

Lekcija 9

Pneumatski aktuatori

Prof.dr.sc. Jasmin Velagić

Elektrotehnički fakultet Sarajevo

Kolegij: Aktuatori

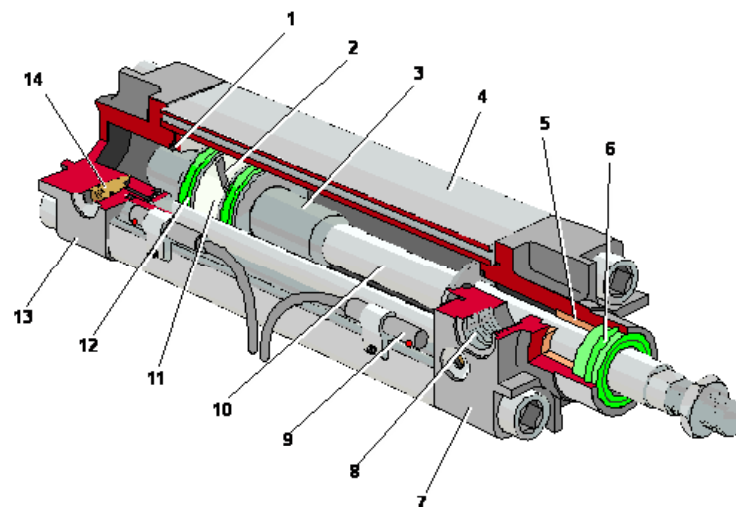
9.1. Osnove pneumatskih aktuatora

- Koriste komprimirani zrak kao radni medij.
- Pretvara energiju komprimiranog zraka u kretanje.
- Kretanje može biti linijsko ili rotacijsko, ovisno o primijenjenom aktuatoru.
- Komprimirani zrak je široko rasprostranjen i za okolinu nije štetan.
- Lagana instalacija cjevovoda i održavanje.
- Ne može doći do eksplozije i uništenja konstrukcije.
- Glavni nedostatak pneumatskih sistema je stlačivost zraka, koja dovodi do niske gustoće energije i slabih upravljačkih svojstava (obično on/off upravljanje).
- Pneumatski sistemi su prikladni za male i srednje terete (opterećenja) (30N-20KN) na temperaturama -40 do 200 C°.

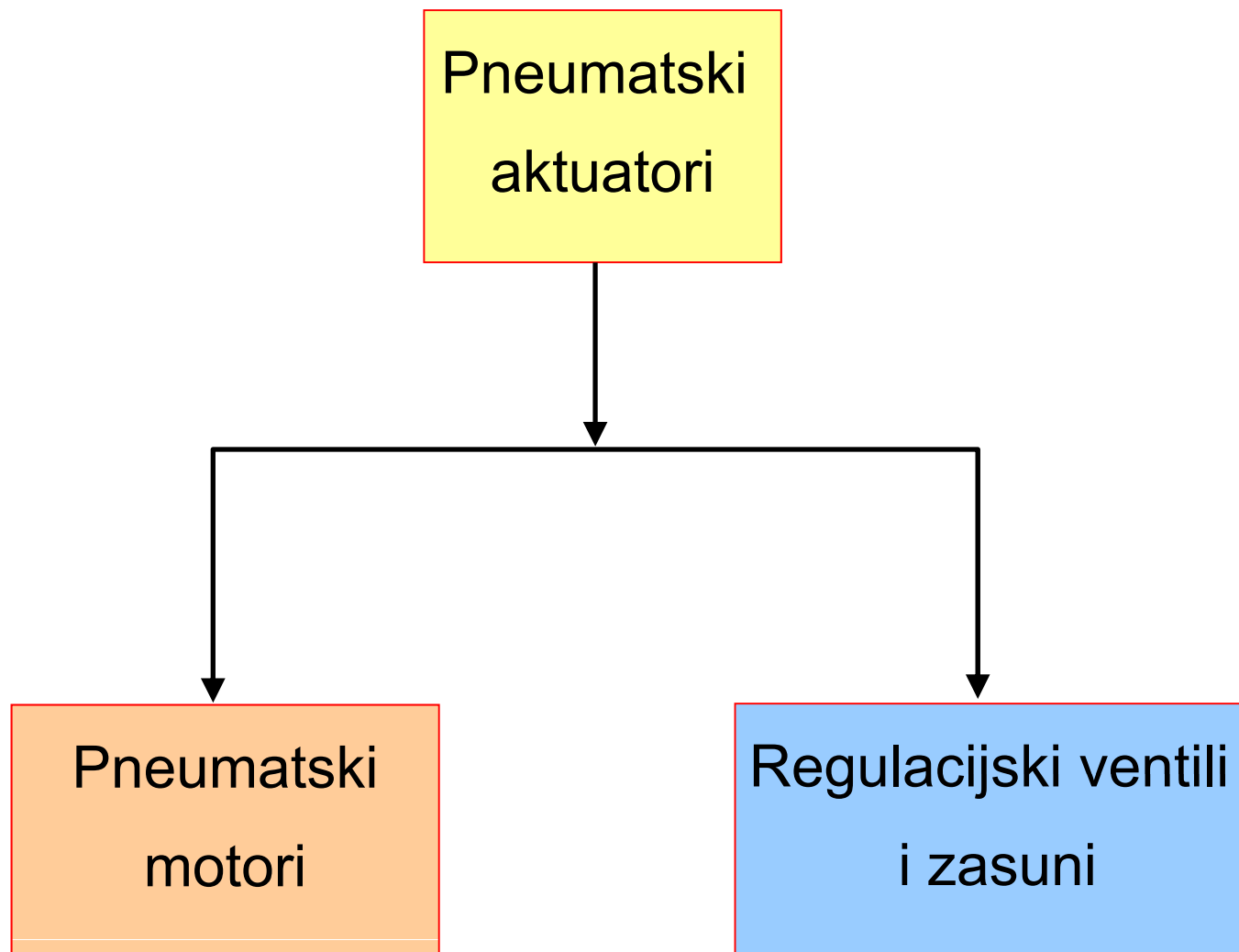


Dijelovi pneumatskog aktuatora

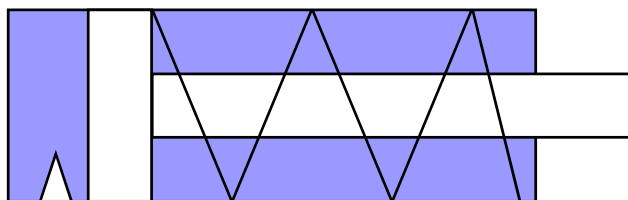
- 1 ležište brtve klipa
- 2 magnet
- 3 rukav klipa
- 4 oklop cilindra
- 5 vodilica klipa
- 6 brtva kliznog dijela klipa
- 7 omotač prednjeg dijela
- 8 prednji port
- 9 rid prekidač
- 10 klipnjača (osovina klipa)
- 11 habajući prsten
- 12 brtva klipa
- 13 omotač zadnjeg dijela
- 14 ležište navoja brtve klipa



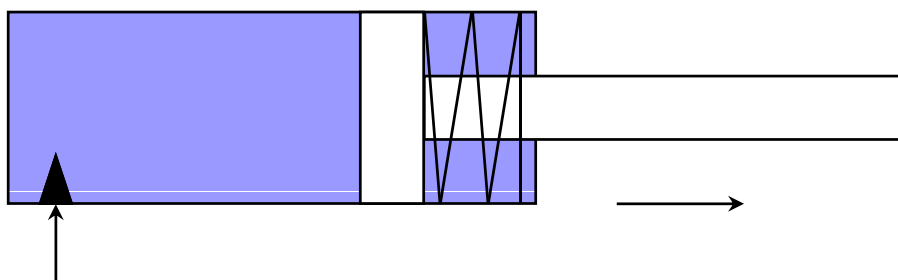
Podjela pneumatskih aktuatora



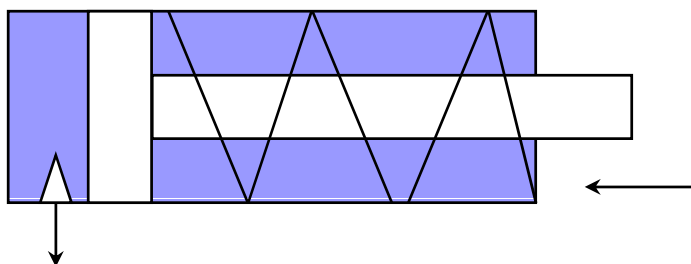
Jednosmjerno djelovanje aktuatora



Stanje mirovanja.
Nema djelovanja pritiska.
Klip je uvučen.

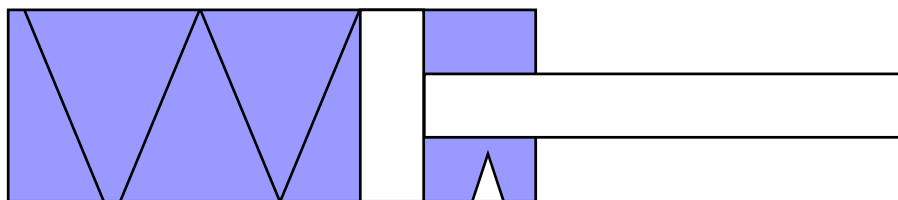


Pritisak zraka djeluje.
Klip se izvlači iz cilindra.
Opruga se zbija.

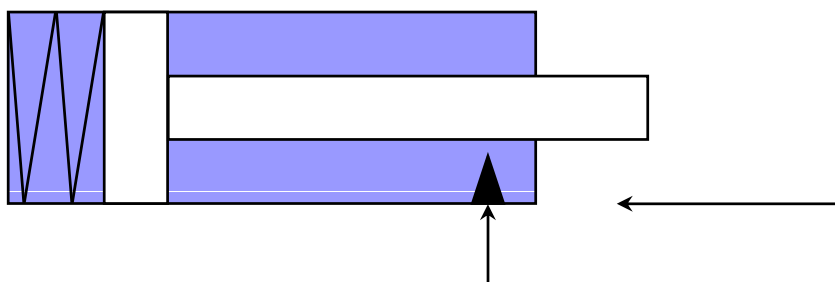


Pritisak zraka popušta.
Klip se uvlači zbog djelovanja sile opruge i vraća se u stanje mirovanja.

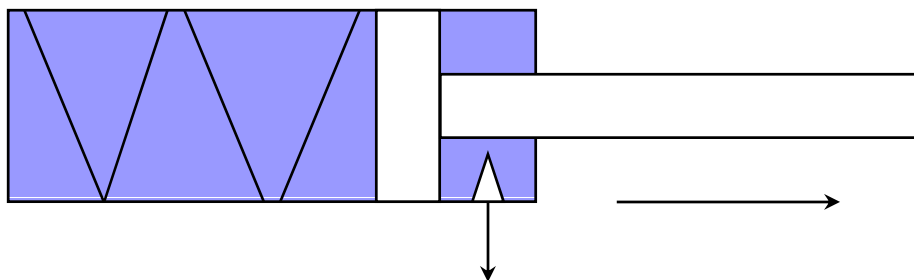
Jednosmjerno djelovanje aktuatora



Stanje mirovanja.
Nema pritiska.
Klip je izvučen.

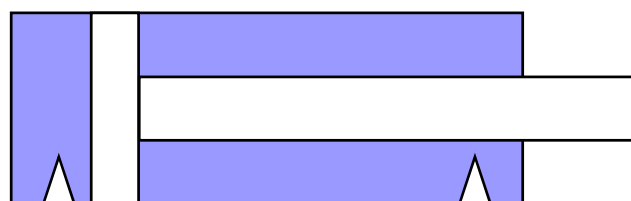


Pritisak zraka djeluje.
Klip se uvlači u cilindar.
Opruga se zbija.



Pritisak zraka
popušta. Klip se
izvlači zbog sile
opruge i vraća se u
stanje mirovanja.

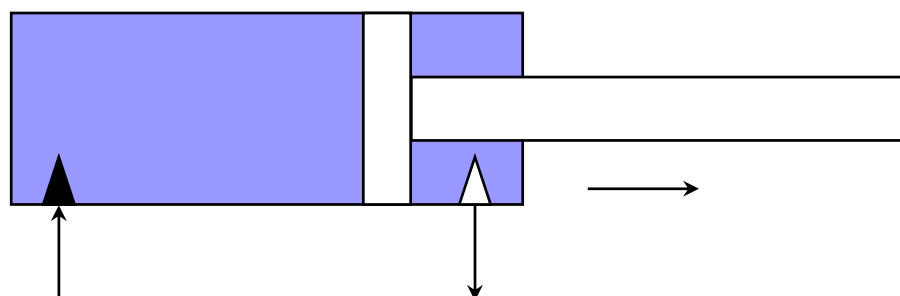
Dvosmjerno djelovanje aktuatora



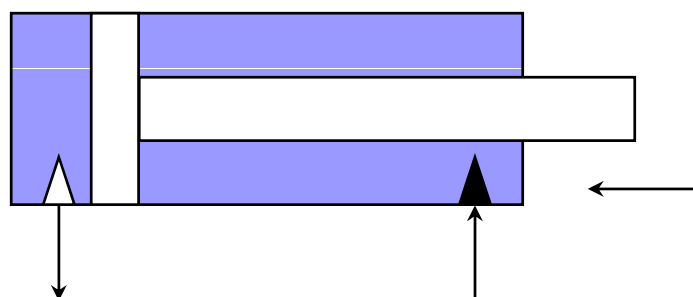
A

B

Klip je u stanju mirovanja kada niti na jedan port ne djeluje pritisak zraka.



Kada na ulaz (port) A djeluje pritisak zraka klip se izvlači van i B ispušta zrak van.

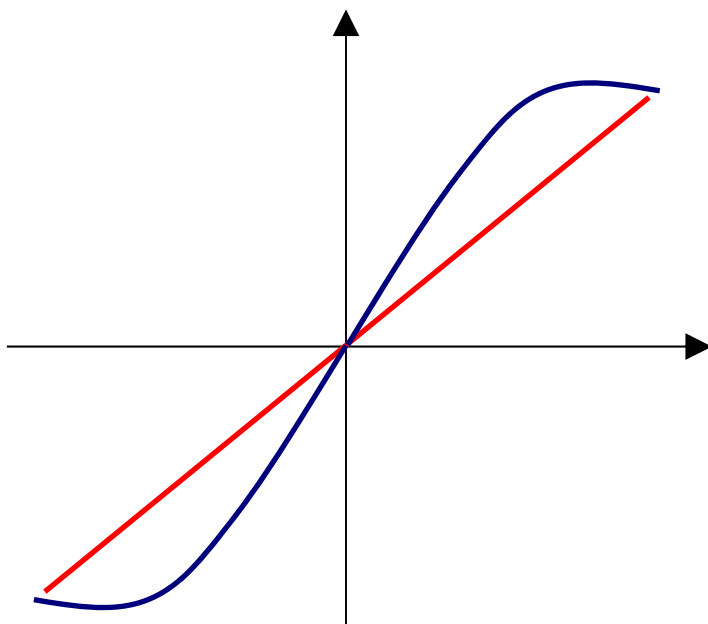


Kada na ulaz B djeluje pritisak zraka klip se uvlači u cilindar i A ispušta zrak van. Na ovaj način se klip vraća u originalno stanje.

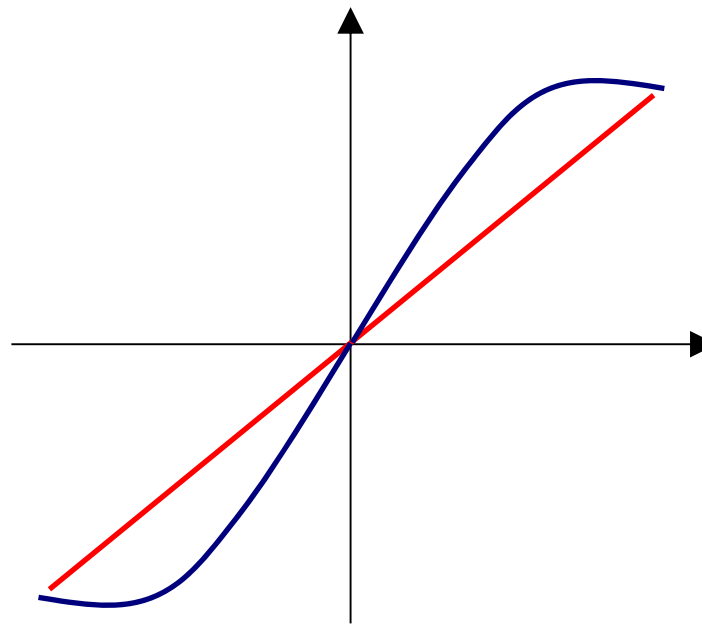
9.1.1 Statičke karakteristike pneumatskih aktuatora

- Statičke karakteristike pneumatskih aktuatora (izvršnih članova) ovise o statičkim karakteristikama samog objekta upravljanja (procesa).
- Ako je statička karakteristika objekta linearna, da bi sistem dobro radio, mora i statička karakteristika pneumatskog aktuatora biti linearna.

Statička karakteristika procesa



Statička karakteristika aktuatora

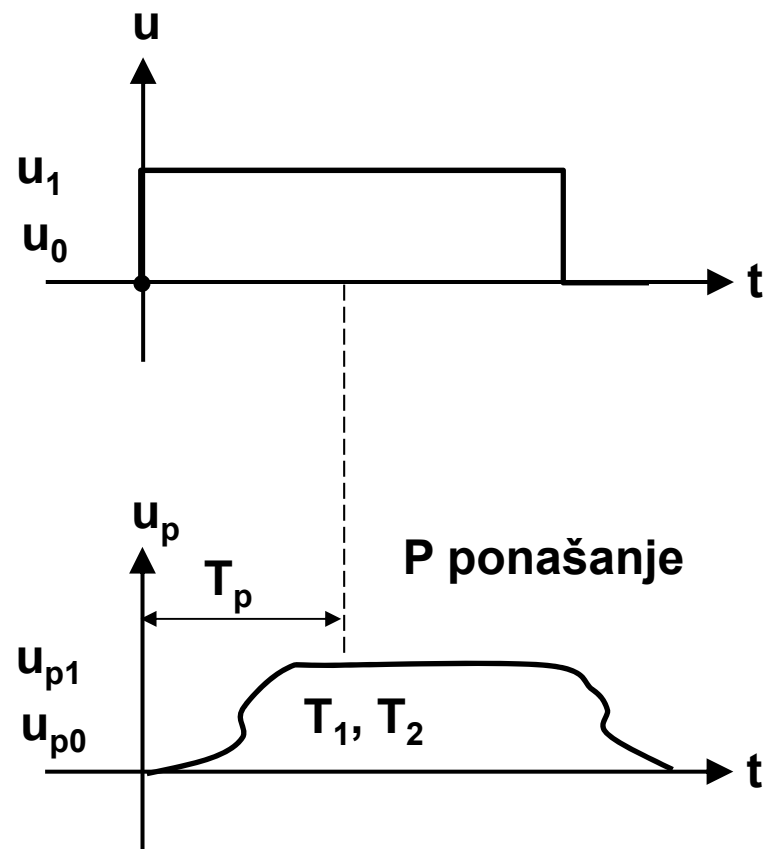
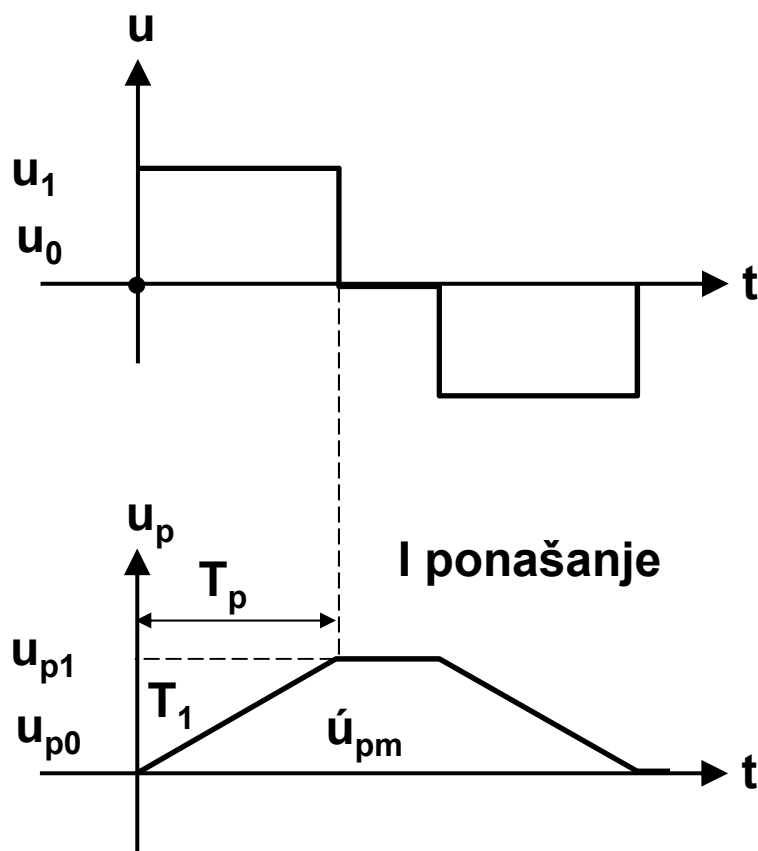


Statičke karakteristike pneumatskih aktuatora

- Za nelinearnu statičku karakteristiku procesa, statička karakteristika aktuatora također mora biti nelinearna.
- Pneumatski aktuatori mogu imati **pokretni član – ventil**, koji se pokreće pneumatskim motorima.
- Što se tiče dinamičkih karakteristika pneumatskih aktuatora one se razlikuju s obzirom na to da li se radi o analognim ili diskretnim izvršnim članovima.
- Na sljedeća dva slajda su prikazane dinamičke karakteristike diskretnih i analognih pneumatskih izvršnih članova (aktuatora).

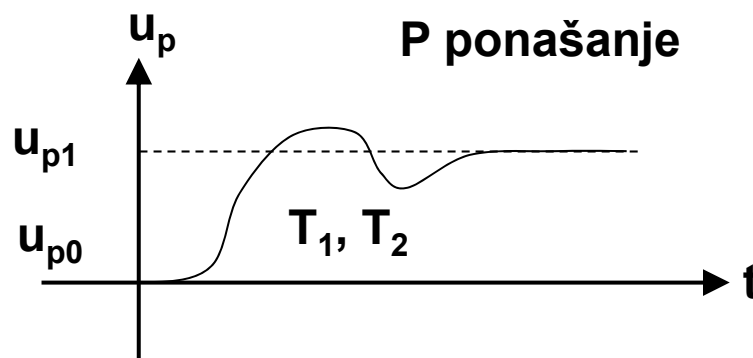
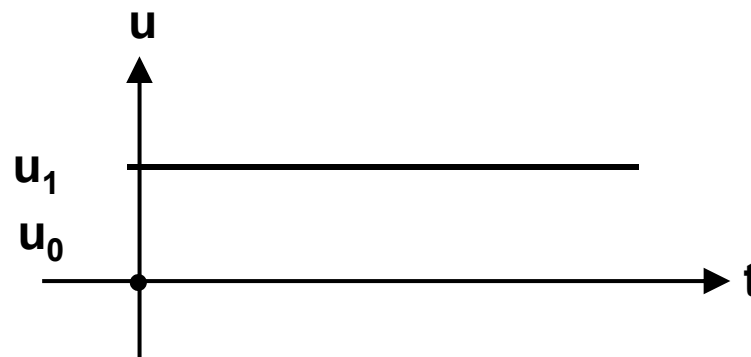
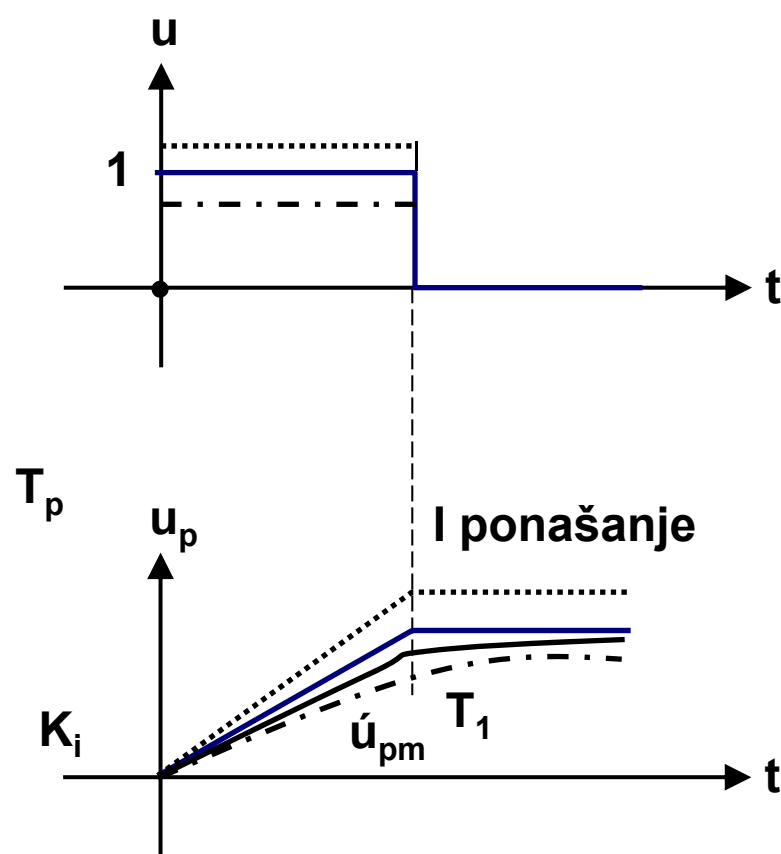
9.1.2. Dinamičke karakteristike pneumatskih aktuatora

- Diskretni izvršni članovi



Dinamičke karakteristike pneumatskih aktuatora

▪ Analogni članovi



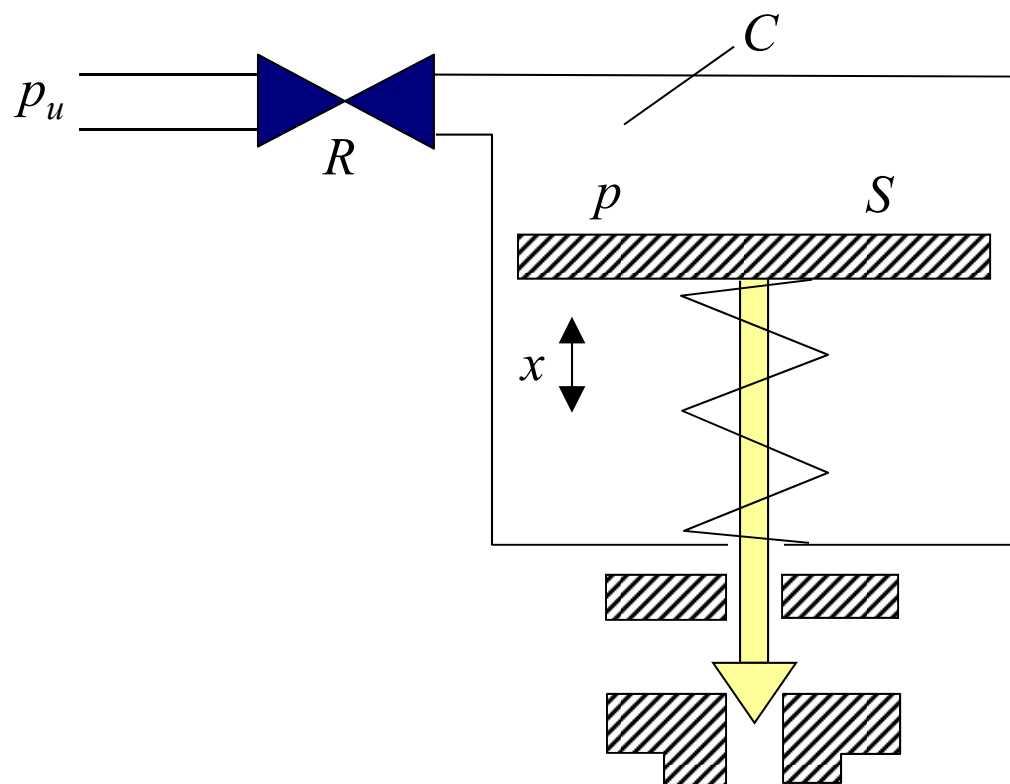
T_p – postavno vrijeme za ukupni pomak $T_p \geq 2$ s

u_{pm} – ograničena brzina,

T_1, T_2 – vremenske konstante.

9.2. Pneumatski motor

- Pneumatski motor s klipom (ventil+cilindar)



Sile koje djeluju na motor

↓ F_u – sila ulaznog tlaka

↑ F_m – sila mase

↑ F_k – sila pera

↑ F_t – sila trenja

↑ F_v – sila na tijelo ventila

↕ F_g – sila teže (ovdje je 0).

S – površina klipa

C – kapacitet cilindra

R – parametar ventila (otpor)

Model pneumatskog motora

- Iz uvjeta ravnoteže sila

$$\sum F = 0,$$

slijedi:

$$F_u - F_m - F_k - F_t - F_v = 0.$$

gdje su:

$$F_m = m \frac{d^2 x(t)}{dt^2},$$

$$F_k = k(x + x_0),$$

$$F_t = \rho \frac{dx(t)}{dt}.$$

x_0 – prednapetost pera

suho trenje zanemareno

Model pneumatskog motora

- Postavljanjem jednađbe na sljedeći način:

$$F_m + F_k + F_t = F_u - F_v.$$

dobiva se:

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + k(x + x_0) + \rho \frac{dx(t)}{dt} = Sp - F_v.$$

- Prethodna jednađba se može napisati u sljedećem obliku:

$$RC \frac{dp}{dt} + p = p_u.$$

- U nastavku slijedi izvod posljednje jednađbe.

Model pneumatskog motora

- Masa zraka u nekom volumenu proporcionalna je tlaku:

$$\frac{dm}{dt} = C \frac{dp}{dt} = \frac{dm}{dp} \frac{dp}{dt},$$

iz čega slijedi:

$$C = \frac{dm}{dp} \cong \frac{\Delta m}{\Delta p} = \frac{m}{p}.$$

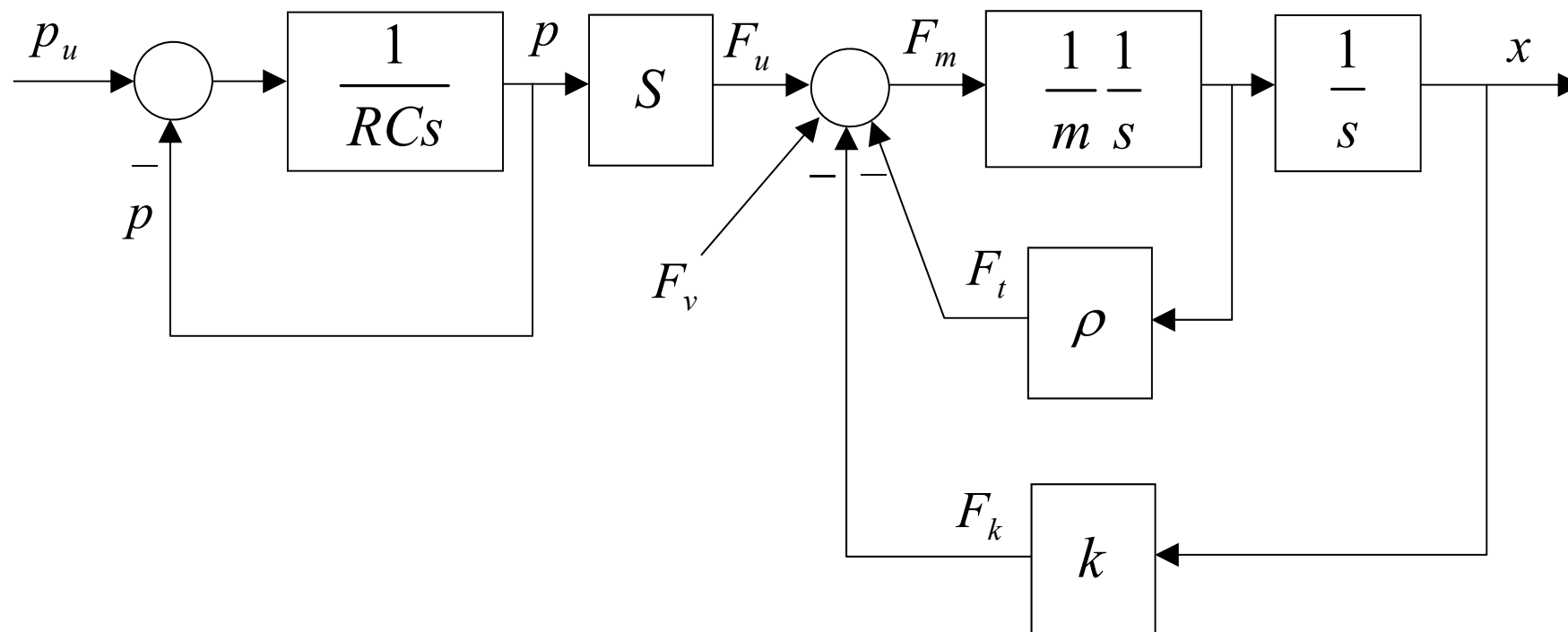
- Nadalje se dobiva:

$$\frac{dm}{dt} = f(\Delta p) \Rightarrow R = \frac{\Delta p}{\frac{dm}{dt}} \Rightarrow \frac{dm}{dt} = \frac{1}{R} \Delta p = \frac{1}{R} (p_u - p),$$

$$C \frac{dp}{dt} = \frac{1}{R} (p_u - p) \Rightarrow RC \frac{dp}{dt} + p = p_u.$$

Model pneumatskog motora

- Blokovska shema pneumatskog motora, dobivena na temelju prethodnih jednadžbi prikazana je na sljedećoj slici.



Statičko ponašanje: $\ddot{x} = \dot{x} = 0$ → tačnost ovisi o konstanti pera k i površini S .

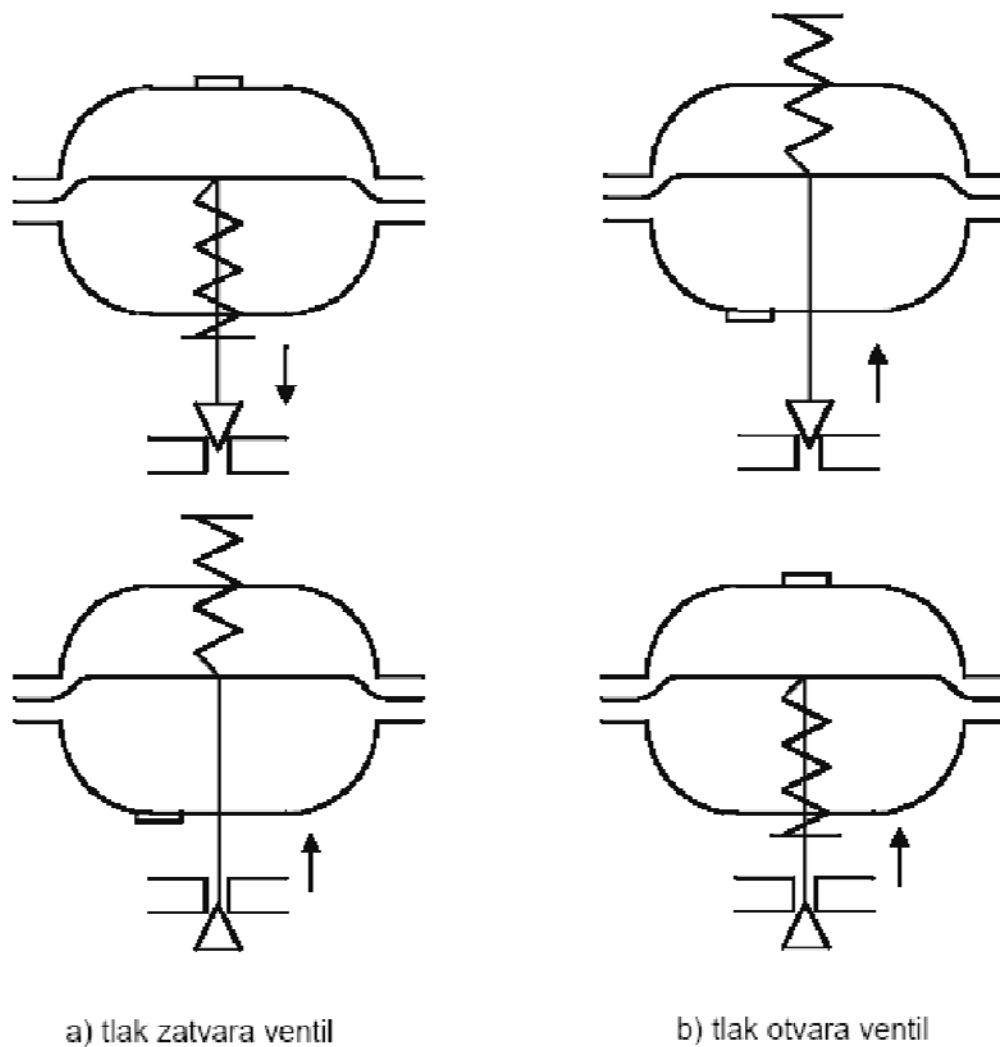
Dinamičko ponašanje: P - ponašanje

I - ponašanje (izvedba bez pera)

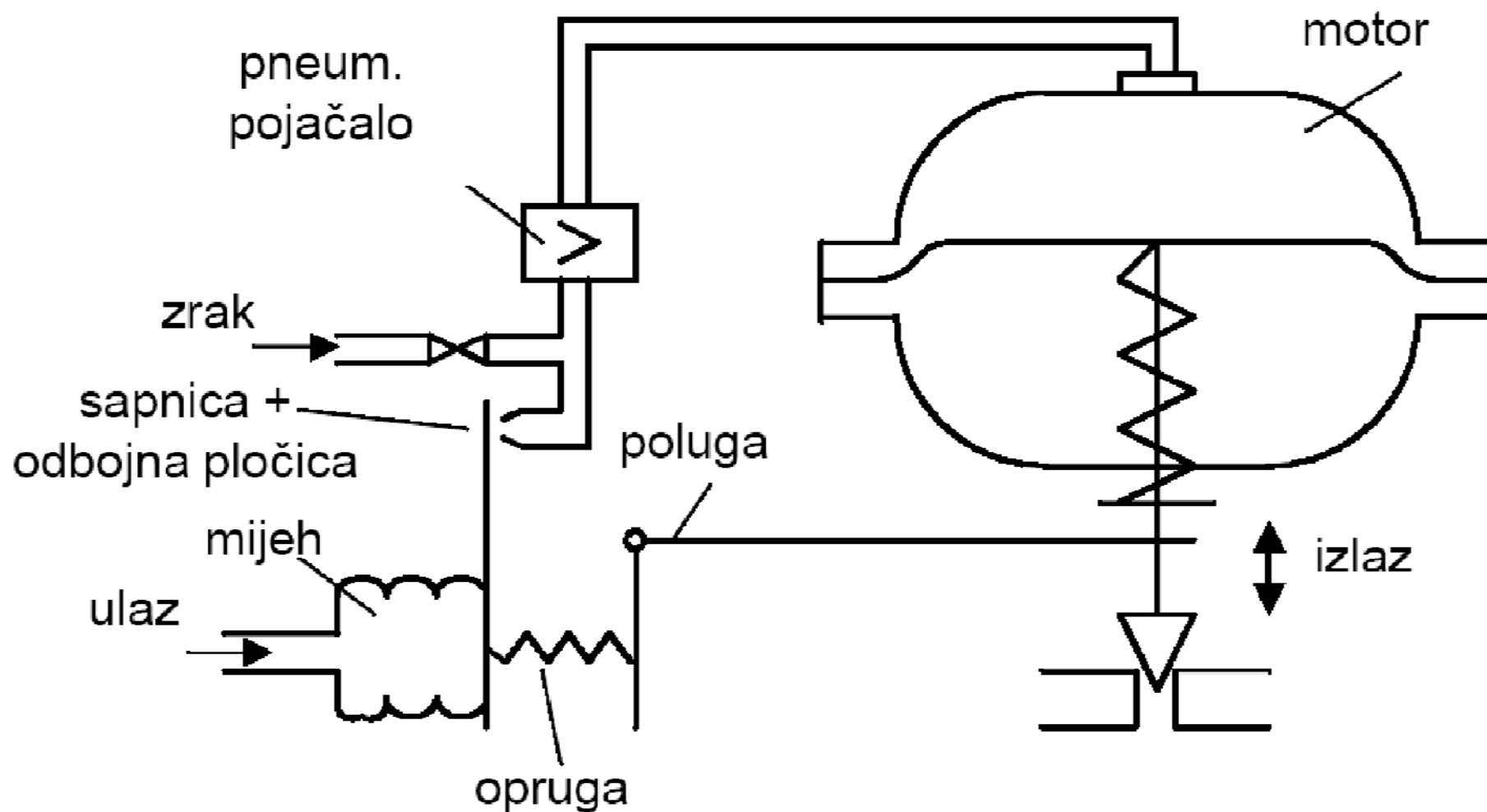
9.2.1. Konstrukcijska izvedba pneumatskih motora

- Ovisi o načinu brtvljenja između klipa i motora:
 - **membranski motori** – najčešći, najveće snage, malo trenje,
 - **klipni motori** – brtvljenje pomoću prstenova, veće trenje,
 - **motori s mijehom** – mali pomak (malo u upotrebi).
- Mana membranskih motora – **mali pomaci**.
- Hodovi ventila 20-50 mm, rijetko 70 mm.
- Veći pomaci postižu se **klipnim motorima** ili **rotacijskim motorima** – snage do 10 kW.
- Veće snage postižu se hidrauličkim, elektrohidrauličkim ili električkim pogonima.
- Pneumatski sistemi primjenjuju se i uz električne regulatore → **E/P pogoni**.
- Primjenom E/P pretvornika pretvara se električki signal u pneumatski i dalje vodi na pneumatski motor.

Jednostavni membranski motori

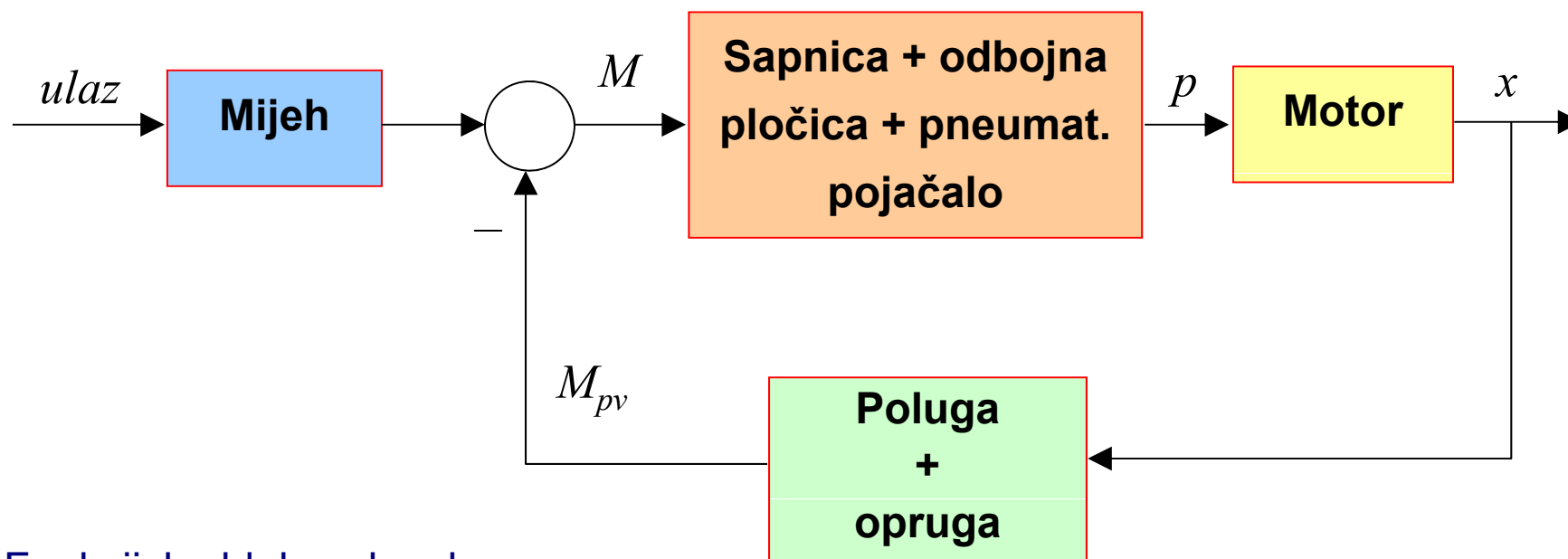


Membranski motor s pozicionerom



Membranski motor s pozicionerom

- Karakteristike membranskih motora s pozicionerom:
 - smanjenje utjecaja trenja i tereta na statičku tačnost,
 - prilagođenje na razne izvršne signale, npr. električki izlaz iz procesnog računara,
 - veća snaga ventila.



Funkcijska blokovska shema

Primjer pneumatskog motora

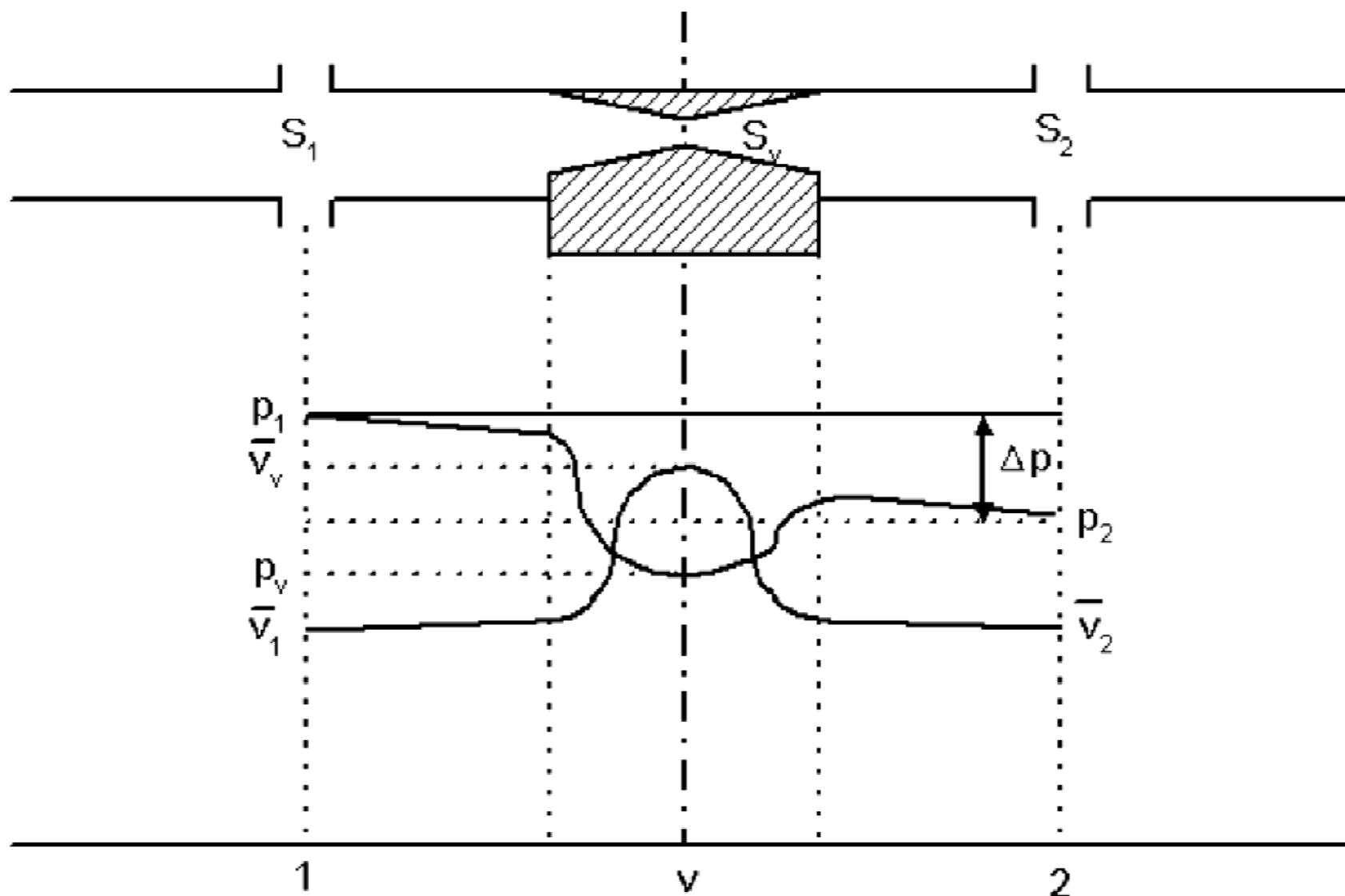
- Pneumatski membranski motor u sklopu regulatora tlaka SAMSON tip 41-23.
- Maksimalna radna temperatura mu je 350°C, a tlak je PN 16 do PN 40.
- Predviđen je za radni medij: para, voda i ostale tekućine, ulje, zrak i negorive plinove.
- Primjenjuje se u procesnim postrojenjima, kriogenici, te u sistemima grijanja, ventilacije i klimatizacije.



9.3. Regulacijski ventili i zasuni

- Ventili su uređaji koji se mehanički pokreću i predstavljaju izvršni član regulacijskog sistema.
- Regulacijski ventili i zasuni, općenito, izazivaju u cijevima pad tlaka na principu prigušnice i time uzrokuju promjenu protočne količine (ovisno o pomaku ili zakretu ventila).
- Ima kućište u kome se nalaze pokretni dijelovi.

9.3.1. Fizikalni opis rada ventila



Fizikalni opis rada ventila

- Zakon kontinuiteta:

$$Q = \bar{v}_1 S_1 = \bar{v}_2 S_2 = \bar{v}_v S_v,$$

gdje je: Q – protok,

S – površina presjeka,

\bar{v} – srednja brzina protjecanja.

- Bernoullijev poučak:

$$\frac{\rho \bar{v}^2}{2} + p = konst.$$

$$\frac{\rho \bar{v}_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho \bar{v}_2^2}{2} + p_2 + \Delta p$$

9.3.2. Karakteristične veličine regulacijskog ventila

- **Hod ventila**
 - određen kretanjem pokretnih dijelova ventila,
 - **nazivni hod** predstavlja pomak od jednog krajnjeg položaja pokretnih dijelova, koji vrše promjenu protoka fluida,
 - **relativni hod** predstavlja odnos između hoda za određeni otvor i nazivnog hoda.
- **Koeficijent protoka A_v**
 - Koeficijent protoka za zadani tok:

$$Q = S_v \alpha \sqrt{2} \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} = A_v \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \Rightarrow A_v = Q \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}},$$

gdje je: α – konstanta, A_v – koeficijent protoka za ventil.
 Q – protok [m³/s],
 Δp – pad tlaka u ventilu [Pa],
 ρ – gustoća tekućine [kg/m³],

Karakteristične veličine regulacijskog ventila

- **Drugi oblik koeficijenta protoka k_v**
 - protok pri temperaturama od 5 i 40 C° koji protječe kroz ventil uz $\Delta p = 10^5$ Pa.

$$Q = k_v \sqrt{\frac{\rho_0}{\Delta p_0}} \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}},$$

gdje je: k_v – koeficijent protoka.

- Iz gornjeg izraza slijedi izraz za A_v :

$$A_v = Q \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p \cdot 10^5}}.$$

- Za $\rho_0 = 10^3 \text{ kgm}^{-3}$ i $\Delta p_0 = 10^5$ Pa dobiva se:

$$k_v = A_v \sqrt{\frac{\Delta p_0}{\rho_0}} 3600 = \frac{A_v \cdot 10^6}{28}.$$

Primjer 1

Odrediti vrijednost koeficijenta protoka za ventil, koji se ugrađuje za regulaciju protoka vode, ako je protok $0.09 \text{ m}^3/\text{h}$, a pritisci prije i poslije ventila $40 \text{ kp}/\text{cm}^2$ i $10 \text{ kp}/\text{cm}^2$.

Rješenje:

Prvo je potrebno izvršiti pretvorbu jedinice pritiska iz kp/cm^2 u Pa, na temelju sljedeće relacije:

$$1 \text{ kp} = 9.81 \text{ N}.$$

što daje:

$$1 \text{ kp}/\text{cm}^2 = 10 \frac{\text{N}}{10^{-4} \text{ m}^2} = 10^5 \text{ Pa} .$$

Razlika pritisaka je jednaka

$$\Delta p = p_1 - p_2 = 4 - 1 = 3 \text{ MPa} .$$

Primjer 1

Također je potrebno i protok izraziti u jedinicama m^3/s

$$Q = 0.09 \text{ m}^3/\text{h} = 0.09 \text{ m}^3/3600 \text{ s} = 25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}.$$

Vrijednost gustoće tekućine iznosi:

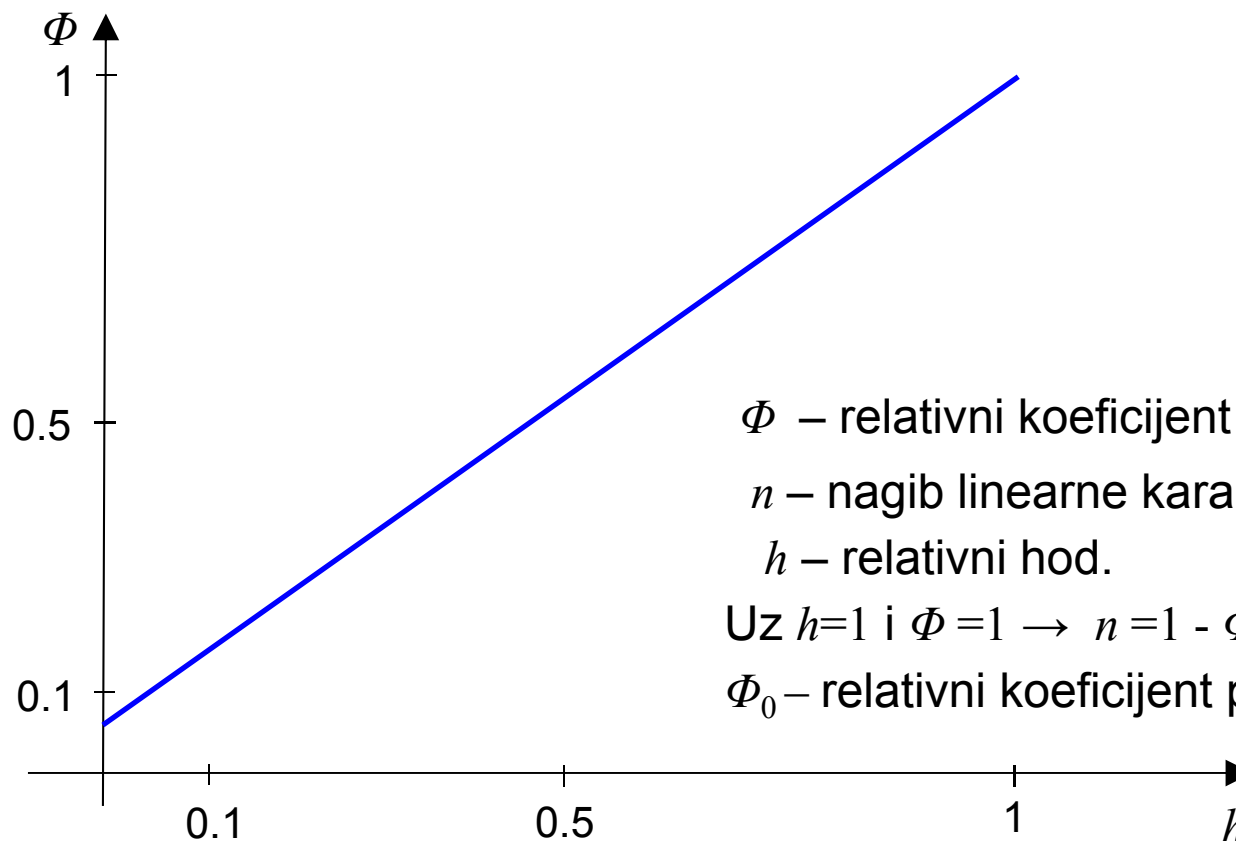
$$\rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3.$$

Na temelju prethodnih izraza dobiva se sljedeći iznos:

$$A_v = Q \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}} = 25 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{1000}{3 \cdot 10^6}} = 4.564 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 = 0.4564 \text{ mm}^2$$

9.3.3. Karakteristika protoka regulacijskog ventila

- Karakteristika protoka određena odnosom relativnog koeficijenta protoka i hoda $\Phi = f(h)$.
- Postoji **linearna**, **istopostotna** i **polinomska** karakteristika.
- **Linearna karakteristika** $\Phi = \Phi_0 + nh$.



Φ – relativni koeficijent protoka,

n – nagib linearne karakteristike protoka,

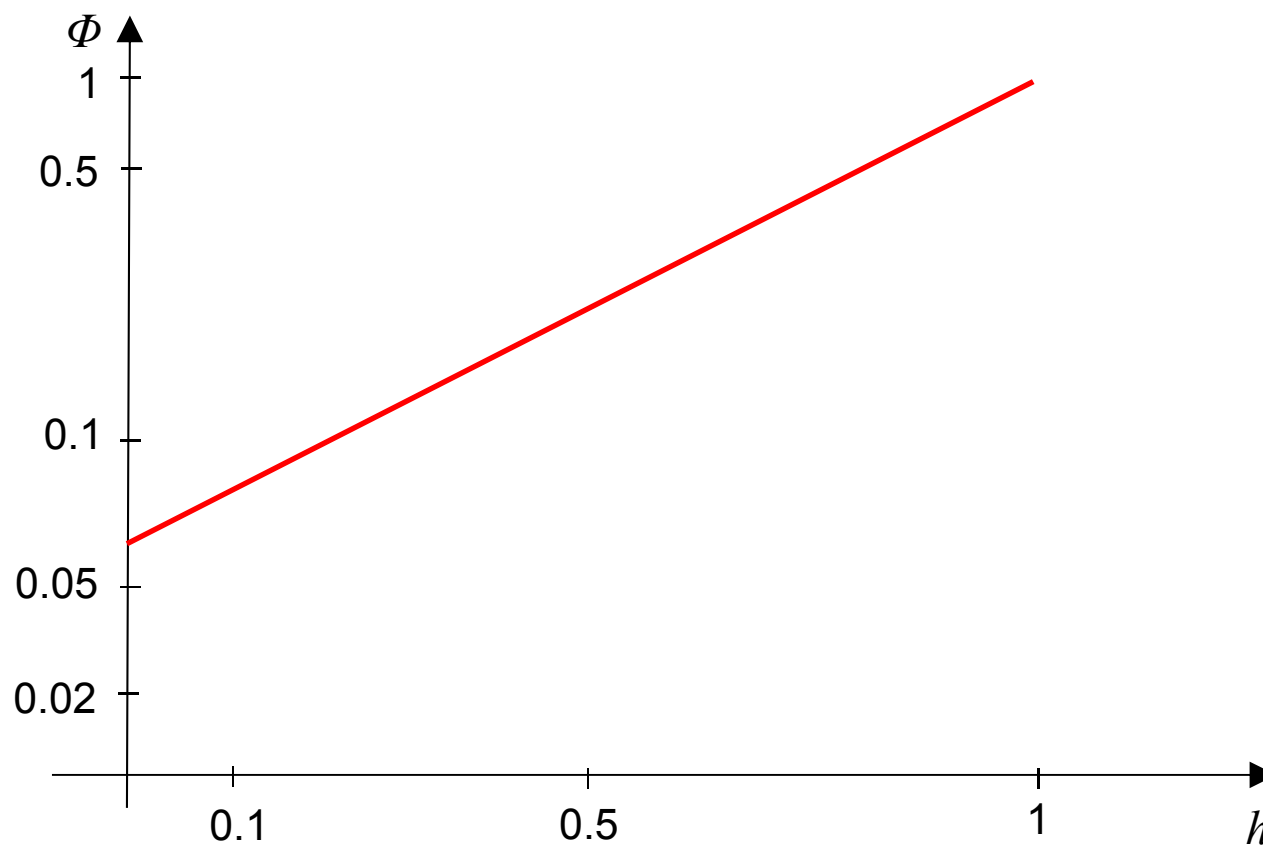
h – relativni hod.

Uz $h=1$ i $\Phi=1 \rightarrow n=1 - \Phi_0$.

Φ_0 – relativni koeficijent protoka za $h=0$.

Karakteristika protoka regulacijskog ventila

- Istopostotna karakteristika $\Phi = \Phi_0 e^{nh}$.

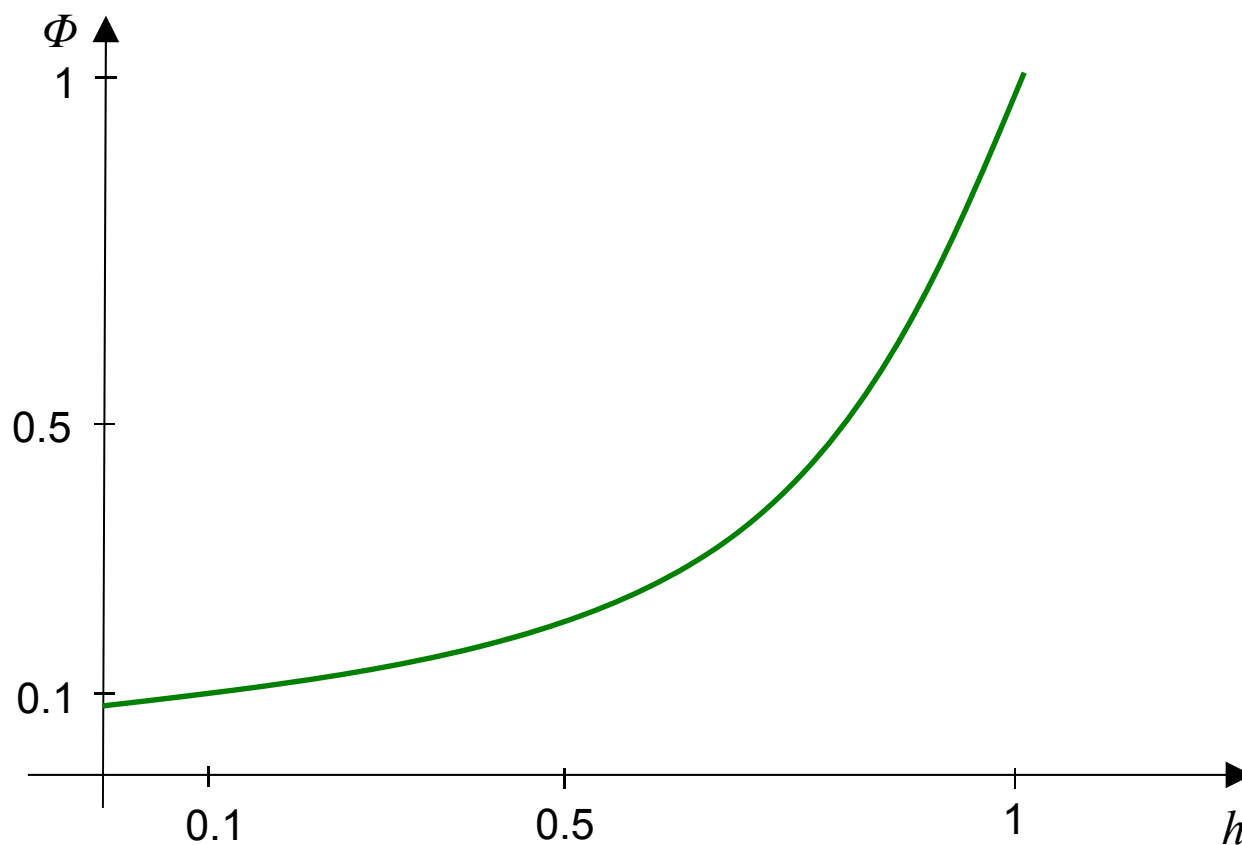


Uz $h=1$ i $\Phi = 1 \rightarrow n = \ln(1/\Phi_0)$

Kod malog toka male promjene, kod većeg toka veće promjene.

Karakteristika protoka regulacijskog ventila

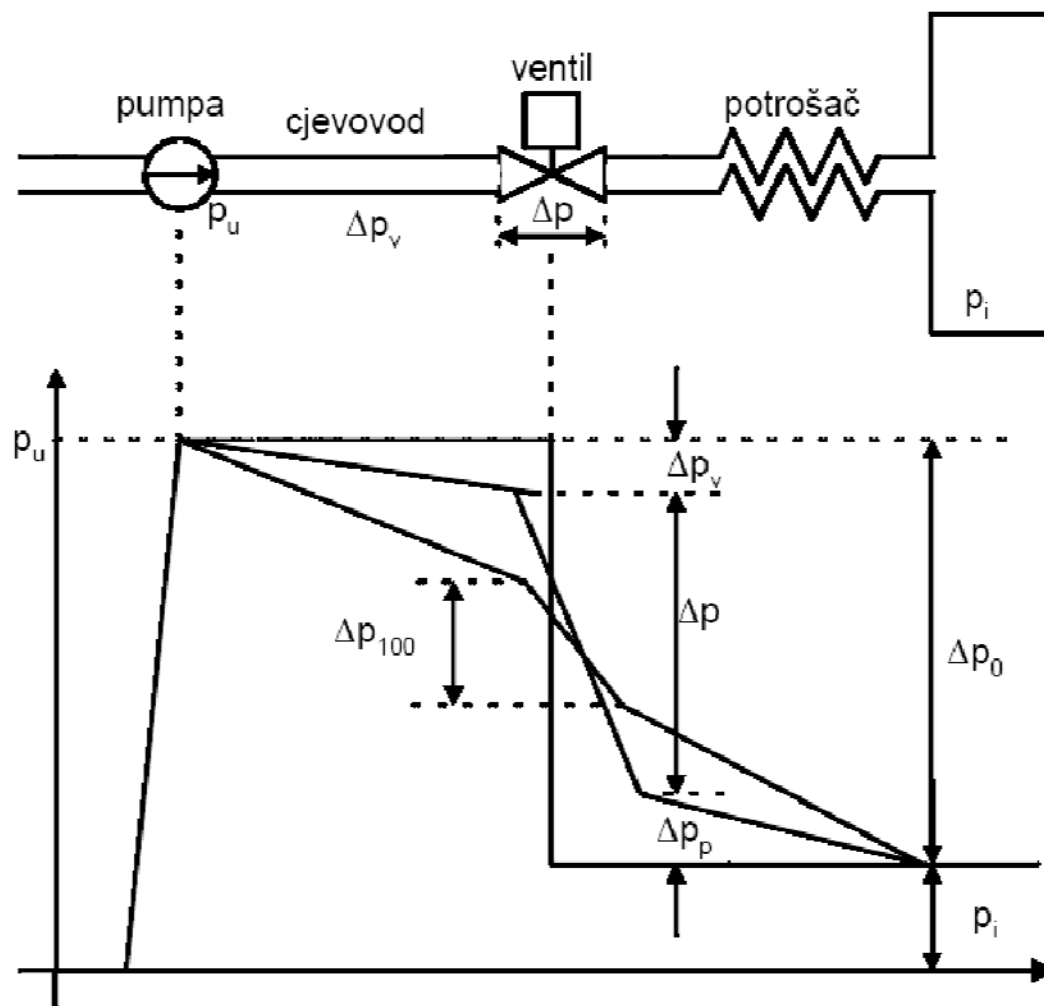
- Polinomska karakteristika $\Phi = \Phi_0 + C_0 h + 0.2h^2 - 0.29h^3 + 0.1h^4 + 0.38h^5$



Uz $h=1$ i $\Phi = 1 \rightarrow C_0 = 0.61 - \Phi_0$.

9.3.4. Pogonske karakteristike regulacijskih ventila

- Prethodne, standardne karakteristike su izvedene za $\Delta p = \text{konst.}$
- Pogonske karakteristike : $\Delta p \neq \text{konst.}$



Pogonske karakteristike regulacijskih ventila

Pogonski uvjeti:

- **Zatvoreni ventil** $\rightarrow Q = 0, h = 0 \rightarrow \Delta p = p_u - p_i$.
- **Otvoreni ventil** $\rightarrow Q = Q_{100}, h = h_{100} \rightarrow \Delta p_{100}$.
- **U radnoj tački** $\rightarrow Q, h, \Delta p < \Delta p_0$.
- $\Delta p \neq 0$.

Pogonske karakteristike

$$\frac{Q}{Q_{100}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\Delta p_{100}}{\Delta p_0} \left[\left(\frac{1}{\Phi} \right)^2 - 1 \right]}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \Psi \left[\left(\frac{1}{\Phi} \right)^2 - 1 \right]}}$$

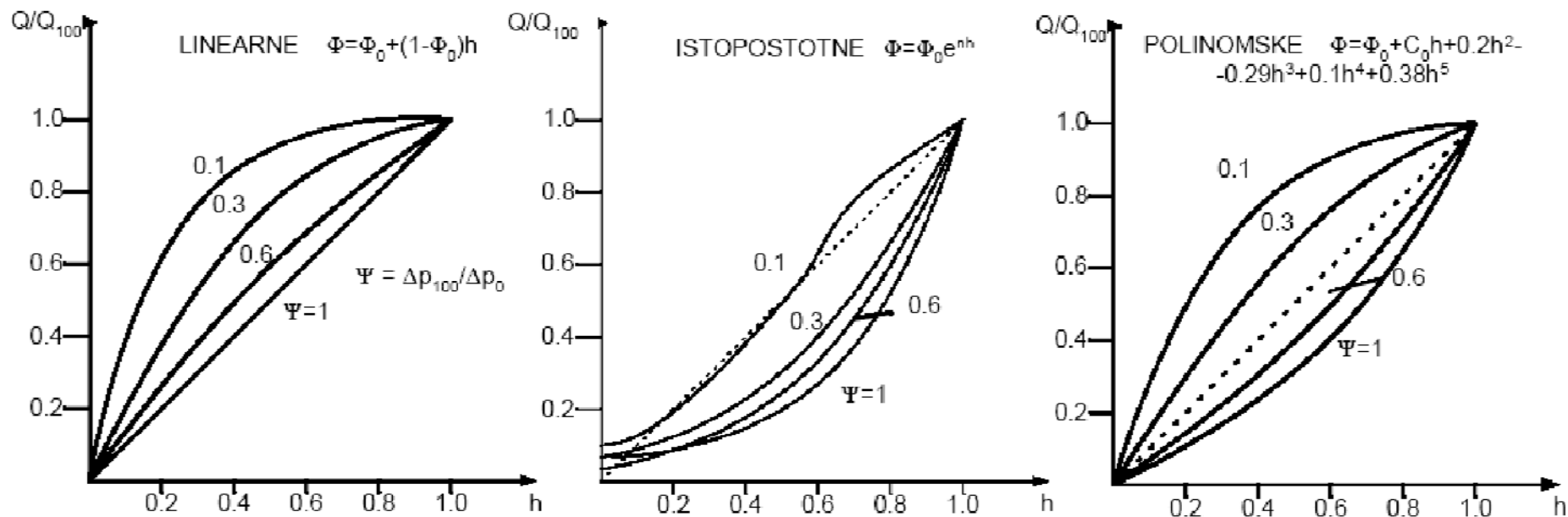
gdje je:

Φ – relativni koeficijent protoka ventila,

Ψ – parametar koji ovisi o konstrukciji ventila.

Pogonske karakteristike regulacijskih ventila

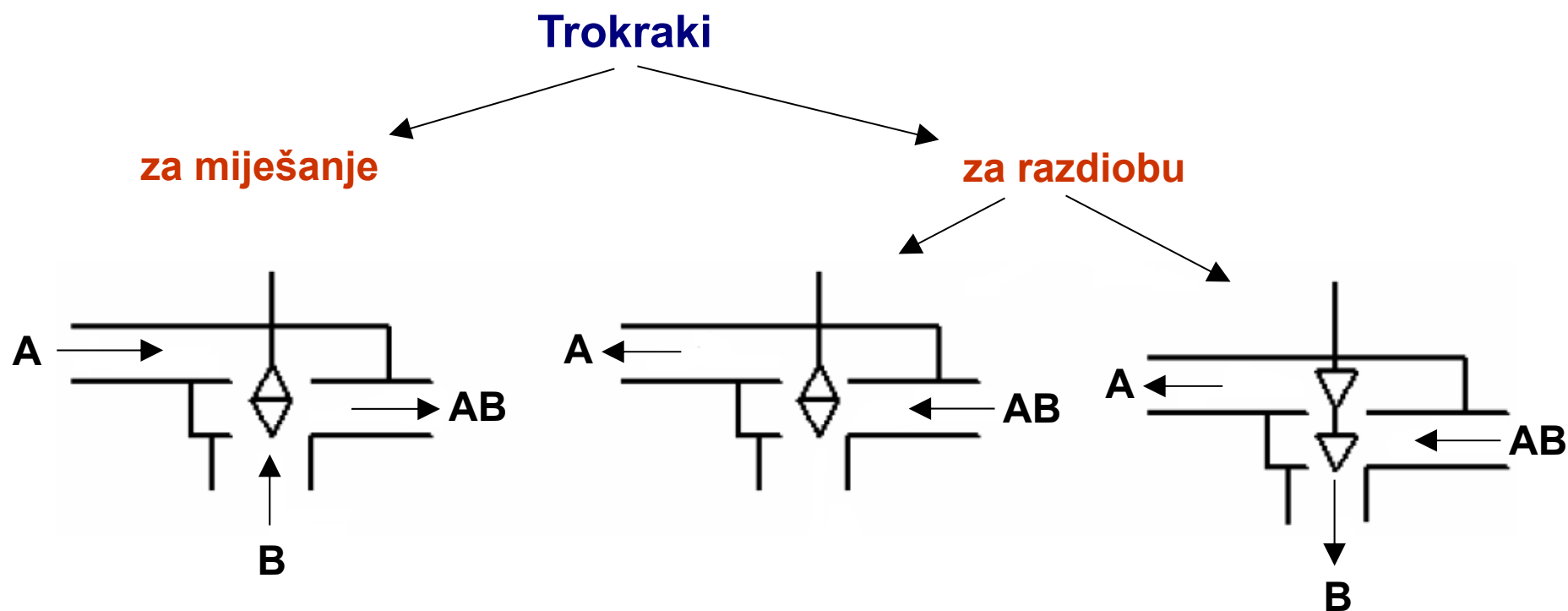
- Linearna, istopostotna i polinomska



- Može se uočiti da se s polinomskom karakteristikom ventila postižu pogonske karakteristike koje su simetrične u odnosu na idealnu pogonsku karakteristiku (označenu crtkano).

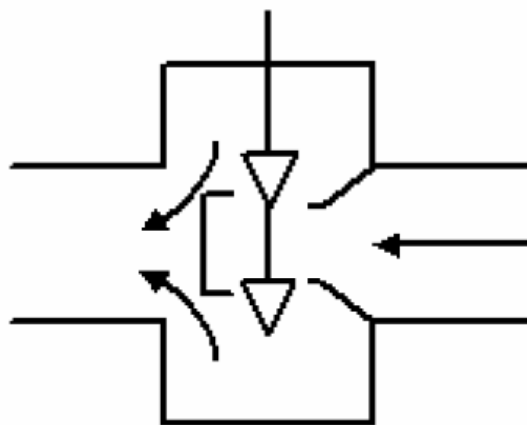
9.3.5. Klasifikacija ventila

- Prema obliku kućišta: ravna, kutna, loptasta, ostala.
- Prema broju krakova: dvokraki, trokraki.

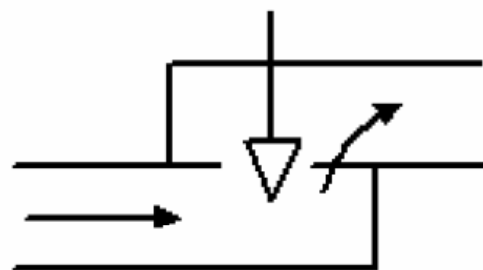


Klasifikacija ventila

- **Prema broju sjedišta** (površina unutarnjeg dijela kućišta, koja je u dodiru s unutarnjim pokretnim dijelovima kada je ventil zatvoren) → jednosjedni, dvosjedni.



Dvosjedni

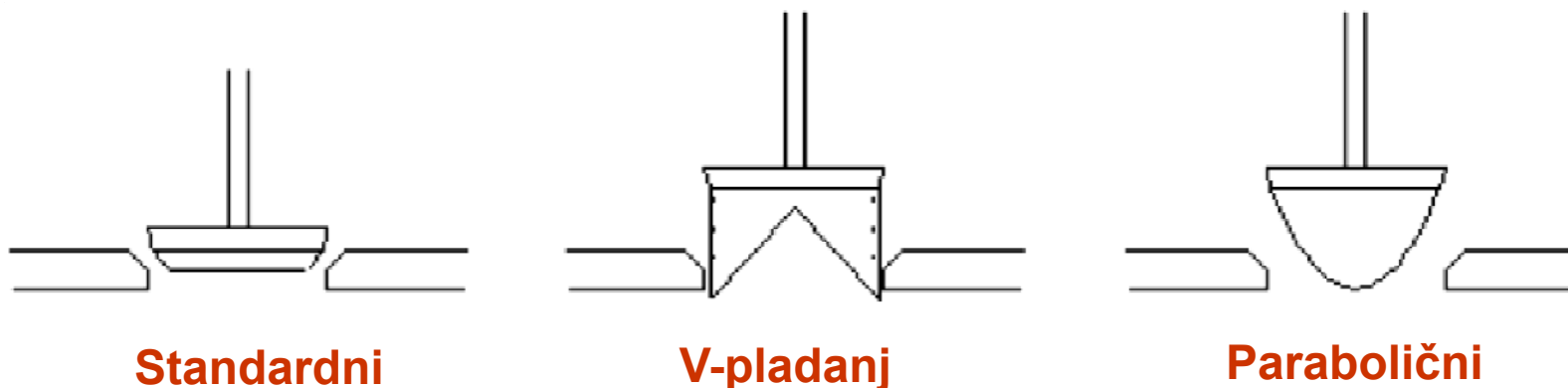


Jednosjedni

- **Prema broju otvora prolaza** → s jedan ili dva otvora (presjek prolaza između sjedišta i pokretnog dijela ventila gdje se stvara prigušenje).
- **Prema načinu spajanja** → spajanje kućišta s cjevovodom može biti pomoću prirubnica, navojnih priključaka ili priključaka koji se navaruju na cjevovod.

Klasifikacija ventila

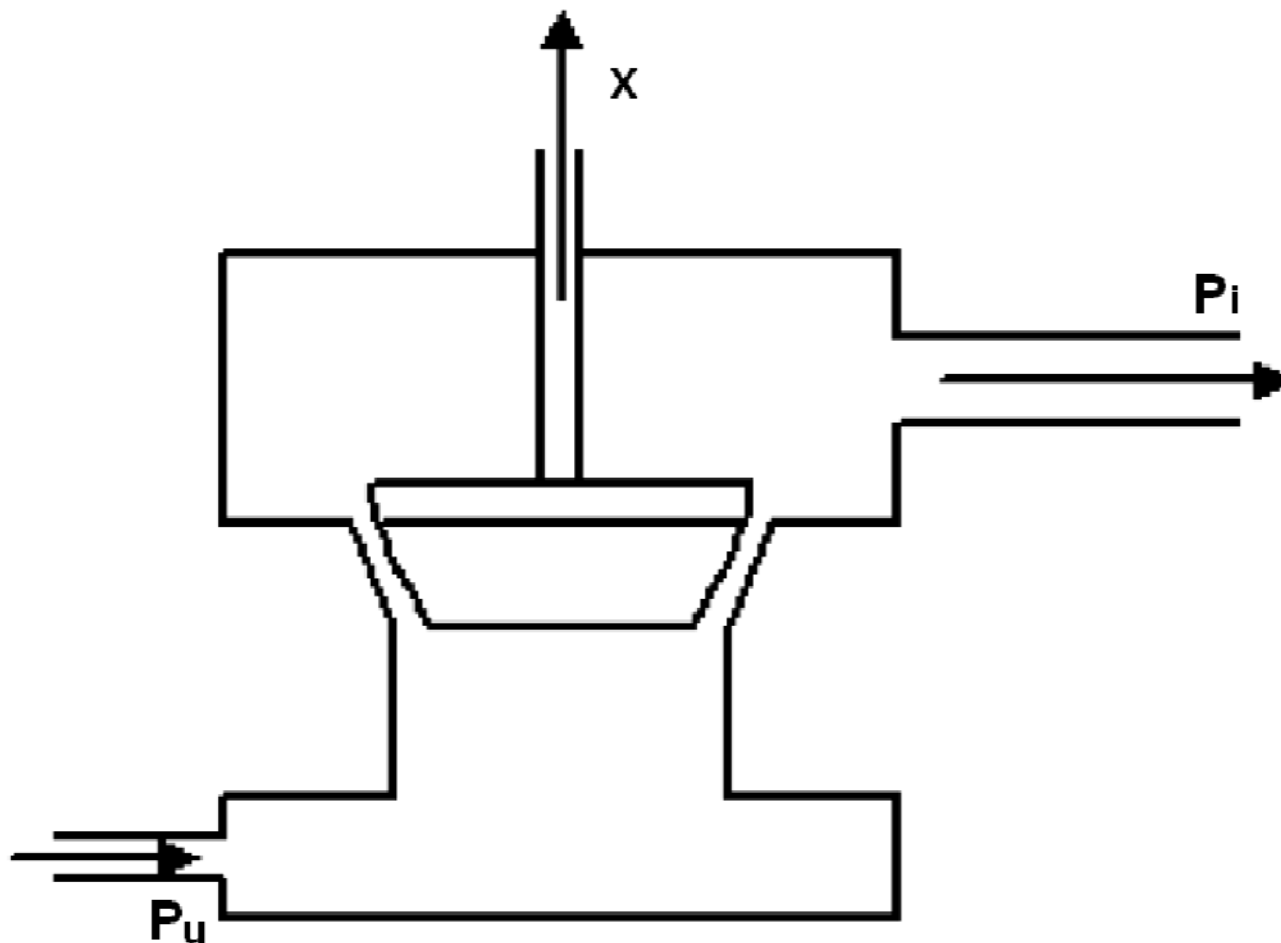
- Prema obliku pladnja → standardni, V-pladanj, parabolični.



- Prema pogonu za pokretanje → pneumatski, hidraulički, električki, kombinirani.
- Prema smjeru djelovanja → ventil se otvara ili zatvara povećanjem ulaznog signala.
- Prema djelovanju u slučaju prekidanja napajanja → ventil se otvara, zatvara, zadržava u zadnjem položaju.
- Prema karakteristici protoka → linearna, istopostotna, polinomska.

9.3.6. Lineariziran model regulacijskih ventila

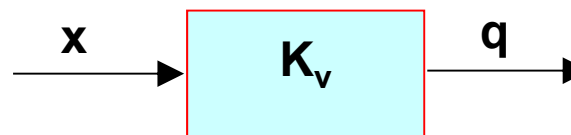
- Male promjene oko radne tačke: $\Delta x = 0 \rightarrow \Delta p_0 = 0$.



Lineariziran model regulacijskih ventila

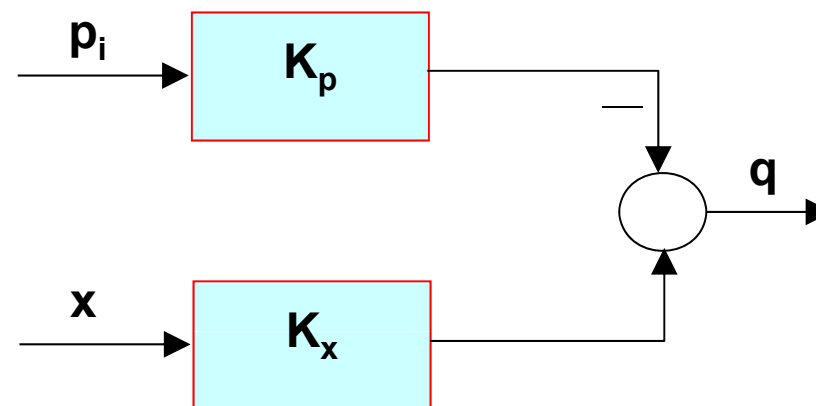
- Iz pogonske karakteristike:

$$\Delta q = K_v \Delta x.$$



- Ako se p_i mijenja, tada vrijedi:

$$q = K_x x + K_p (p_u - p_i).$$

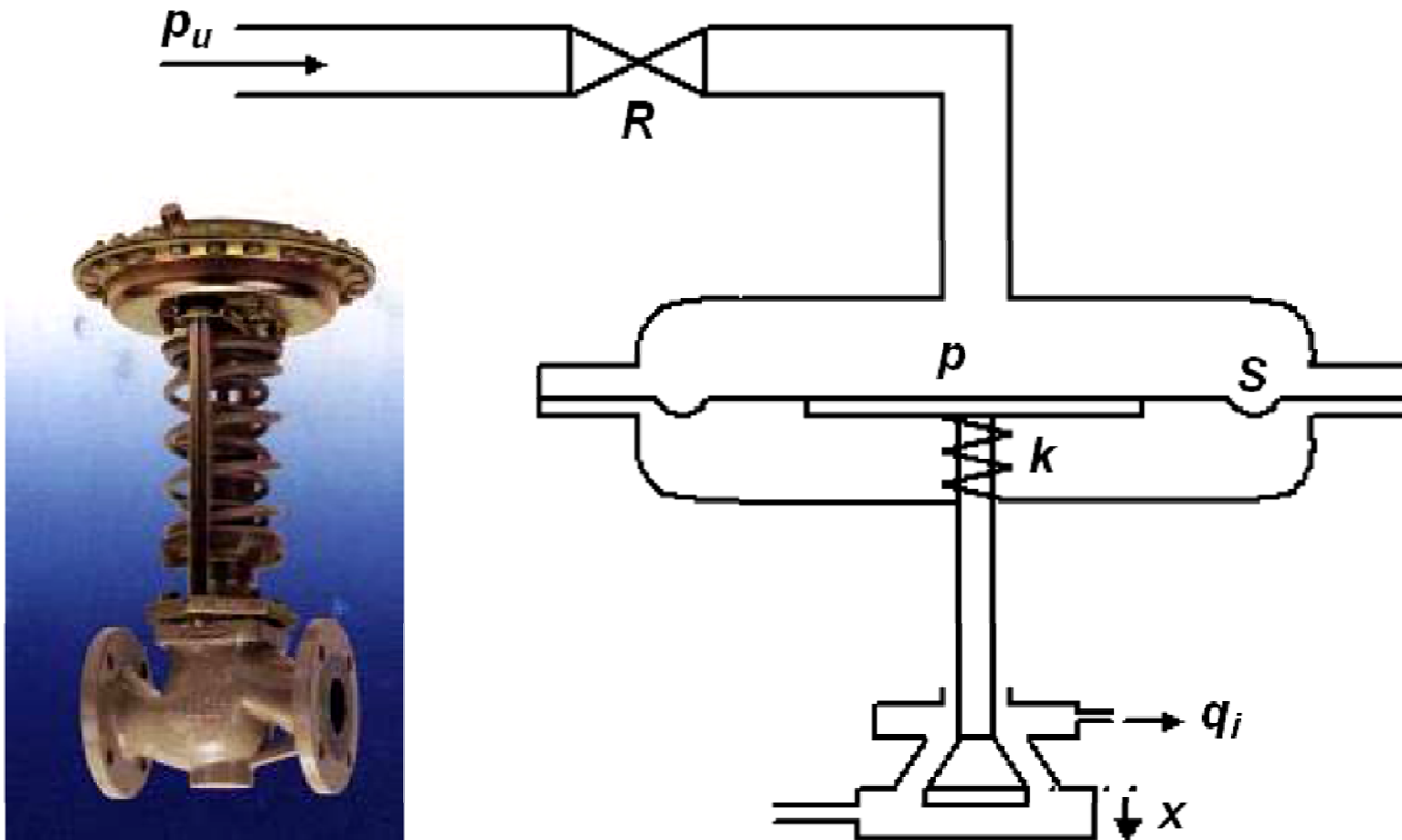


- Uz $p_u = \text{konst.}$:

$$q = K_x x - K_p p_i.$$

Lineariziran model “motor + ventil”

Primjer lineariziranog modela izvršnog člana “pneumatski motor+ventil”



Lineariziran model “ventil+motor”

- Pretpostavke pri izvođenju prijenosne funkcije:
 - masa membrane zanemariva,
 - trenje zanemarivo,
 - $F_v = 0$ (ventil otvara).

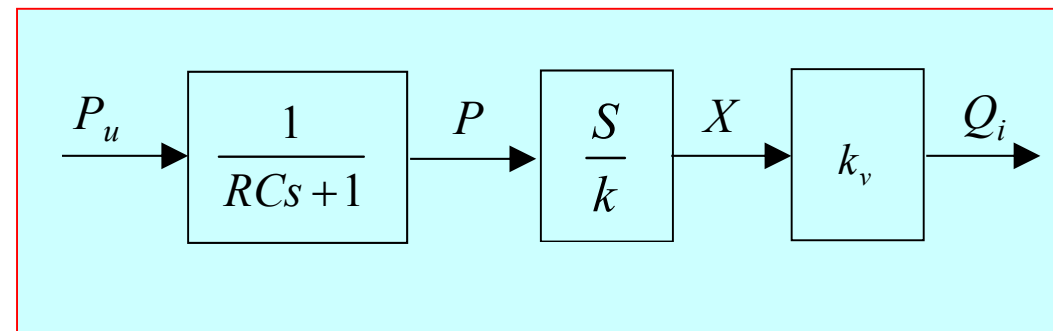
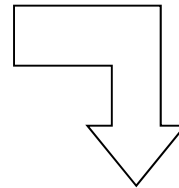
$$\frac{P(s)}{P_u(s)} = \frac{1}{RCs + 1},$$

$$SP(s) = kX(s),$$

$$Q_i(s) = k_v X(s),$$

$$P(s) = \frac{k}{S} X(s) = \frac{k}{S} \frac{1}{k_v} Q_i(s),$$

$$\frac{Q_i(s)}{P_u(s)} = \frac{\frac{Sk_v}{k}}{1 + RCs}.$$



9.3.7. Primjeri regulacijskih ventila i zasuna

Zaporni ventil

(ARI ARMATUREN FABR
LongLife)



Sigurnosno ventil

(ARI ARMATUREN SAFE)

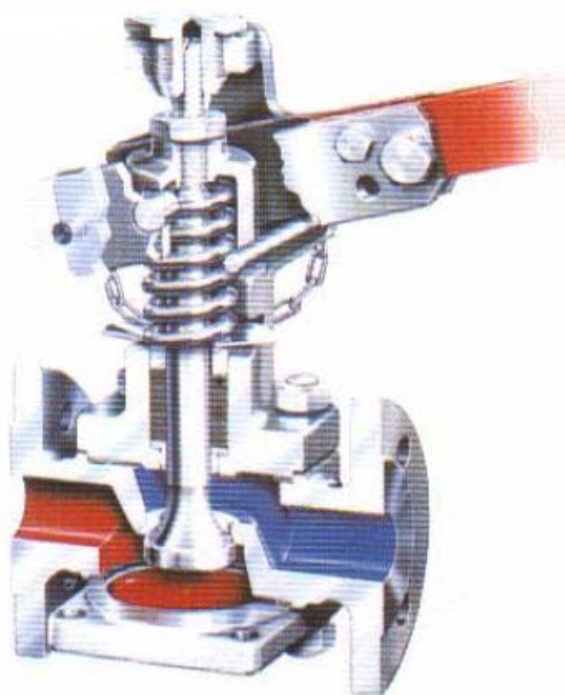


Primjeri regulacijskih ventila i zasuna

Miješajući ventil

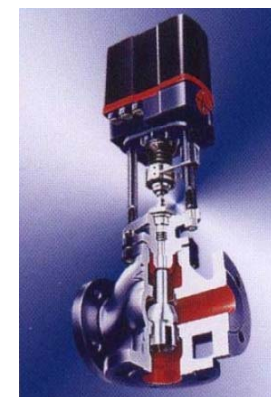
(GESTRA PA/MPA)

Ima samozatvarajuće djelovanje. Otvaranje mu je naglo kako bi se lakše izbacile naslage mulja sa dna kotla. Konstrukcija pneumatskih pogona je izvedena tako da u slučaju nepostojanja komprimiranog zraka u postrojenju je moguće koristiti i vodu iz gradske mreže kao radni medij. Radni tlakovi su mu PN 40 do PN 250, a promjeri priključka DN 20 do DN 50.



Električki upravljani ventil

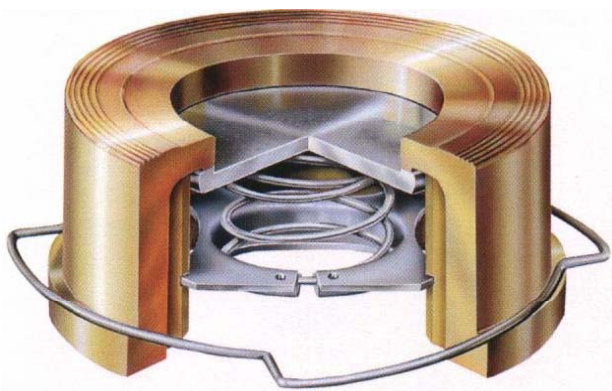
(ARI ARMATUREN STEVI 450)



Primjeri regulacijskih ventila i zasuna

Polupovratni ventil tip RK (GESTRA DISCO)

Izveden je u međuprirubničkoj izvedbi prema DIN, ISO ili ANSI standardima. Ima mogućnost ugradnje u svim položajima. Široka mu je primjena za razne vrste medija: tekućine, plinovi, para, kiseline, lužine, morska voda. Ugrađuje se u postrojenjima grijanja i klimatizacije, te u hemijskoj, naftnoj, prehrambenoj i farmaceutskoj industriji i brodogradnji. Radni tlakovi su mu PN 6 do PN 160, a dimenzije priključka Dn15 do Dn 200.



Leptiraste zaklopke (GESTRA UNIVAM)



Centrično uležištene zaklopke s mekim brtvljenjem u međuprirubničkoj izvedbi prema standardima DIN, ISO ili ANSI. Imaju široko područje primjene: vodopskrbni sistemi, priprema i odvodnja otpadnih voda, prehrambena, petrohemijska i farmaceutska industrija. Mogu biti opremljeni različitim vrstama upravljanja: ručnom polugom, reduktorom sa ručnim kolom, te elektromotornim ili pneumatskim pogonom.

Primjeri modernih pneumatskih aktuatora

Dvostruki ventili



Linearni motor



Dvostruka klipna cilindarska vakumska pumpa



Servo ventil



Ugaona polužna prihvatnica



Kompresorski 250 W motor koji razvija pritisak od 2.8 bara s protokom od 8.7 m³/h.

Koristi se u zatvorenim sistemima upravljanja pozicijom, brzinom, ubrzanjem i silom.

9.4. Prednosti i nedostaci pneumatskih aktuatora

▪ **Prednosti:**

- relativno jeftini,
- jednostavna konstrukcija i eksploatacija,
- velika brzina odziva,
- ne zagađuju radnu sredinu sa tekućinama,
- mogu se koristiti u laboratorijskom radu,
- ne zahtijevaju povratne vodove za ispuštanje zraka.
- koriste standardni industrijski izvor napajanja,
- prikladni za modularni dizajn robota,
- mogu se zaustaviti bez štete.

Prednosti i nedostaci pneumatskih aktuatora

▪ **Nedostaci:**

- teško zadovoljavaju uvjete tačnosti zbog stlačivosti zraka,
- stlačivosti zraka, također, limitira upravljanje,
- proizvodi se buka zbog ispusnih gasova,
- propuštanje zraka može biti zabrinjavajuće,
- dodatno sušenje i filtriranje se može zahtijevati,
- poteškoće s upravljanjem brzinom, uzimajući u obzir teret.

9.5. Primjena pneumatskih aktuatora

- **Proizvodnja**
 - robotske prihvatnice,
 - pomjeranje dijelova,
 - operacije montaže.
- **Medicinski sistemi**
 - alati za bušenje i rezanje,
 - usisavanje i spajanje.
- **Robotika**
 - animatronika,
 - prihvatnice,
 - podvodni roboti.

