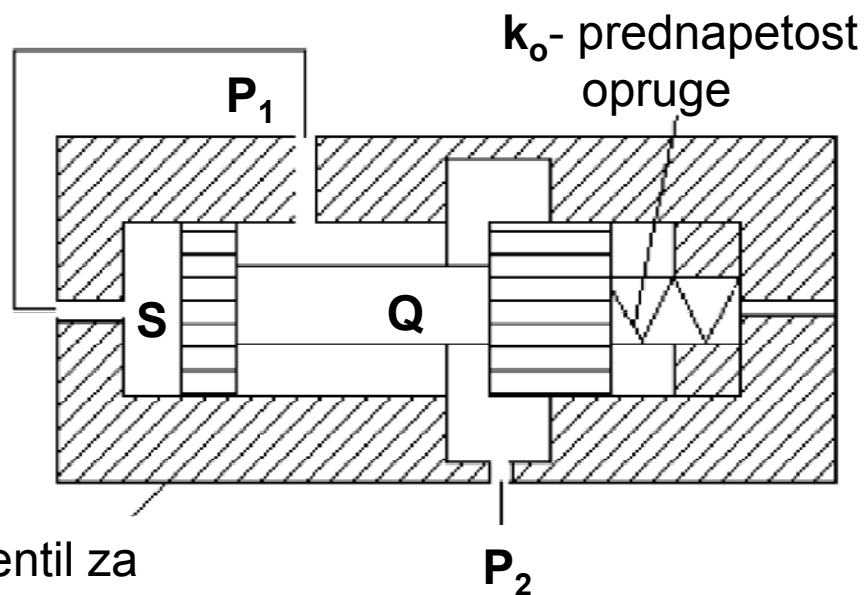
$$k_q = \left( \frac{\delta Q}{\delta U} \right)_P, k_c = \left( \frac{\delta Q}{\delta P} \right)_U$$

– koeficijent pojačanja toka i koeficijent tlaka tekućine.

$$k_p = \left( \frac{\delta P}{\delta U} \right)_Q = \frac{k_q}{k_c}$$

– koeficijent osjetljivosti tlaka.

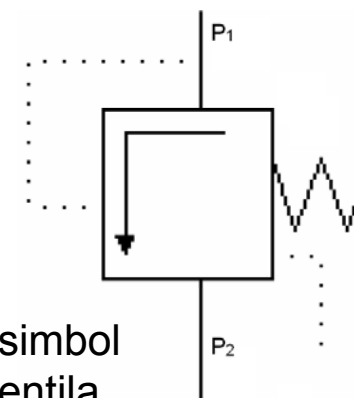
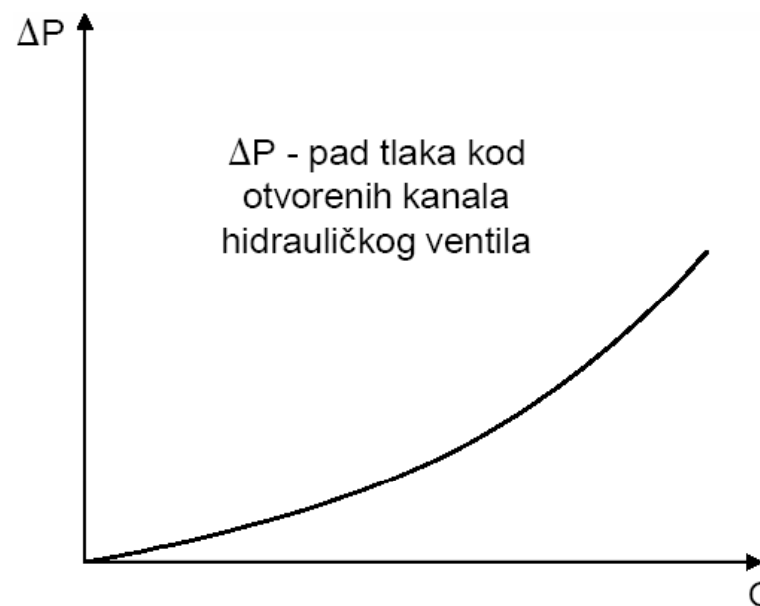
# Hidraulički tlačni ventili



Ventil za ograničavanje tlaka (maksimalni tlak) u hidrauličkom postrojenju.

$$P_1 > k_0/S \rightarrow P \sim \text{konstant.}$$

$$P_1/S < k_0 \rightarrow \text{ventil zatvoren.}$$

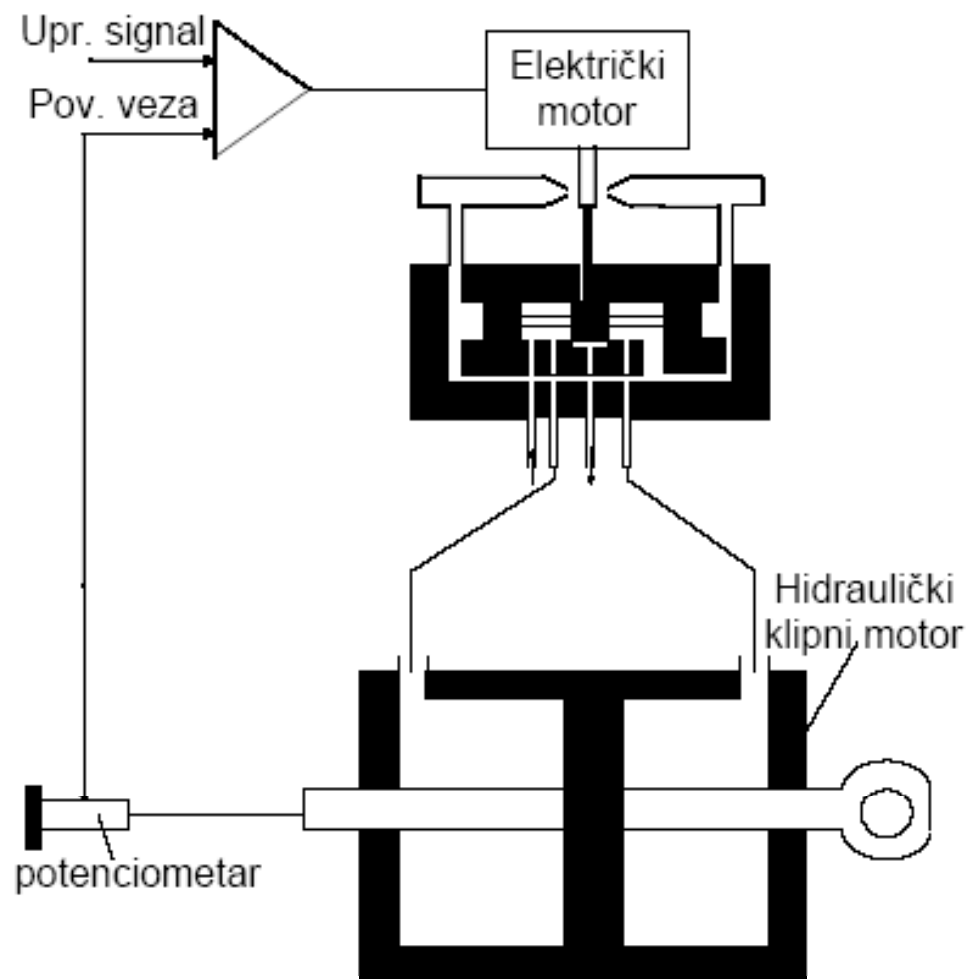


Standardni simbol za crtanje ventila



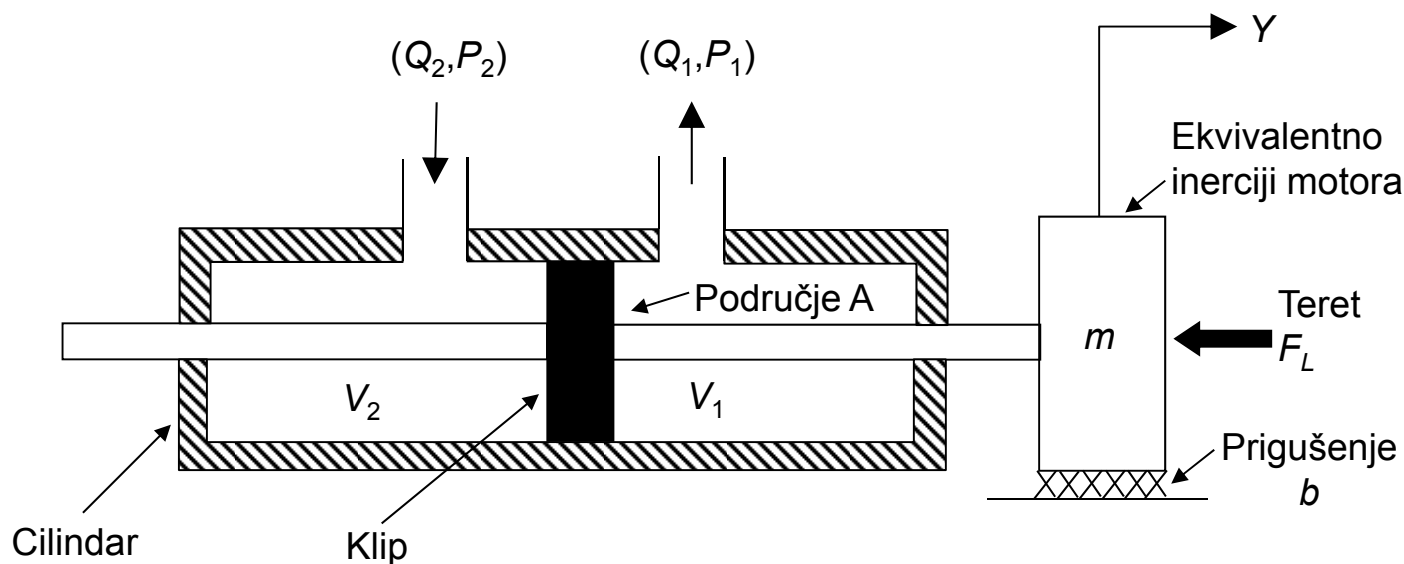
## Hidraulički ventil

- **Hidraulički servoventili**  
– analogni elementi
- U kombinaciji s električkim ulaznim signalom elektrohidraulički servo sistem.



## 10.4 Hidraulički motor

### Hidraulički aktuator (cilindar + klip)



- Linearizirana inkrementalna jednačba motora u radnoj tački je:

$$dQ = S \frac{d\delta Y}{dt} + \frac{V}{2\beta} \frac{d\delta P}{dt} \quad \text{ili} \quad q = S \frac{dy}{dt} + \frac{V}{2\beta} \frac{dp}{dt},$$

gdje je  $\beta = \left( \frac{\delta Q}{\delta Y} \right)_P$  volumni modul elastičnosti (inverzno od sabijanja tekućine, mjereno na konstantnoj temperaturi).

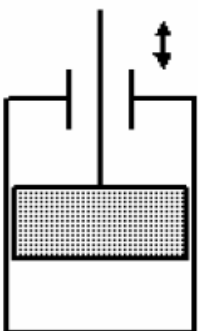
## Hidraulički motor

- Jednadžba inkrementalnog kretanja  $\delta Y$  oko radne tačke, linearizirana inkrementalna jednadžba tereta glasi:

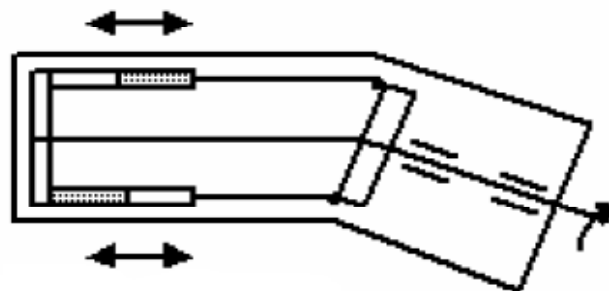
$$m \frac{d^2 \delta Y}{dt^2} + b \frac{d \delta Y}{dt} = S \delta P - \delta F_L \quad \text{ili} \quad m \frac{d^2 y}{dt^2} + b \frac{dy}{dt} = S p - f_L.$$

### Vrste motora

Klipni motor



Rotacijski klipni motor



linijsko kretanje

rotacijsko kretanje

### Moment motora:

$$M = \frac{V_i}{2\pi} \Delta p,$$

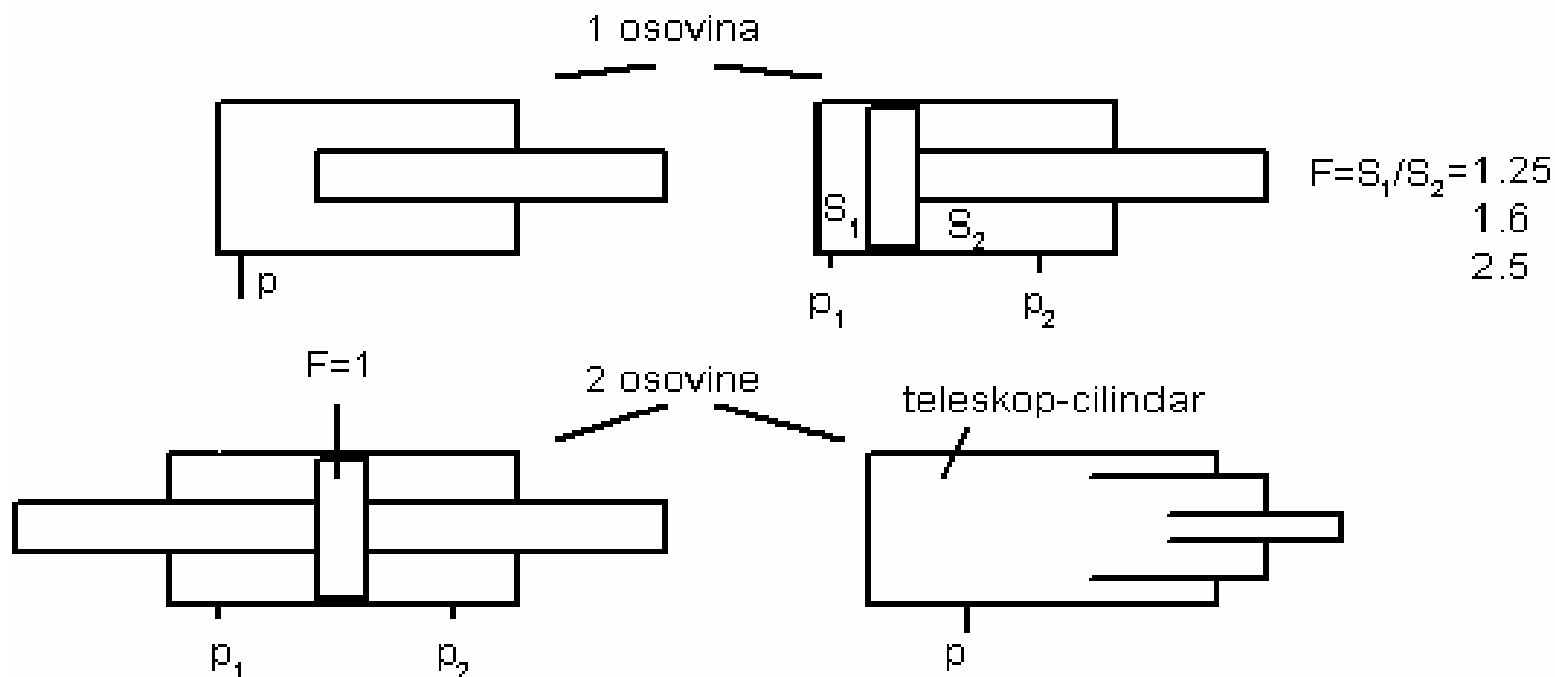
$V_i$  – istisni volumen,  $\Delta p$  – razlika tlaka na ulazima.

### Brzina motora:

$$n = \frac{Q_u}{V_i} \eta_{vol},$$

$Q_u$  – struja ulja.

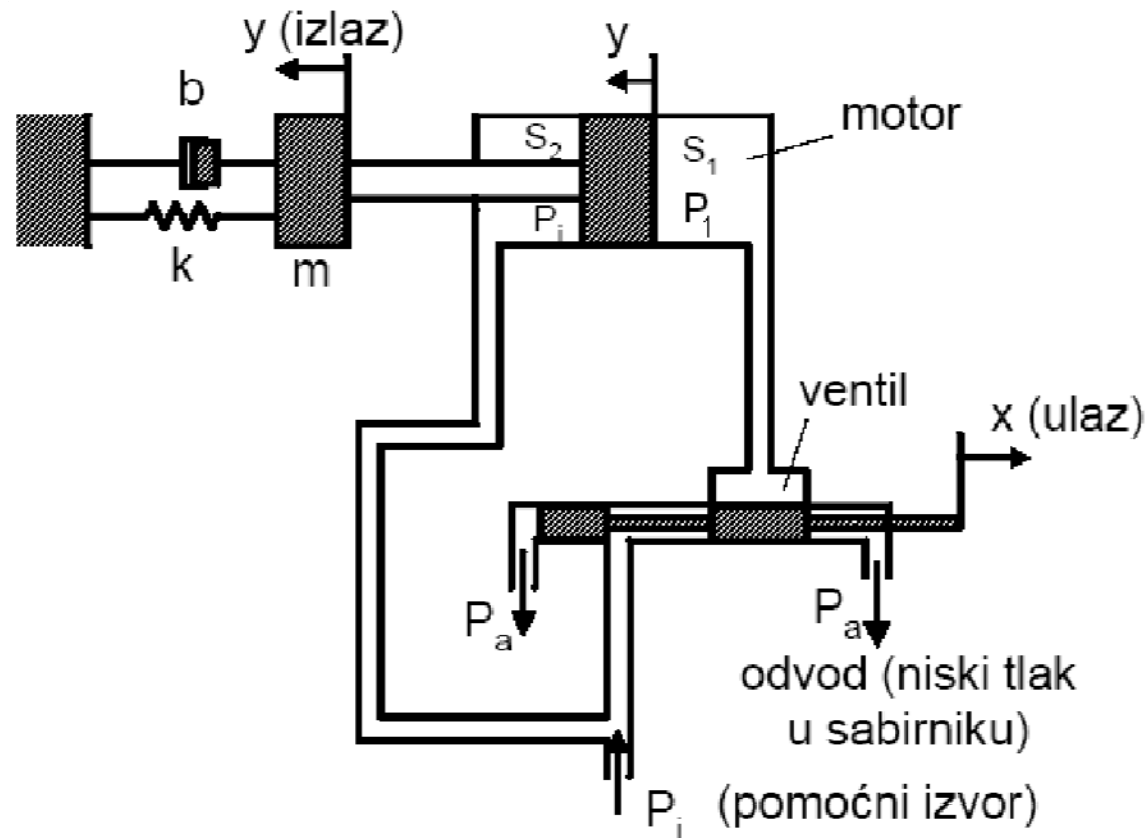
## Vrste radnog cilindra hidrauličkog motora



- Karakteristične vrijednosti hidrauličkog motora:

$\eta_{meh}$	→ 0.6-0.97,
Promjer klipa	→ 7-500 mm,
Pomaci	→ 10 mm – više metara (teleskopske cijevi)
Maksimalni tlak	→ do 60 Mpa,
Maksimalna brzina	→ < 1 m/s.

## Primjer: “motor + ventil s kliznim razvodom”



- Nesimetričan slučaj  $\rightarrow S_1 > S_2 \rightarrow$  isti tlak lijevo i desno  $\rightarrow$  klip ide u lijevo.

## Analiza statičkog i dinamičkog ponašanja

- Ulazna veličina: pomak ventila  $x(t)$ ,
- Izlazna veličina: pomak  $y(t)$ ,
- Model kontakta s okolinom: prigušenje  $b$  i krutost  $k$ .
- Opća jednačba protoka:

$$Q = CS \sqrt{\frac{2g}{\rho} \Delta p}.$$

- Kretanje ventila u desno  $\rightarrow x > 0$ .
- Protok kroz ventil:

$$Q = CS \sqrt{\frac{2g}{\rho} (p_i - p_1)} = kx \sqrt{(p_i - p_1)},$$

$$k = CO \sqrt{\frac{2g}{\rho}}, \quad O - \text{opseg otvora.}$$

## Analiza statičkog i dinamičkog ponašanja

- Kretanje ventila u lijevo  $\rightarrow x < 0$ .
- Protok kroz ventil:

$$Q = Kx\sqrt{(p_1 - p_a)} \Rightarrow p_a \ll p_1 \Rightarrow Q = Kx\sqrt{p_1}.$$

- Protok kroz motor:

$$Q = S_1 \frac{dy}{dt}. \quad \text{- vrijedi za oba smjera kretanja.}$$

- Sila na klip motora  $F$ :

$$F = p_1 S_1 - p_i S_2 \Rightarrow p_1 = \frac{F + p_i S_2}{S_1}.$$

**Napomena:** Pomakom ventila udesno, s obje strane klipa imamo  $p_i$ , ali on djeluje na različite površine ( $S_1 < S_2$ ) i time dolazi do pomaka klipa ulijevo.

Pomakom ventila ulijevo, s jedne strane je  $p_i$  (tj.  $p_1$ ), a s druge strane je niski atmosferski tlak  $p_a$  pa na klip djeluje samo  $p_i$  (a to je razlika za  $p_1$ ).

## Analiza statičkog i dinamičkog ponašanja

- Za  $x > 0$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{Q}{S_1} = \frac{Kx}{S_1} \sqrt{\frac{F + p_i S_2}{S_1}} = \frac{Kx}{S_1^{3/2}} \sqrt{F + p_i S_2}.$$

- Za  $x < 0$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{Q}{S_1} = \frac{Kx}{S_1} \sqrt{p_i - \frac{F + p_i S_2}{S_1}} = \frac{Kx}{S_1^{3/2}} \sqrt{p_i (S_1 - S_2) - F}.$$

- Vidljivo je da vrijedi:

$$\frac{dy}{dt} = f(x, F).$$

- Linearizacijom se dobiva:

$$\dot{y} = \left. \frac{\partial \dot{y}}{\partial x} \right|_0 x + \left. \frac{\partial \dot{y}}{\partial F} \right|_0 f$$



## Analiza statičkog i dinamičkog ponašanja

- Za  $x > 0$

$$\left. \frac{\partial y}{dx} = \frac{K}{S_1^{3/2}} \sqrt{p_i(S_1 - S_2) - F} \right|_0 = K_1,$$

$$\left. \frac{\partial y}{dF} = \frac{-Kx}{S_1^{3/2} \sqrt{p_i(S_1 - S_2) - F}} \right|_0 = -K_2.$$

- Za  $x < 0$

$$\left. \frac{\partial y}{dx} = \frac{K}{S_1^{3/2}} \sqrt{F + p_i S_2} \right|_0 = K'_1,$$

$$\left. \frac{\partial y}{dF} = \frac{Kx}{S_1^{3/2} \sqrt{F - p_i S_2}} \right|_0 = -K'_2.$$

- Jednadžba ravnoteže sile:

$$F = m \frac{d^2 y}{dt^2} + b \frac{dy}{dt} + ky + F_L$$

$F_L$  – sila tereta.

## Analiza statičkog i dinamičkog ponašanja

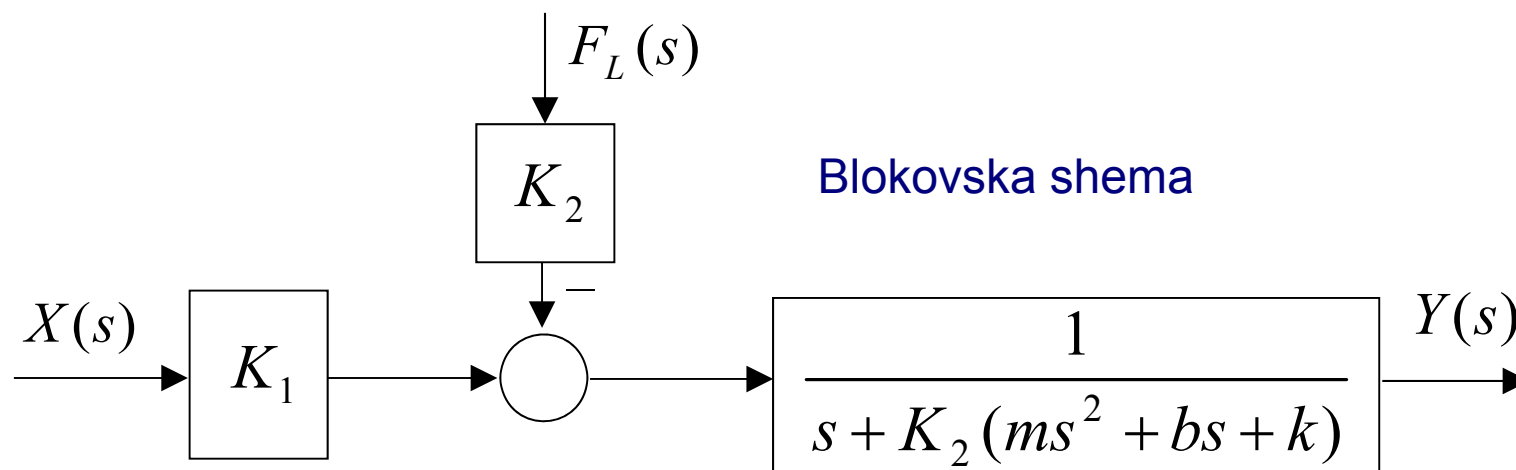
- Postupkom linearizacije u odabranoj radnoj tački slijedi:

$$f = m \frac{d^2 y}{dt^2} + b \frac{dy}{dt} + ky + f_L.$$

- Laplaceovom transformacijom dobije se:

$$Y(s) = \frac{K_1 X(s) - K_2 F(s)}{s}, F(s) = (ms^2 + bs + k)Y(s) + F_L(s),$$

$$Y(s) = \frac{K_1 X(s) - K_2 F_L(s)}{s^2 + K_2 (ms^2 + bs + k)}.$$



## Analiza statičkog i dinamičkog ponašanja

- Da bi element radio za male pomake  $\rightarrow 0 < x < 0 \rightarrow \mathbf{K}_1 = \mathbf{K}_1'$  i  $\mathbf{K}_2 = \mathbf{K}_2'$ , tj. koeficijent pojačanja u oba smjera kretanja ventila moraju biti jednaki.
- U tom slučaju vrijede sljedeće jednakosti:

$$p_i S_1 - p_i S_2 - F = F + p_i S_2 \Rightarrow p_i S_1 = 2(F + p_i S_2).$$

- Uz mali nominalni teret ( $F=0$ ) gornji uvjet je ispunjen samo ako je:

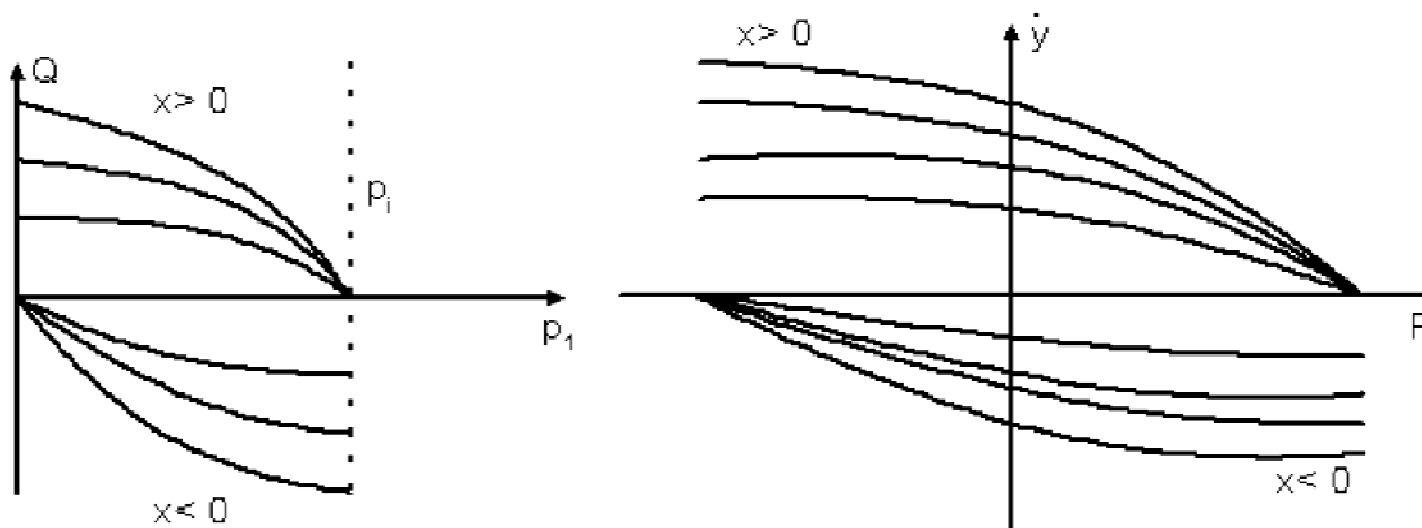
$$S_2 = \frac{S_1}{2} \Rightarrow p_1 = \frac{p_i}{2} \Rightarrow K_1 = \frac{K}{S_1} \sqrt{\frac{p_i}{2}} = \frac{K_1''}{S_1}.$$

- Ako je odabrana radna tačka za koju vrijedi  $x = 0 \rightarrow \mathbf{K}_2 = 0$  (jer je  $K_2 = x$ ). Tada hidraulički aktuator ima prijenosnu funkciju:

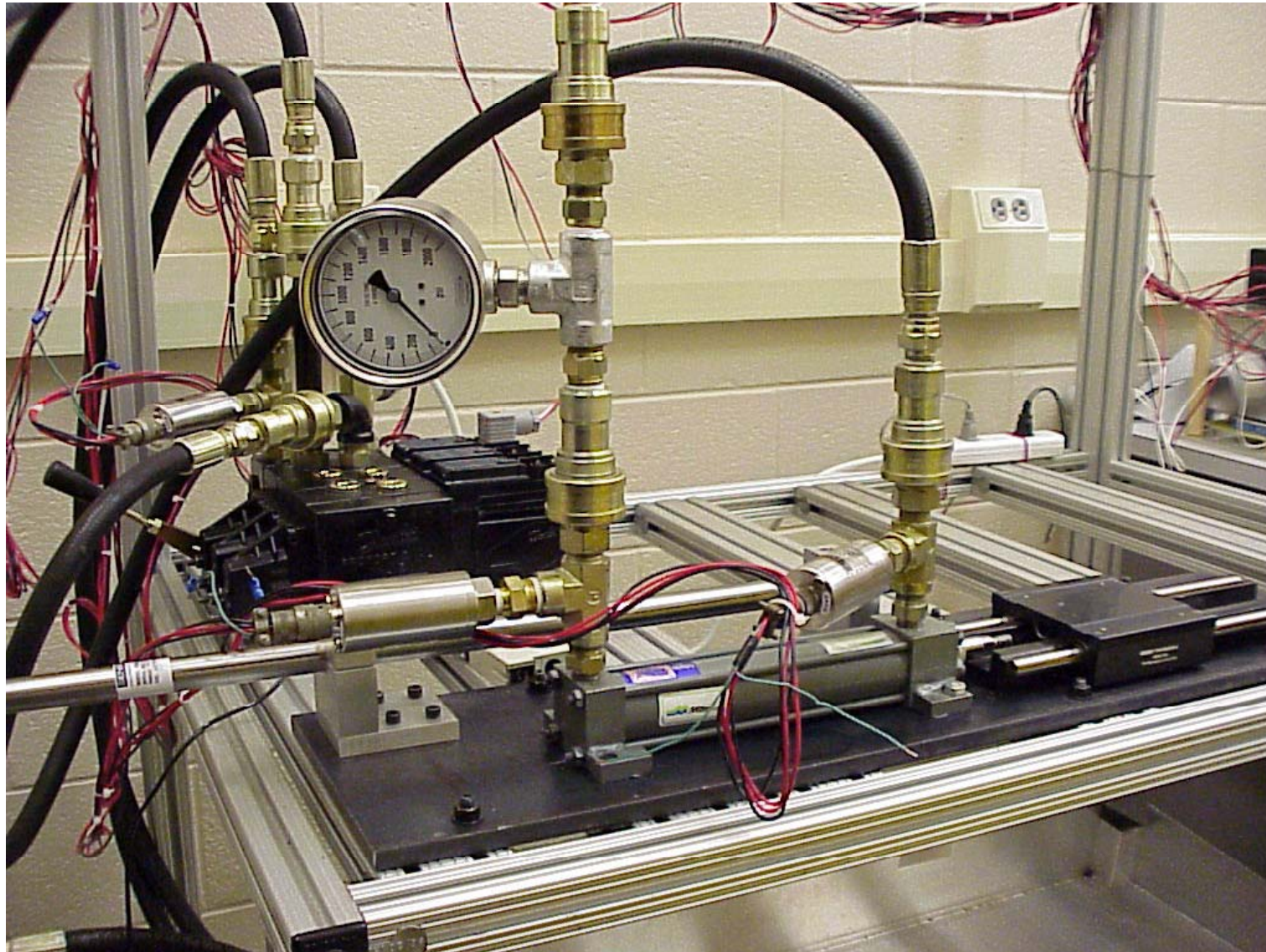
$$Y(s) = \frac{K_1}{s} X(s) = \frac{K_1''}{S_1} \frac{1}{s} X(s) \quad \text{I ponašanje.}$$

## Statičke karakteristike hidrauličkog akuatora

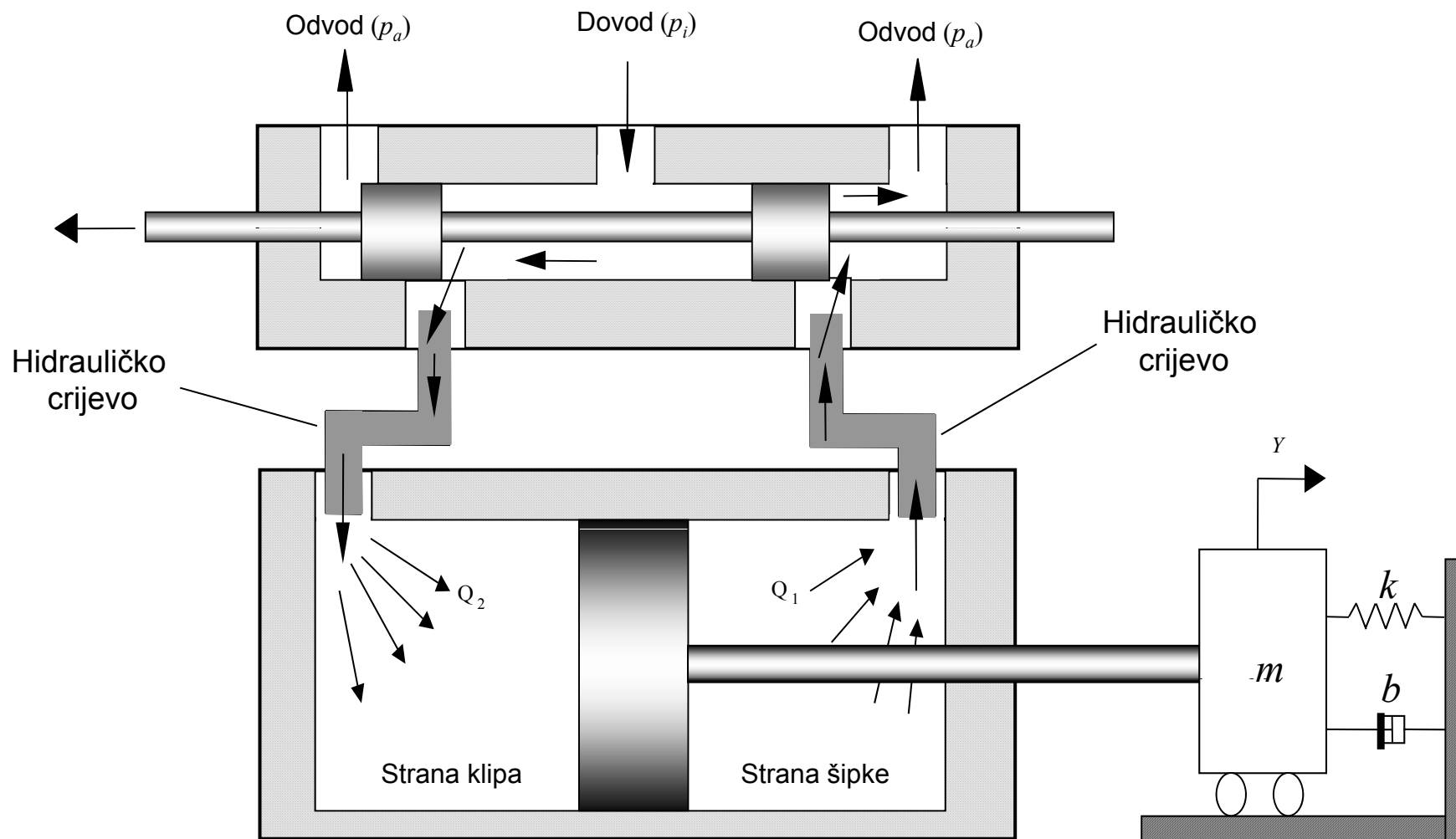
- Eksperimentalno određivanje statičkih karakteristika
- Mjerač potoka mjeri  $p_1$ , jer je  $Q = Kx\sqrt{p_i - p_1}$  za  $x < 0$ , odnosno  $Q = Kx\sqrt{p_1}$  za  $x > 0$ .
- $p_1$  se mijenja za različite konstantne iznose pomaka ventila  $x$  i dobiva se familija krivulja  $Q = f(p_1)$ .
- Budući da je  $F = p_1 S_1 - p_i S_2$ , iz izračunatog  $F$  određuje se  $\dot{y} = Q / S_1$ .



## 10.5 Hidraulički sistem upravljanja

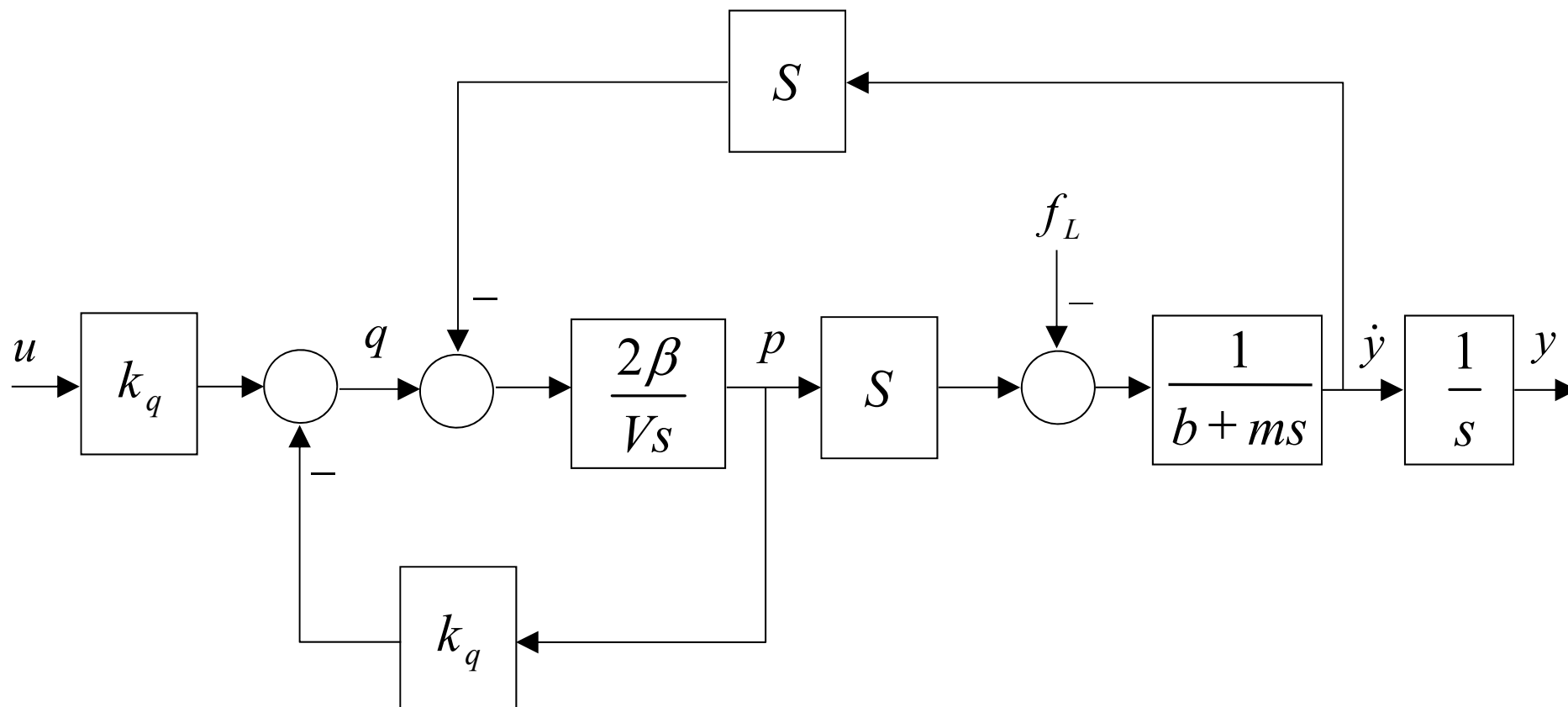


# Hidraulički sistem upravljanja



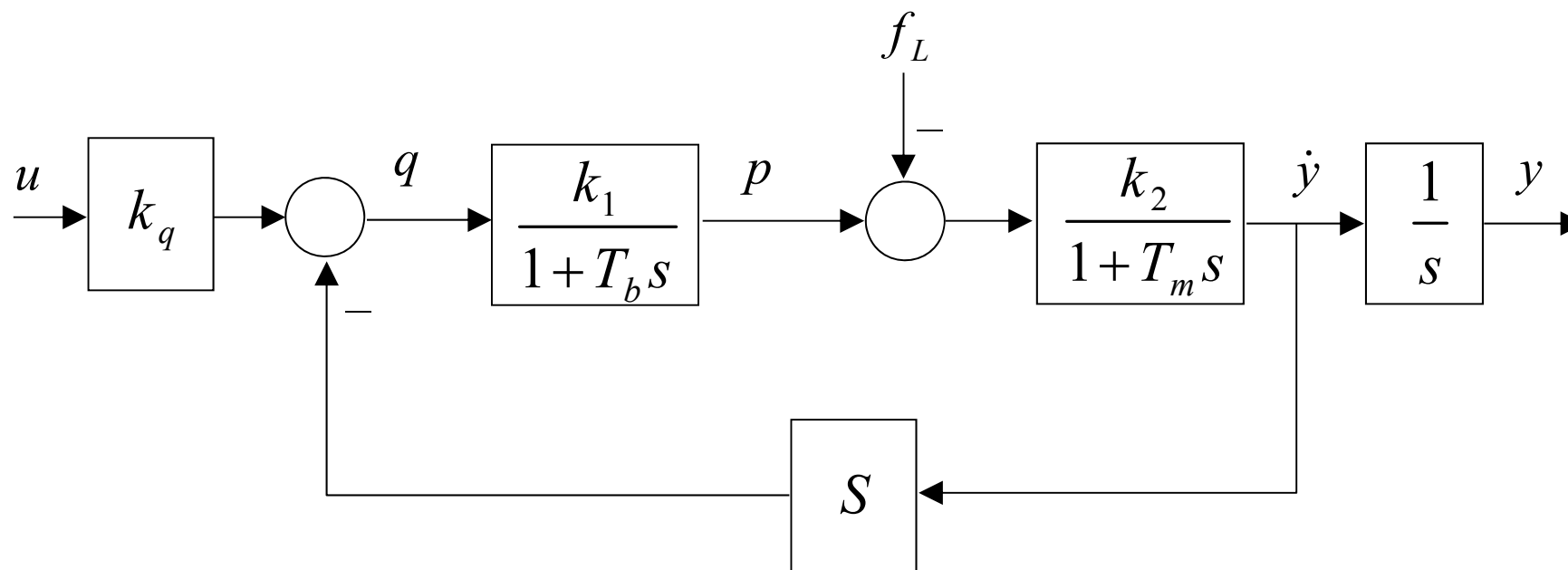
## Hidraulički sistem upravljanja – otvoreni sistem

- Na temelju dobivenih jednadžbi ventila, motora i tereta dobivaju se sljedeće blokovske sheme.



## Hidraulički sistem upravljanja – otvoreni sistem

- Ekvivalentni blok dijagram

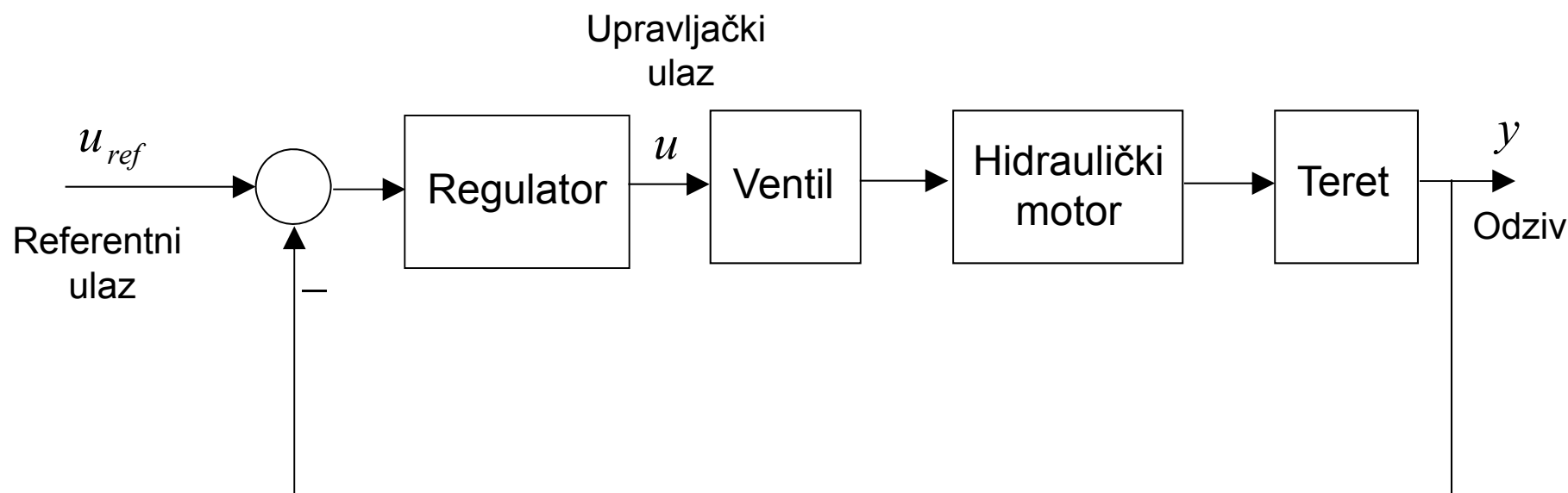


- Hidraulička vremenska konstanta u grani povratne veze pritiska – povezana s komprimiranjem fluida i volumenom fluida (ulja).
- Mehanička vremenska konstanta (dominantna) u povratnoj vezi brzine – povezana s inercijom i disipacijom energije (prigušenje).



## Hidraulički sistem upravljanja – zatvoreni sistem

- Regulator u direktnoj grani

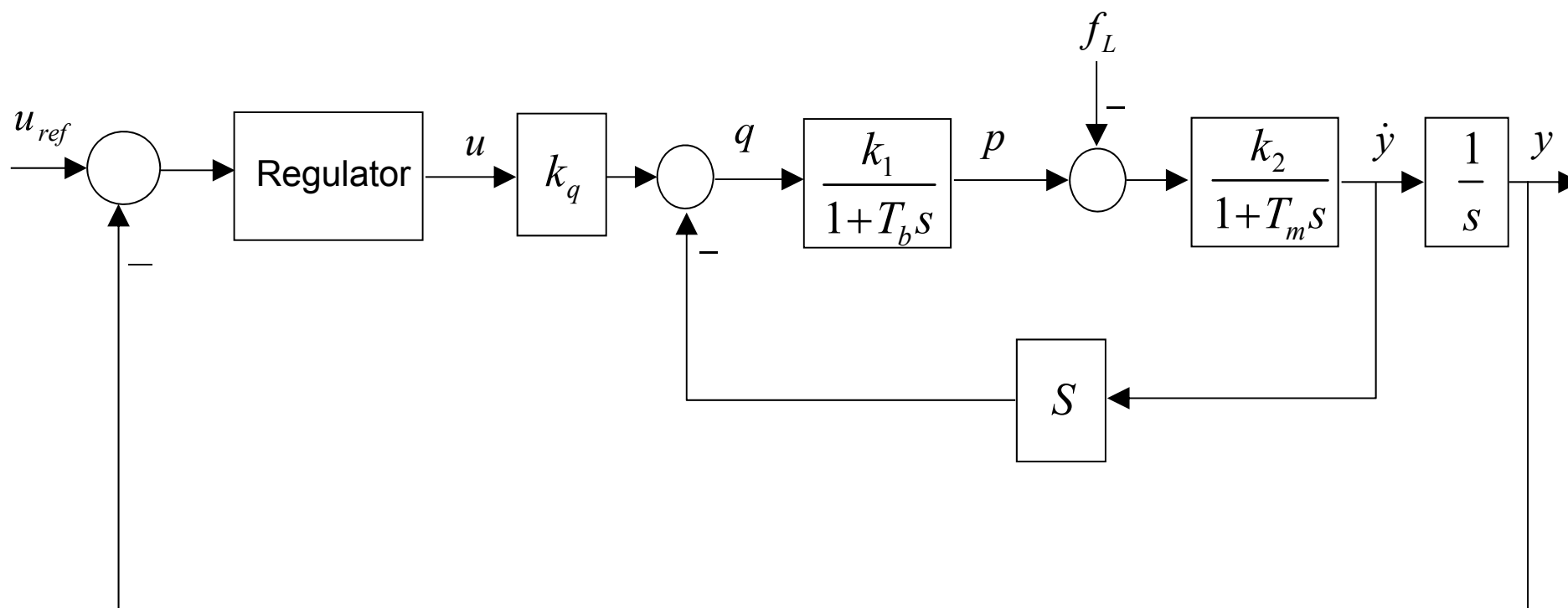


- Upravljački zakon (zakon regulacije):

$$u = f(u_{ref} - y)$$

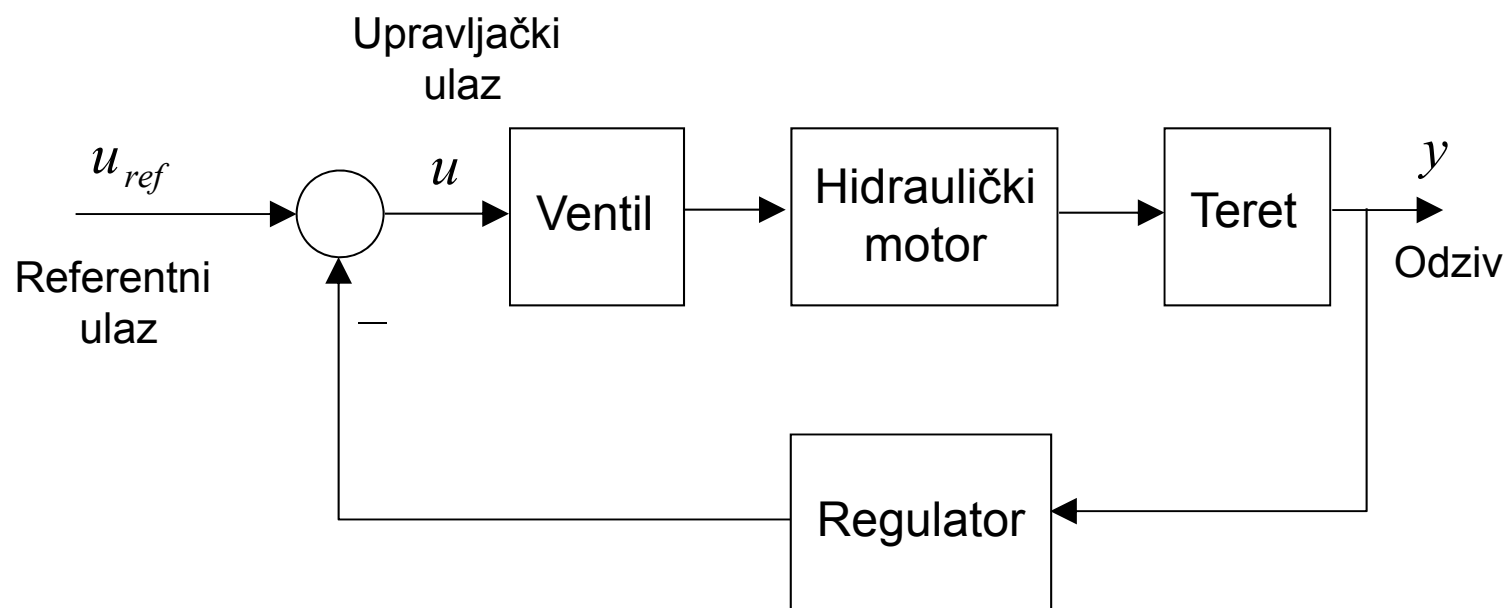
## Hidraulički sistem upravljanja – zatvoreni sistem

- Regulator u direktnoj grani



## Hidraulički sistem upravljanja – zatvoreni sistem

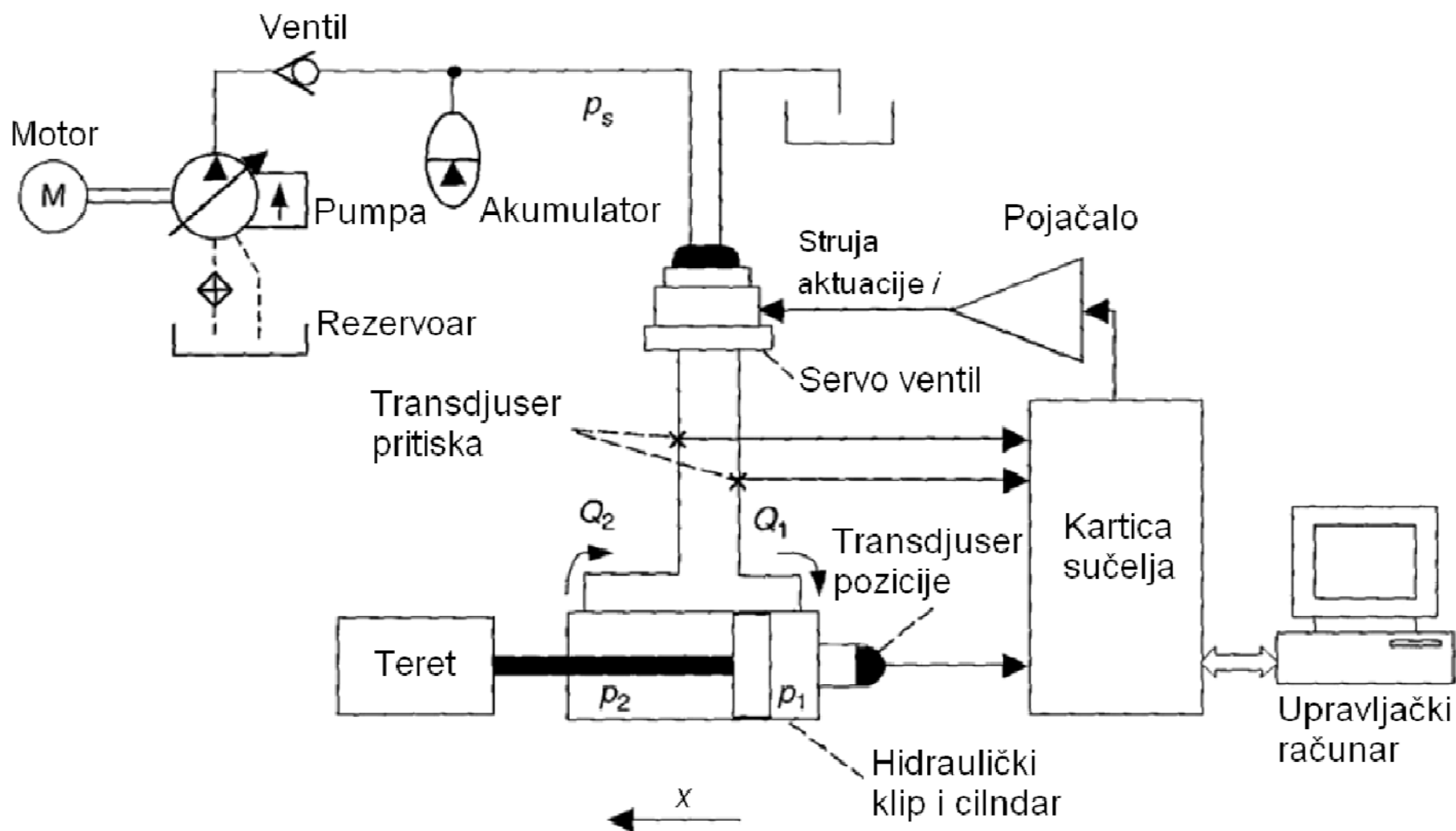
- Regulator u grani povratne veze



- Upravljački zakon (zakon regulacije):

$$u = u_{ref} - f(y)$$

## Računarski upravljani hidraulički sistem



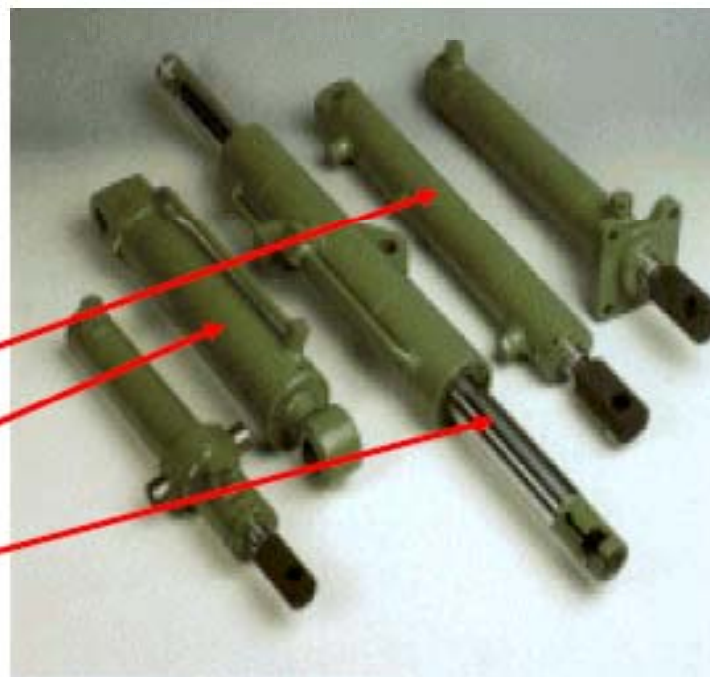
## Elementi hidrauličkih krugova

- **Hidrauličke energijske jedinice**
  - pumpe,
  - akumulatori (hidraulički spremnici),
  - kontrolni ventil za izoliranje hidrauličkih sistema,
  - rezervoari.
- **Cjevovod i priključci**
- **Proporcionalni/servo ventili**
- **Hidraulički aktuatori**



## Primjeri hidrauličkih cilindara

- Na klip u cilindru djeluje hidraulički pritisak.
- Sila generirana na šipci:
  - jednostruko djelovanje,
  - dvostruko djelovanja,
  - dvostruki cilindar,
  - dvostruka šipka.
- Efikasnost određena s trenjem.
- Malo unutarnje curenje: utjecaj statičkog tereta.

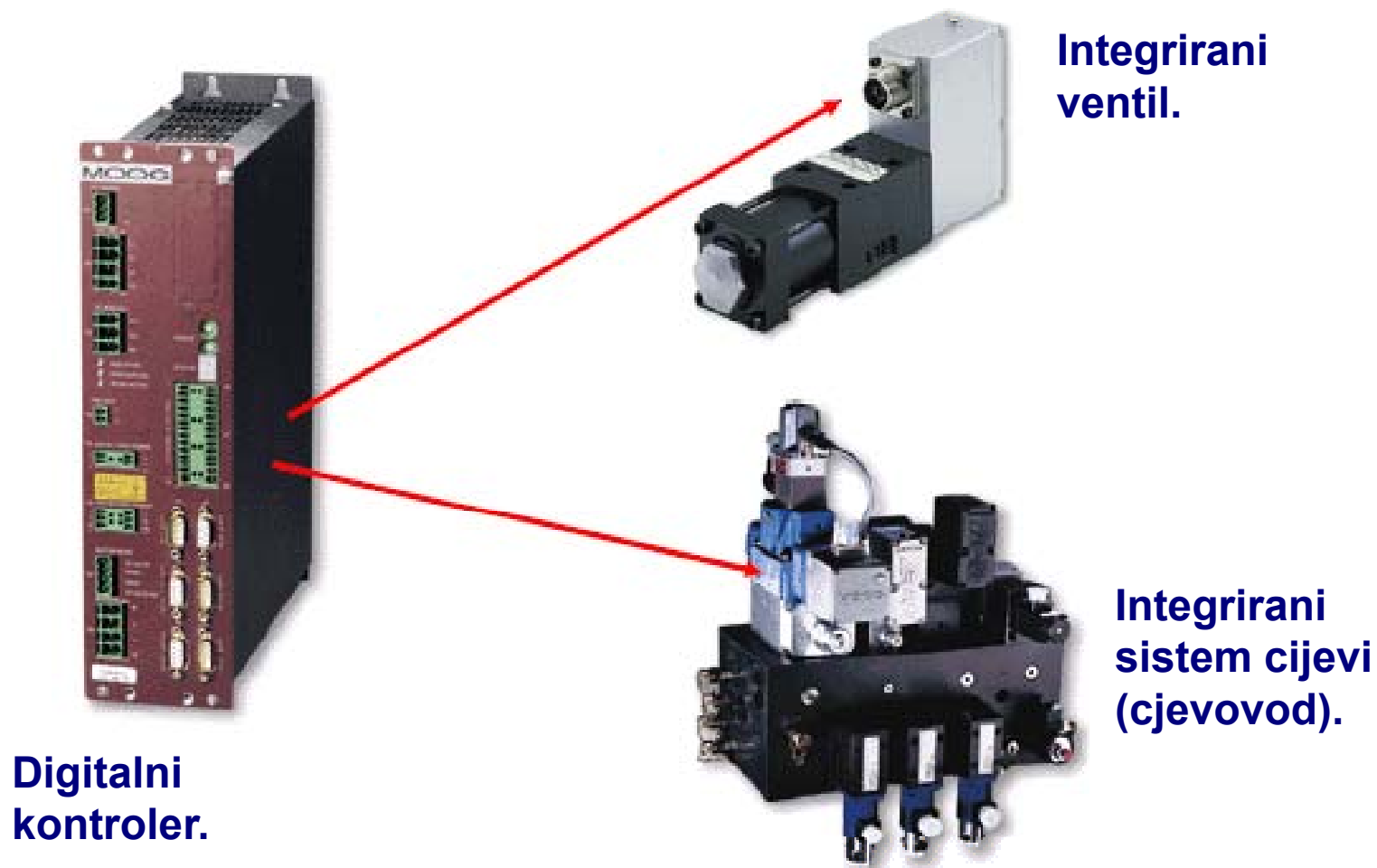


## Primjer hidrauličkog ventila

- **Tri glavne vrste ventila:**
  - **on/off ventili** za ručno upravljanje,
  - **proporcionalni ventili:** upravljanje brzinom volumnog toka,
  - **servo ventili:** tačno upravljanje tokom i pritiskom.
- **Načini upravljanja:**
  - električki nad hidrauličkim,
  - hidraulički nad hidrauličkim (pilot),
  - ručni.

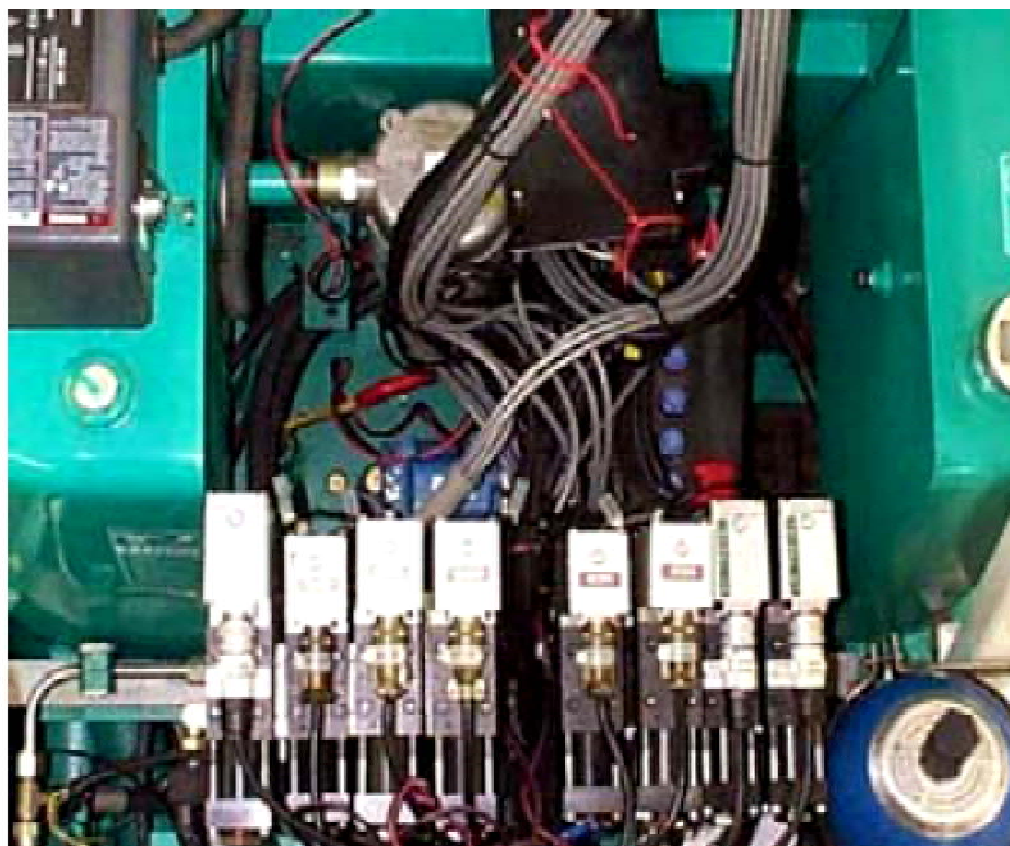


## Digitalno upravljanje tokom





## Primjer elektro-hidrauličkog sistema



## 10.6 Prednosti i nedostaci hidrauličkih aktuatora

### ▪ Prednosti

- nema izgaranja u statičkim situacijama,
- samopodmazivost i stalna cirkulacija tečnosti za zagrijavanje,
- prirodno sigurni u štetnim sredinama,
- imaju odličan omjer snaga/masa,
- velik koeficijent pojačanja snage,
- velika brzina odziva
- stabilnost brzine.

## Prednosti i nedostaci hidrauličkih aktuatora

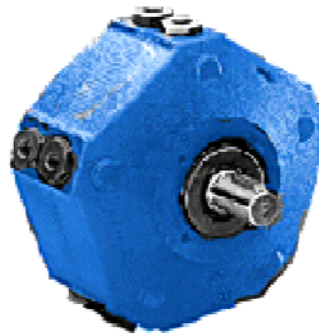
### ▪ **Nedostaci**

- potreba za hidrauličkom rezervom energije (pomoćni izvor energije),
- visoka cijena, usko područje proizvodnje i problem minijaturizacije,
- nizak stupanj korisnog djelovanja (zbog višestrukih pretvorbi energije),
- potreba za ručnim održavanjem,
- zagađenje radne okoline usljed istjecanja ulja,
- relativno veliki šum,
- manja fleksibilnost i složenost konstrukcije.

## 10.7 Primjena hidrauličkih aktuatora

- Prese, alatni strojevi, roboti,
- Dizalice, avioni, vozila, poljoprivredni strojevi,

Pumpa ili rotacijski motor



Linearni aktuator (cilindar)



# Primjena hidrauličkih aktuatora

- **Velika postrojenja**
  - prese čelika
  - stolovi velikih razmjera za precizno kretanje.
- **Mobilni sistemi**
  - upravljački sistem, kočnice,
  - propulzija i transmisija.
- **Zrakoplovni sistemi**
  - zračni pogon u letjelicama,
  - vertikalna stabilizacija na raketama.

