

3.3. REGULACIONI VENTIL KAO IZVRŠNI ELEMENT SISTEMA AUTOMATSKOG UPRAVLJANJA

Izvršni element predstavlja vezu između regulatora i procesa. U velikoj većini slučajeva, kao izvršni element se koristi regulacioni ventil kojim se na željeni način menja protok fluida kroz cevovod u koji je ugrađen.

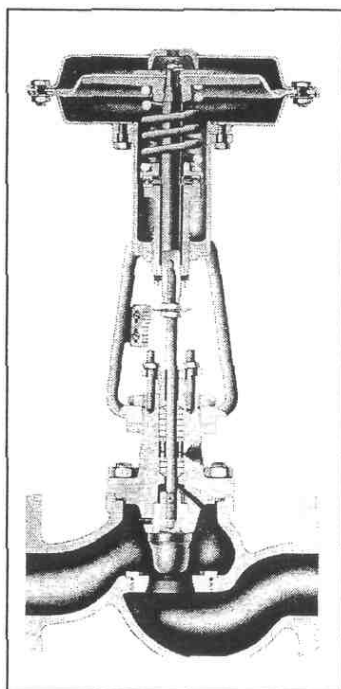
3.3.1. Osnovni elementi i tipovi regulacionih ventila

Regulacioni ventil ima dva osnovna funkcionalna dela: motorni deo i izvršni deo.

Motorni deo regulacionog ventila (*aktuator, servomotor*) je element koji prima upravljački signal iz regulatora i pretvara ga u mehaničko pomeranje vretena ventila.

Izvršni deo regulacionog ventila pretvara pomeranje vratila ventila u promenu protoka fluida kroz cevovod u koji je ugrađen. On se sastoji od tela ventila u kome se nalazi sedište na koje naleže pečurka ili čep na kraju vretena ventila. Pomeranjem vretena ventila naviše i naniže, pečurka manje ili više naleže na sedište ventila i time se postiže povećanje ili smanjenje zazora, a time i protoka kroz ventil.

Na slici 3.3-1. je prikazan presek jednog tipičnog konvencionalnog pneumatskog regulacionog ventila.



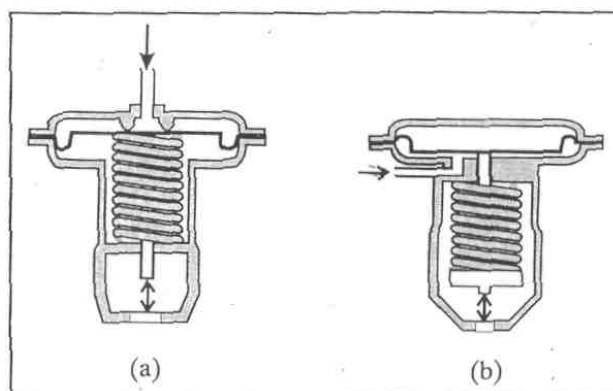
Slika 3.3-1 Tipičan konvencionalni pneumatski regulacioni ventil

3.3.1.1. Klasifikacija regulacionih ventila prema konstrukciji motornog dela

Prema vrsti energije, odnosno signala koji prima motorni deo, razlikujemo sledeće vrste regulacionih ventila:

- *pneumatski* koji je najčešće korišćen, naročito ako u sistemu postoji opasnost od paljenja ili eksplozije (najčešće se koristi konfiguracija pneumatskog motornog dela sa membranom i oprugom opisan u poglavlju 2.3.4.6.);

- *elektropneumatski* koji se koristi u kombinaciji sa električnim upravljačkim sistemom i u kome je obuhvaćen pretvarač električnog u pneumatski signal;
 - *hidraulički* koji ima oblik hidrauličkog klipa koji se pomera pomoću tečnosti pod pritiskom i koristi se kada treba ostvariti velike sile, odnosno momente;
 - *elektrohidraulički* koji ima iste karakteristike kao hidraulički, samo obuhvata i pretvarač električnog u hidraulički signal, pa se koristi u kombinaciji sa električnim upravljačkim sistemom;
 - *električni* koji može biti na principu elektromotora ili solenoida i čije se korišćenje izbegava u hemijskoj industriji, zbog mogućnosti varničenja koje može izazvati eksploziju.
- Na osnovu toga da li akcija servomotora teži da otvori ili da zatvori ventil, servomotore delimo na:
- *servomotore sa direktnim dejstvom*, koji teže da zatvore ventil koji je normalno otvoren (slika 3.3-2(a));
 - *servomotore sa inverznim dejstvom* koji teže da otvore ventil koji je normalno zatvoren (slika 3.3-2(b)).



Slika 3.3-2. Pneumatski servomotor (a) sa direktnim i (b) sa inverznim dejstvom

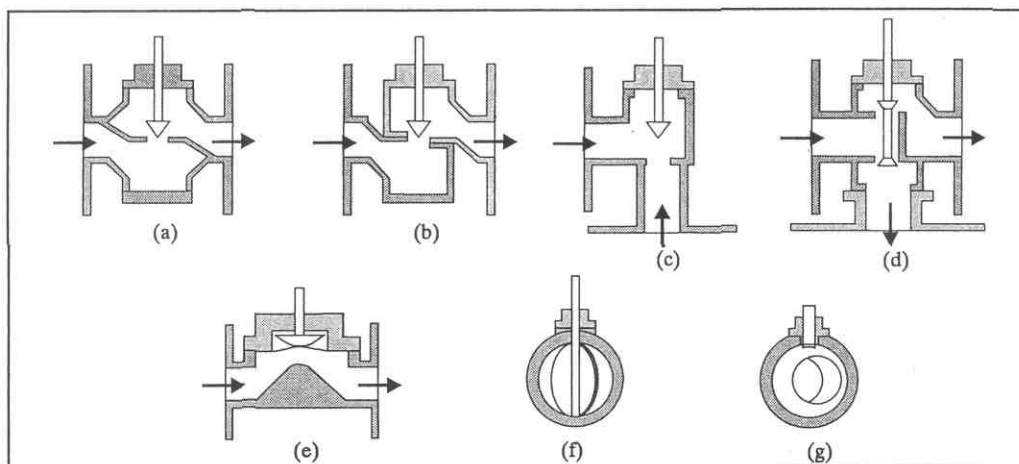
3.3.1.2. Klasifikacija ventila prema konstrukciji tela ventila

Telo ventila može biti konstruisano na različite načine. Najčešći tipovi koji se koriste kod regulacionih ventila su sledeći:

- konvencionalni jednodelni
- konvencionalni dvodelni
- ugaoni
- trokraki
- leptir
- loptasti
- membranski
- specijalne konstrukcije.

Kod ugaonog ventila struja menja pravac za 90° , što je povoljno kada je potrebna velika redukcija pritiska u ventilu. Trokraki ventili se koriste u slučaju mešanja dve struje ili u slučaju razdvajanja jedne struje na dva dela. Leptir ventili daju vrlo male otpore strujanju, dok loptasti obezbeđuju vrlo dobro zaptivanje, a membranski su pogodni za rad sa agresivnim i toksičnim fluidima.

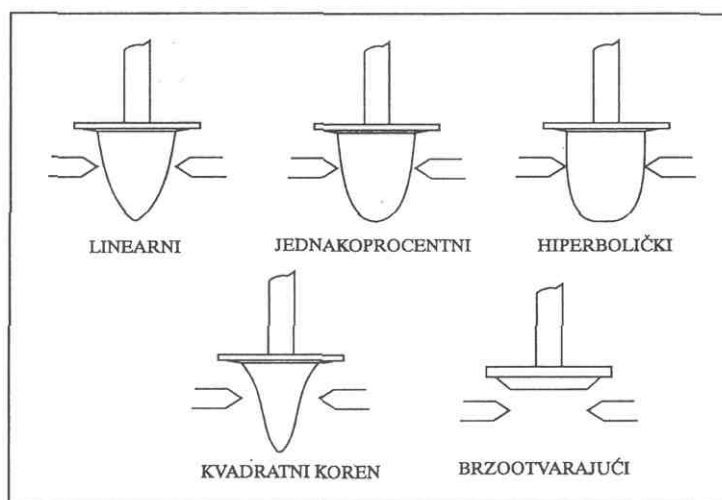
Šematski prikaz različitih tipova tela ventila je dat na slici 3.3-3.



Slika 3.3-3. Različiti tipovi tela ventila (a) jednodelni, (b) dvodelni, (c) ugaoni, (d) troktaki, (e) membranski, (f) leptir, (g) loptasti

3.3.1.3. Klasifikacija ventila prema broju i obliku čepova i sedišta

Konvencionalni ventili mogu biti sa jednim ili sa dva sedišta, odnosno čepa. Od oblika čepa zavisi statička karakteristika ventila, koja je značajna za karakteristiku celog regulacionog ventila. Na slici 3.3-4. su prikazani primeri različitih oblika čepova regulacionih ventila.



Slika 3.3-4. Različiti oblici čepova regulacionih ventila

3.3.2. Statičke i dinamičke karakteristike regulacionih ventila

Kao i kod ostalih elemenata sistema upravljanja, i kod regulacionog ventila su značajne i statičke i dinamičke karakteristike.

3.3.2.1. Statičke karakteristike regulacionih ventila

Poznavanje statičke karakteristike regulacionog ventila je od velikog značaja, jer ona utiče na ukupnu statičku karakteristiku regulacionog sistema (množi se sa statičkim karakteristikama objekta i mernog elementa). Ako je statička karakteristika ventila nelinearna, ona može da uvede nelinearnost u regulaciono kolo. Sa druge strane, pravilnim izborom nelinearne statičke

karakteristike regulacionog ventila može se kompenzovati nelinearnost procesa i na taj način izvršiti linearizacija sistema.

Protok fluida kroz regulacioni ventil zavisi od veličine ventila, pada pritiska na njemu, pozicije vratila ventila i karakteristika fluida. Projektna jednačina zavisi od vrste fluida i režima strujanja:

- za nestišljive tečnosti i $Re > 1000$:

$$F = C_v f(x) \sqrt{\frac{\Delta p_v}{\rho}} \quad (3.3-1)$$

- za nestišljive tečnosti i $Re < 1000$ uvodi se korekcija za viskoznost:

$$F = C_v f(x) \Psi_G \sqrt{\frac{\Delta p_v}{\rho}} \quad (3.3-2)$$

- za gasove i pare uvodi se korekcija zbog stišljivosti:

$$F = C_v f(x) \varepsilon \sqrt{\frac{\Delta p_v}{\rho}} \quad (3.3-3)$$

gde je:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 1 & \text{za } \Delta p_v < 0.1 p_1 \\ \varepsilon &= 1 - \beta \frac{\Delta p_v}{p_1} & \text{za } 0.1 p_1 < \Delta p_v < 0.5 p_1 \end{aligned}$$

Koeficijent β zavisi od vrste fluida i ima sledeće vrednosti:

$$\begin{aligned} \beta &= 0.50 & \text{za zasićenu vodenu paru} \\ \beta &= 0.47 & \text{za pregrejanu vodenu paru i troatomne gasove} \\ \beta &= 0.45 & \text{za vazduh i dvoatomne gasove} \\ \beta &= 0.42 & \text{za jednoatomne gasove.} \end{aligned}$$

U gornjim jednačinama je:

- F - zapreminski protok fluida
- C_v - koeficijent veličine ventila
- $f(x)$ - protočna karakteristika ventila
- x - položaj vretena ventila
- ρ - gustina fluida
- Δp_v - pad pritiska na ventilu
- Ψ_G - popravni koeficijent zbog viskoznosti koji je funkcija ite-broja
- p_1 - pritisak radnog fluida ispred ventila

Protočne karakteristike ventila. Od oblika protočne karakteristike zavisi oblik statičke karakteristike ventila. Najčešće korišćene protočne karakteristike su prikazane na slici 3.3-5.

Matematičke zavisnosti ovih protočnih karakteristika su sledeće:

- za linearnu:

$$f(x) = x \quad (3.3-4)$$

- za jednakoprocentnu:

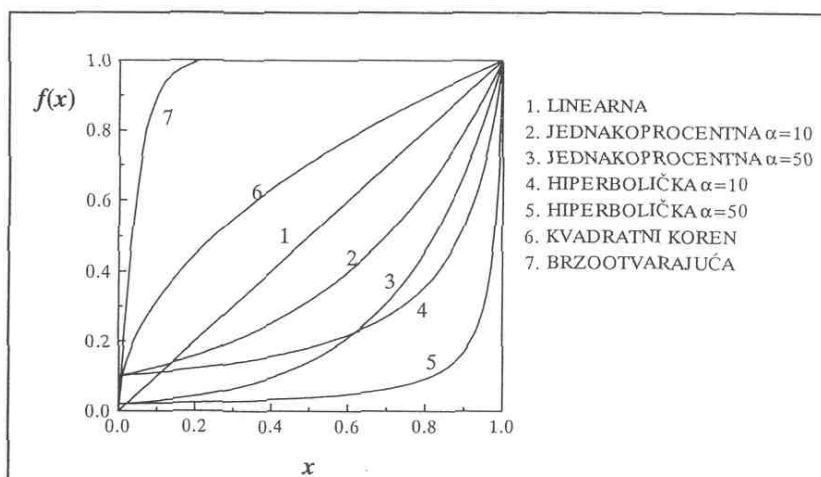
$$f(x) = \alpha^{x-1} \quad (3.3-5)$$

- za hiperboličnu:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha - (\alpha - 1)x} \quad (3.3-6)$$

- za karakteristiku oblika kvadratnog korena:

$$f(x) = \sqrt{x} \quad (3.3-7)$$



Slika 3.3-5. Najčešće korišćene protočne karakteristike regulacionih ventila

Oblik protočne karakteristike zavisi od oblika čepa i sedišta ventila. Oblici čepova prikazani na slici 3.3-4. odgovaraju različitim karakteristikama prikazanim na slici 3.3-5.

Često se, umesto protočne karakteristike, koristi *koeficijentpropusne sposobnosti* ventila, koji se definiše na sledeći način:

$$K_v = C_v f(x) \quad (3.3-8)$$

$f(x)$, odnosno $K_v(x)$, predstavlja konstruktivnu karakteristiku ventila, koja je identična statičkoj karakteristici samo kada je pad pritiska na ventilu konstantan. Ove karakteristike daje proizvođač ventila.

Statička karakteristika ventila kada pad pritiska na njemu nije konstantan. U svim slučajevima upravljanja protokom fluida pomoću regulacionog ventila dolazi do promene pada pritiska na ventilu u toku rada. Pad pritiska na regulacionom ventilu je obično deo ukupnog pada pritiska u sistemu i menja se u zavisnosti od toga koliko je regulacioni ventil otvoren. Ta činjenica izaziva deformaciju "spoljašnje" statičke karakteristike i ona postaje različita od "unutrašnje", konstruktivne karakteristike.

Pad pritiska na ventilu se može izraziti kao:

$$\Delta p_v = \xi_v \frac{v^2 \rho}{2} \quad (3.3-9)$$

gde je v brzina fluida u cevovodu, a ξ_v koeficijent mesnog otpora ventila.

S druge strane pad pritiska na regulacionom ventilu Δp_v je jednak razlici razici pada pritiska u celom sistemu, uključujući ventil, Δp_s i pada pritiska u celom sistemu bez ventila Δp_c :

$$\Delta p_v = \Delta p_s - \Delta p_c \quad (3.3-10)$$

Pad pritiska Δp_c je proporcionalan kvadratu brzine fluida u cevovodu, odnosno kvadratu protoka:

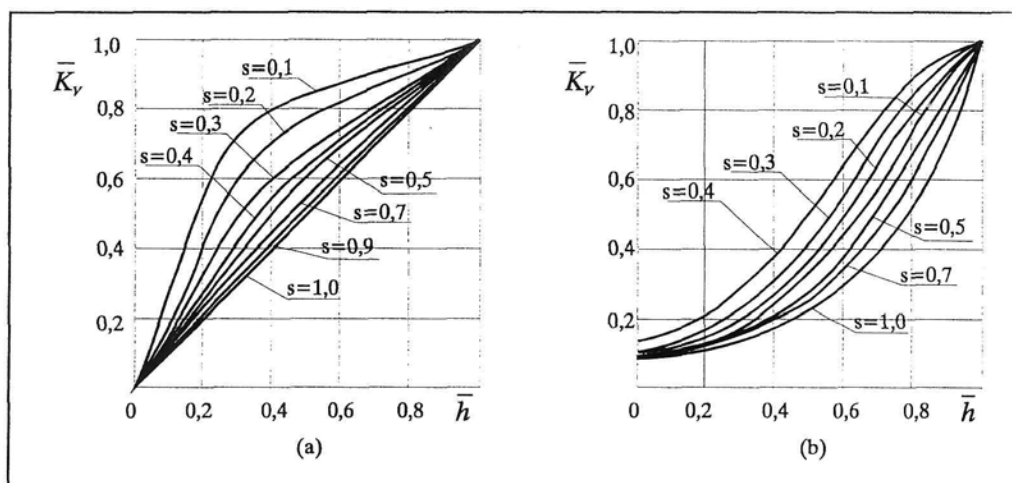
$$\frac{\Delta p_c}{\Delta p_{c \max}} = \frac{F^2}{F_{\max}^2} = \bar{F}^2 \quad (3.3-11)$$

Indeks $\max$ u gornjoj jednačini se odnosi na veličine pri maksimalnom protoku, odnosno pri maksimalno otvorenom ventilu.

Jedna od bitnih karakteristika pri eksploataciji regulacionog ventila je odnos pada pritiska na ventilu i ukupnog pada pritiska u sistemu, pri maksimalnom protoku, odnosno pri potpuno otvorenom ventilu:

$$s = \frac{\Delta p_{v \max}}{\Delta p_{s \max}} \quad (3.3-12)$$

Na slici 3.3-6. je prikazan izgled stvarnih protočnih karakteristika regulacionog ventila, za $n = 1$, i to za: (a) ventil sa linearnom i (b) ventil sa jednakoprocentnom konstruktivnom karakteristikom.



Slika 3.3-6. Protočne karakteristike regulacionog ventila pri promenljivom padu pritiska (za $n = 1$) (a) za linearni ventil; (b) za jednakoprocentni ventil

NAPOMENA: Za industrijsku primenu se mogu koristiti sledeća praktična pravila:

- (1) ako je $s > 0,7$, deformacija protočne karakteristike nije velika i regulacioni ventil sa konstruktivno linearnom karakteristikom daje približno linearnu karakteristiku;
- (2) ako je $s < 0,3$, jednakoprocentni regulacioni ventil daje približno linearnu karakteristiku.

Ako je $n \neq 1$, nalaženje realne protočne karakteristike regulacionog ventila u eksploataciji se znatno komplikuje.

3.3.2.2. Dinamičke karakteristike regulacionih ventila

Dinamičke karakteristike ventila (izvršnog dela regulacionog ventila) su uglavnom zanemarljive u odnosu na dinamičke karakteristike servomotora sa kojim je spregnut. Može se reći da ukupnu statičku karakteristiku izvršnog elementa određuje ventil (izvršni deo), a njegovu dinamičku karakteristiku servomotor (motorni deo regulacionog ventila). Ukupna dinamička karakteristika izvršnog elementa (ventila sa servomotorom) se najčešće može prikazati prenosnom funkcijom:

$$G_{IE}(s) = \frac{K_{IE}}{\tau_{IE}s + 1} e^{-D_{IE}s} \quad (3-3-15)$$

Dinamika servomotora treba da bude takva da ne utiče značajno na ukupnu dinamiku sistema upravljanja, odnosno da se može zanemariti u odnosu na dinamiku samog procesa kojim se upravlja. Najčešće se zahteva da bude zadovoljen uslov:

$$\tau_{IE} < (0.2 - 0.3) \tau_p \quad (3.3-16)$$

$$\tau_{IE} < (0.2 - 0.3) \tau_p$$

gde su i_p i D_p vremenska konstanta i čisto kašnjenje procesa.

3.3.3 Izbor i specifikacija regulacionog ventila

3.3.3.1. Opšte preporuke za izbor regulacionog ventila

U opštem slučaju treba primeniti konvencionalne ventile sa jednim ili dva sedišta i koaksijalnim ulazom i izlazom. Druge konstrukcije se primenjuju u sledećim slučajevima:

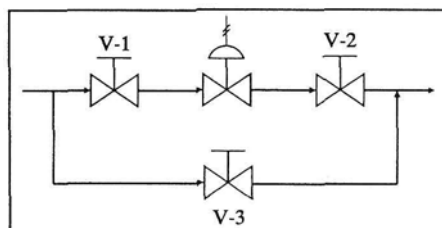
- ugaoni ventili se koriste u slučajevima kada nisu primenljivi konvencionalni ventili zbog visokog pritiska u struji fluida, kada je potrebno ostvariti veliki pad pritiska kroz ventil ili kada je radni fluid jako viskozan;
- loptasti ventili se primenjuju u ulozi strujnih prigušnica, kada se zahteva veliki opseg protoka i dobro zaptivanje (primena za blokadu strujanja pri ispadu postrojenja) i kod prisustva čvrstih čestica u fluidu;
- trokraki ventili se primenjuju kada se tok deli na dva dela ili kod spajanja dva toka. Treba izbegavati njihovo korišćenje pri visokim temperaturama ($>150^{\circ}\text{C}$) i kod velikih prečnika cevovoda.

3.3.3.2. Dodatna oprema regulacionih ventila

Regulacioni ventil je često dodatno opremljen delovima kao što su točak za ručno otvaranje, pozicioner i drugi.

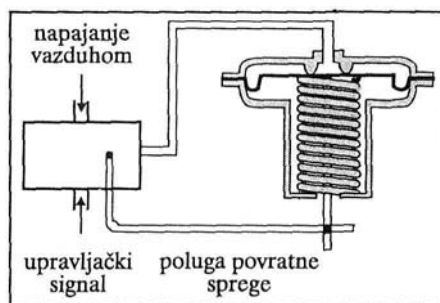
Točak za ručno otvaranje i zatvaranje ventila

Treba predvideti u slučajevima kada ne postoji zaobilazna linija oko ventila. Uobičajeni način ugrađivanja regulacionog ventila je šematski prikazan na slici 3.3-7. Regulacioni ventil se ugrađuje između dva ručna ventila (V-1 i V-2), a paralelno sa njim se ugrađuje još jedan ručni ventil ili slavina (V-3).



Slika 3.3-7. Uobičajeni način ugrađivanja regulacionog ventila

Pozicioner. Kod pneumatskih ventila, ponekad, zbog trenja vratila ili sila koje su rezultat strujanja fluida, položaj vratila ventila nije proporcionalan ulaznom signalu. U tim slučajevima se na ventilu postavlja pneumatski ili elektropneumatski pojačavački uređaj koji ostvaruje povratnu spregu položaja čepa u odnosu na sedište, i naziva se pozicioner. Pozicioner zapravo predstavlja regulator povratne sprege sa velikim pojačanjem, koji je prikačen za vratilo ventila i reguliše njegov položaj. Pored toga, pomoću pozicionera se može promeniti opseg ulaznog signala koji stiže iz regulatora u odnosu na opseg rada ventila. Sematski prikaz pozicionera je dat na slici 3.3-8. Zavisno od karakteristika motornog dela ventila (površine membrane, dužine puta vratila itd), pozicioner može značajno da utiče na dinamiku regulacionog ventila, a time i ukupnog sistema.



Slika 3.3-8. Šematski prikaz pneumatskog motornog dela sa pozicionerom

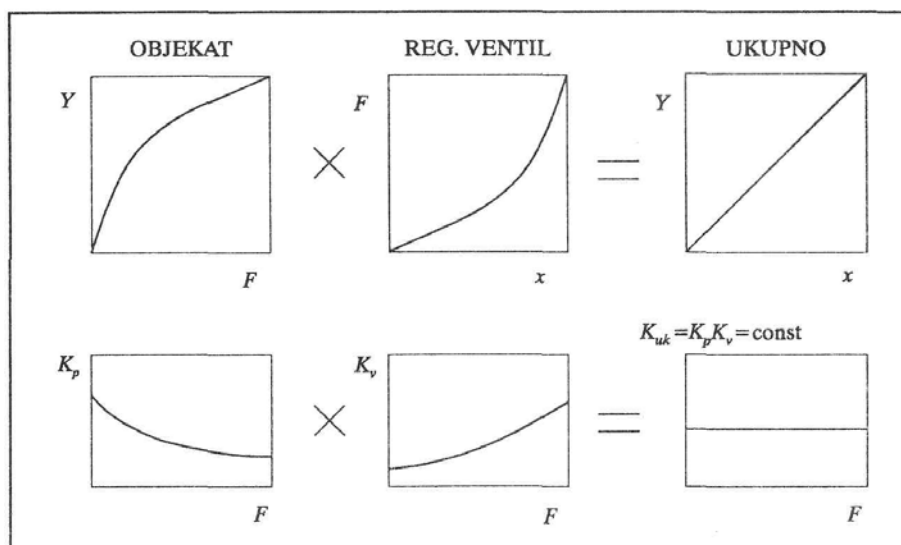
3.3.3.3. Izbor protočne karakteristike regulacionog ventila

Za izbor protočne karakteristike ventila je neophodno prethodno poznavanje statičke karakteristike procesa. Pri tome se mogu koristiti sledeća generalna pravila:

- (1) Za linearne procese treba koristiti regulacioni ventil sa linearnom protočnom karakteristikom, ako se pad pritiska na ventilu ne menja značajno u toku rada. Ukoliko se pad pritiska na ventilu smanjuje sa povećanjem protoka, treba koristiti regulacioni ventil sa jednakoprocenptom karakteristikom.
- (2) Za nelinearne procese treba utvrditi potrebnu karakteristiku regulacionog ventila da bi se nelinearnost kompenzovala.
- (3) Brzo otvarajuća karakteristika se koristi kod dvopoložajne regulacije, u sistemima blokade i kada je potrebno dobro zaptivanje.

Ukoliko objekat upravljanja ima nelinearnu statičku karakteristiku, može se izvršiti njegova linearizacija izborom regulacionog ventila sa odgovarajućom nelinearnom protočnom karakteristikom. Nelinearnost regulacionog ventila treba da bude inverzna nelinearnosti objekta upravljanja. To se postiže ukoliko je funkcija kojom je definisana zavisnost pojačanja regulacionog ventila od protoka recipročna odgovarajućoj funkciji koja odgovara objektu upravljanja. Ovaj postupak za nalaženje potrebne protočne karakteristike ventila da bi se kompenzovala nelinearnost objekta upravljanja je grafički prikazan na slici 3.3-9.

PREPORUKA: Linearizaciju objekta upravljanja regulacionim ventilom treba vršiti samo ako se u punom opsegu rada postrojenja pojačanje objekta upravljanja menja za više od 20 %.



Slika 3.3-9. Postupak nalaženja protočne karakteristike ventila za kompenzaciju nelinearnosti objekta upravljanja

3.2. TRANSMISIONE LINIJE

Da bi se ostvario prenos signala od mernog elementa do regulatora i od regulatora do izvršnog elementa, neophodno je ostvariti međusobnu vezu ovih elemenata. Za to se koriste transmisionne linije. Dinamičke karakteristike transmisionih vodova se najčešće mogu zanemariti. Međutim, ako su promene u sistemu vrlo brze, ili su transmisioni vodovi jako dugi, kod pneumatskih sistema se mora uzeti u obzir i njihova dinamička karakteristika. Odnos pritiska na izlazu iz, i na ulazu u transmisioni vod, može se prikazati sledećom prenosnom funkcijom:

$$\frac{P_0(s)}{P_i(s)} = \frac{e^{-D_t s}}{\tau_t s - 1}, \quad D_t / \tau_t \approx 0.25$$