



MERENJE PROTOKA

Definicija protoka

Količina sipkastog materijala, tečnosti ili gasa koja protekne kroz posmatrani poprečni presek za jedinicu vremena:

Zapreminski protok- m^3/s

$$Q_V = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{dV}{dt}$$

Za fluid koji protiče prosečnom brzinom $v[\text{m/s}]$ kroz poprečni presek $A[\text{m}^2]$ zapreminski protok je

$$Q_V = vA$$

Maseni protok – kg/s

$$Q_m = \frac{dm}{dt} [\text{kg/s}]$$

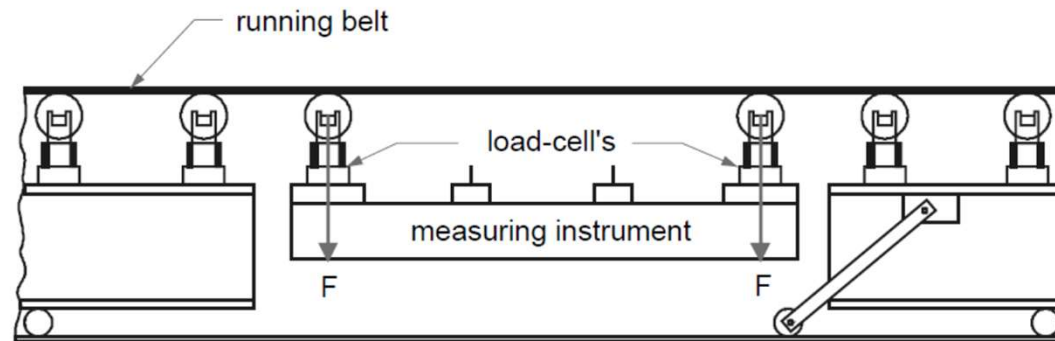
Odnos masenog i
zapreminskog protoka

$$Q_m = \rho Q_V = \rho \frac{dV}{dt}$$

Merenja protoka sipkastog materijala

- **Protok sipkastog materijala** - svodi se na merenje težine. U industrijskim procesima sipkasti materijali obično se prenose transportnim trakama, koje se kreću brzinom $v[m/s]$. Deo trake (dužine $l[m]$) služi kao tas ispod kojeg je smešten senzor sile (težine), koji određuje masu materijala na tom delu trake $m[kg]$ i na svom izlazu daje maseni protok:

$$Q_m = \frac{mv}{l} [kg/s]$$



Specifičnosti kod merenja protoka gasova

- **Protok gasova** - merenje protoka gasova zavisi od gustine koja se menja sa promenom temperature i pritiska. Informacija o gustini gasa u radnim uslovima može da se dobije merenjem radne temperature i pritiska, na osnovu gustine gasa u normalnom stanju, ρ_n . Normalno stanje je definisano pritiskom $p_n = 101325$ Pa i temperaturom $T_n = 273,15$ K, pri relativnoj vlažnosti $\varphi = 0\%$. Maseni protok se na taj način može izraziti preko:

$$Q_m = \rho Q_V = \rho_n \frac{p T_n}{p_n T k} Q_V$$

gde se koeficijentom k koriguje neidealnost gasova pri visokim pritiscima.

Dobija se iz toga što je za idealan gas:

$$pV = nRT, n = \frac{m}{M}$$

$$pV = \frac{m}{M} RT, \rho = \frac{m}{V}$$

$$p = \rho \frac{R}{M} T$$

$$\frac{R}{M} = \text{const} = \frac{p}{\rho T} = \frac{p_n}{\rho_n T_n}$$

$$\rho = \rho_n \frac{p T_n}{p_n T}$$

p – apsolutni pritisak gasa

V – zapremina gasa

T – temperatura gasa u K

n – broj molova gasa

R – univerzalna gasna konstanta

m – masa gasa

M – molarna masa gasa

ρ – gustina gasa

Protokomeri sa prigušnicom

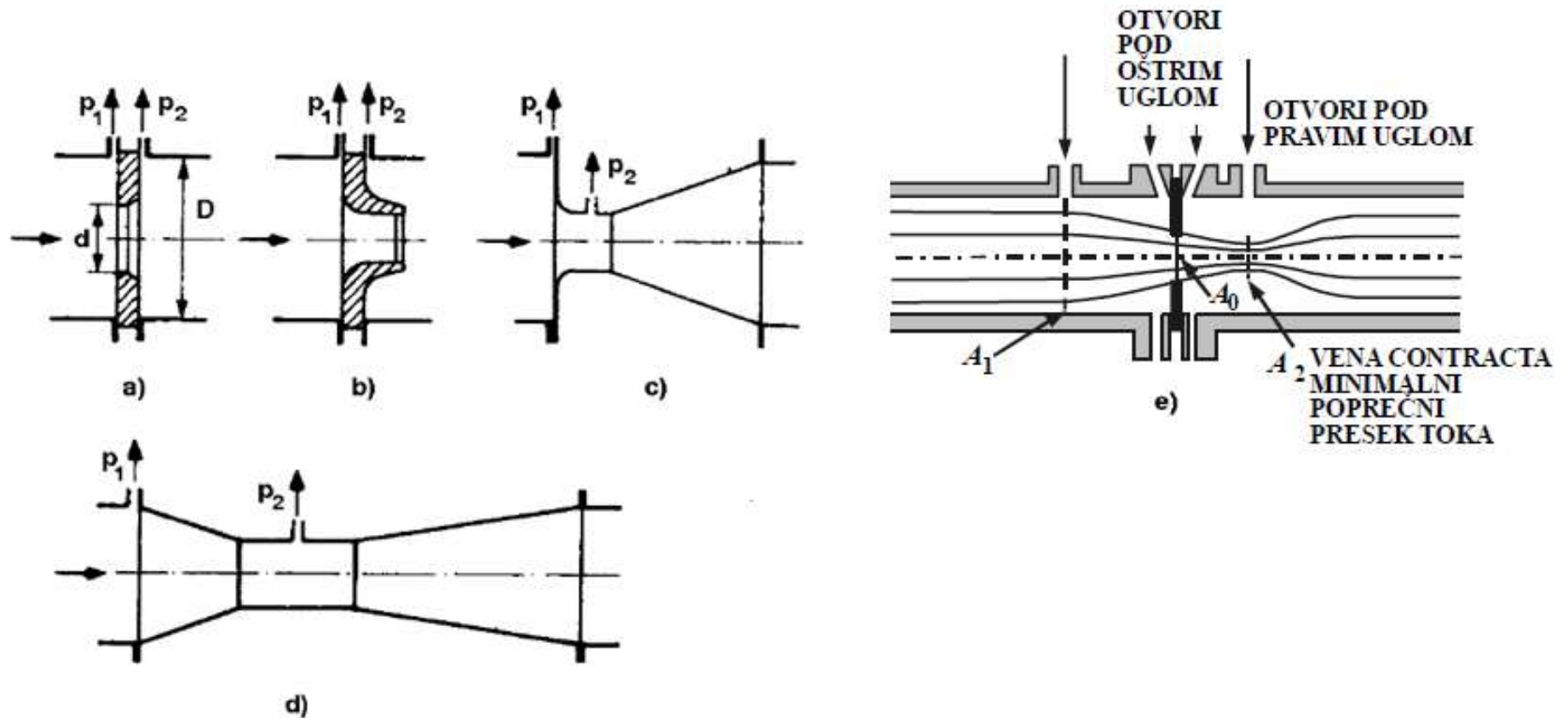
- Koriste se za merenje protoka fluida
- Bazira se na Bernulijevoj jednačini

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gh = \text{const}$$

- U tok fluida postavlja se prepreka u obliku suženja cevi
- Zbog suženja, fluid na izlasku iz prepreke ima povećanu brzinu
- Zbog povećane brzine, iza prepreke dolazi do smanjenja pritiska
- Protok je proporcionalan kvadratnom korenu razlike pritiska ispred i iza prepreke

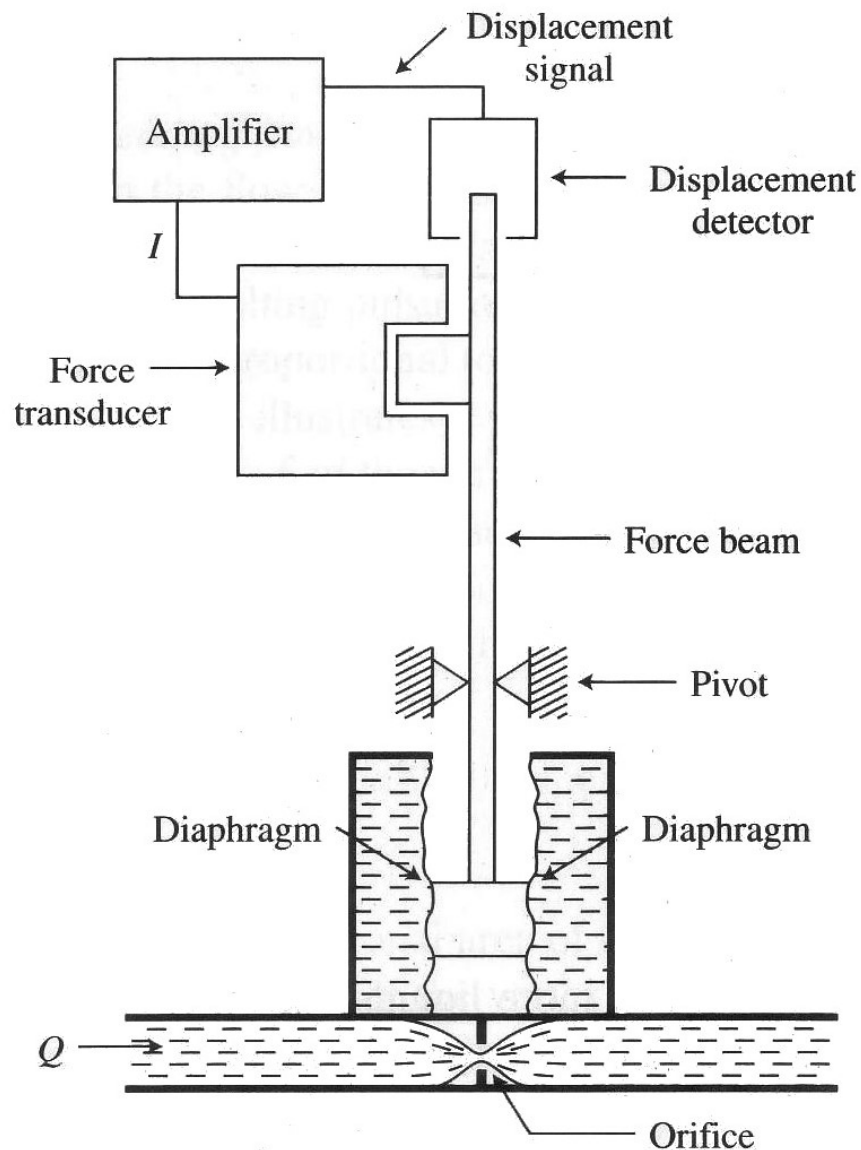
$$Q = k \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}$$

Tipični oblici prigušnice

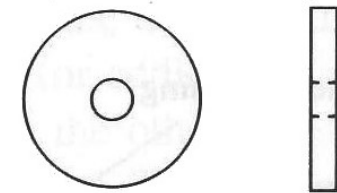


Senzori protoka sa prigušnicom: a) merna blenda, b) mlaznica, c) Venturijeva mlaznica, d) Venturijeva cev, e) deo cevovoda sa mernom blendom

Princip Δp protokomera

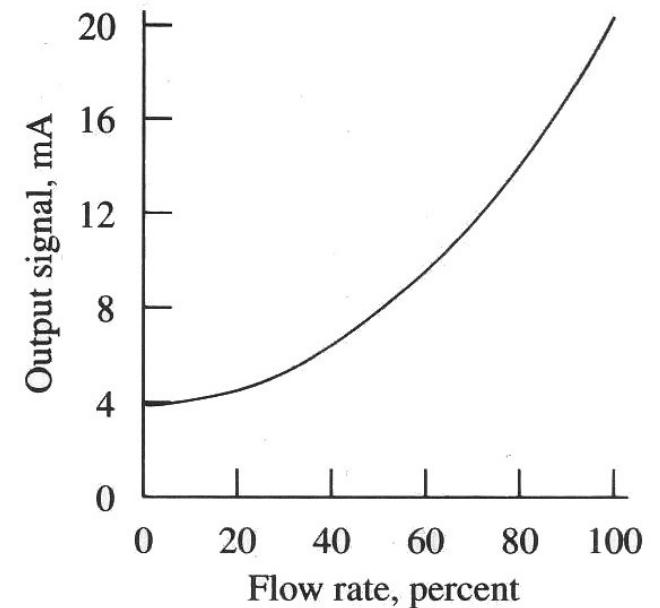


b) A typical differential pressure flow transducer



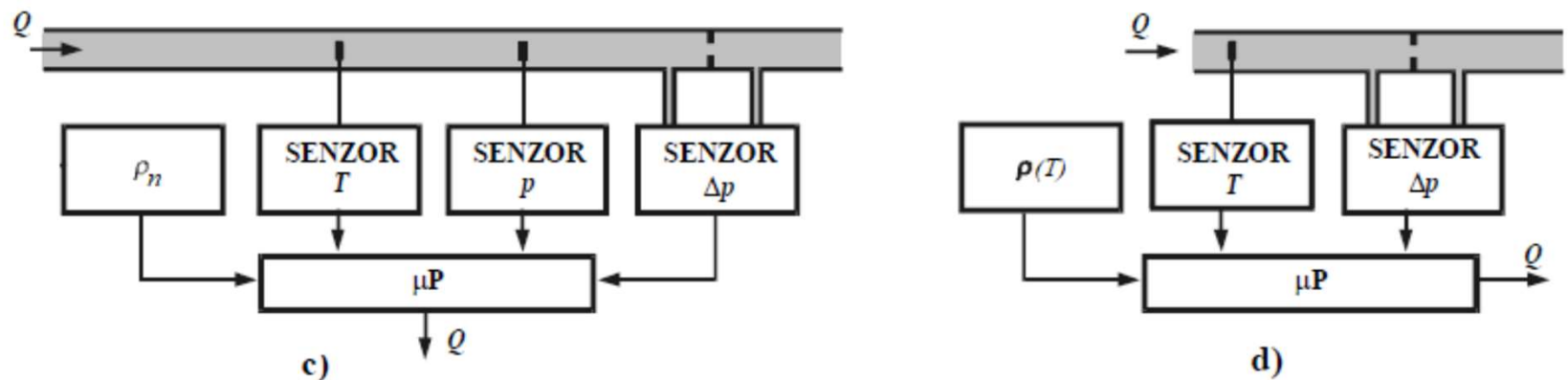
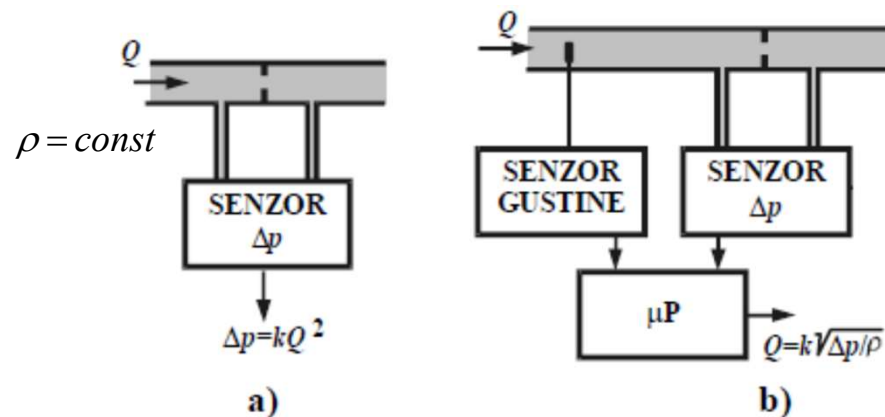
a) A typical orifice plate

Merna blenda



c) A typical calibration curve

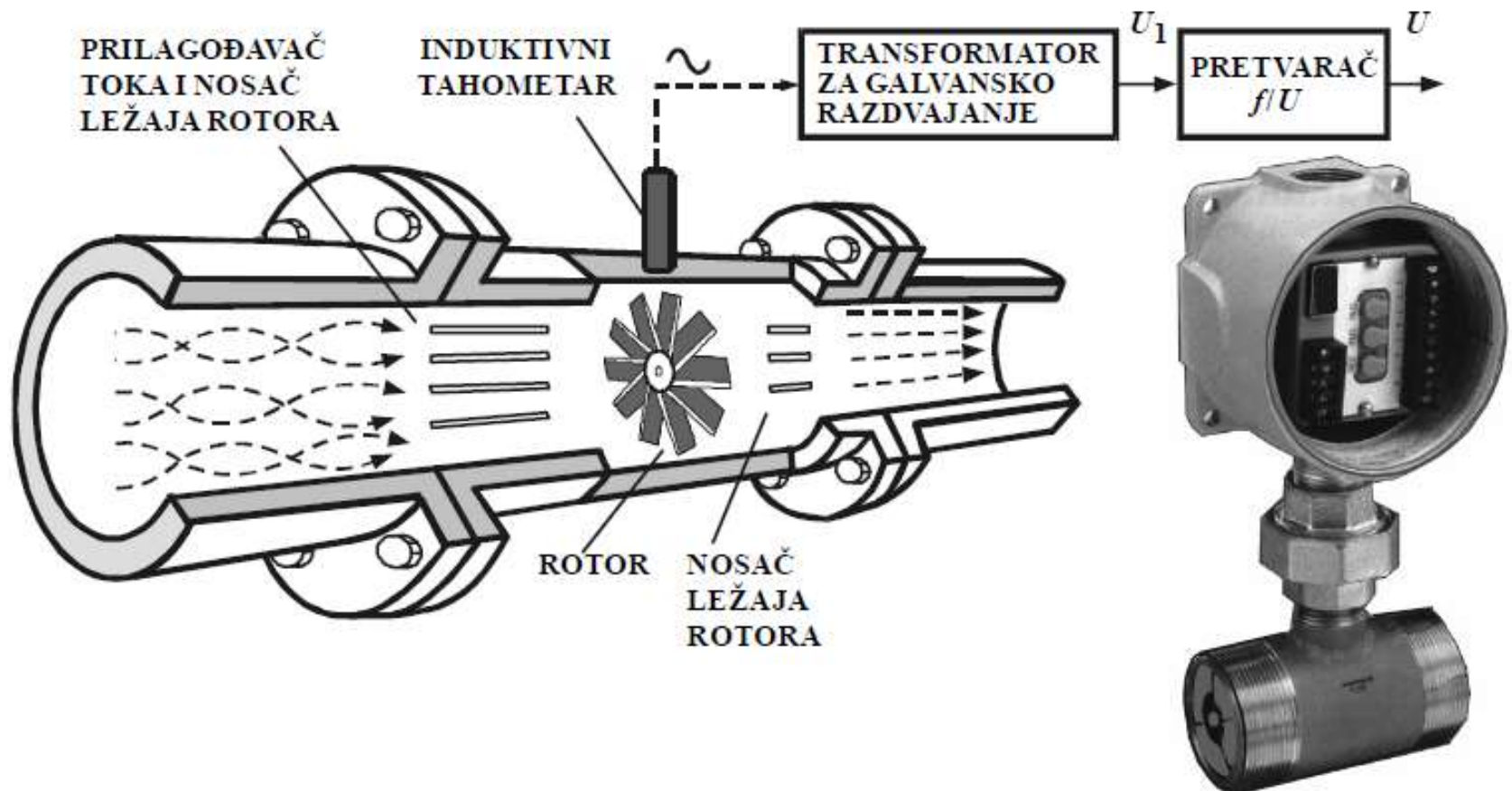
Struktura Δp protokomera



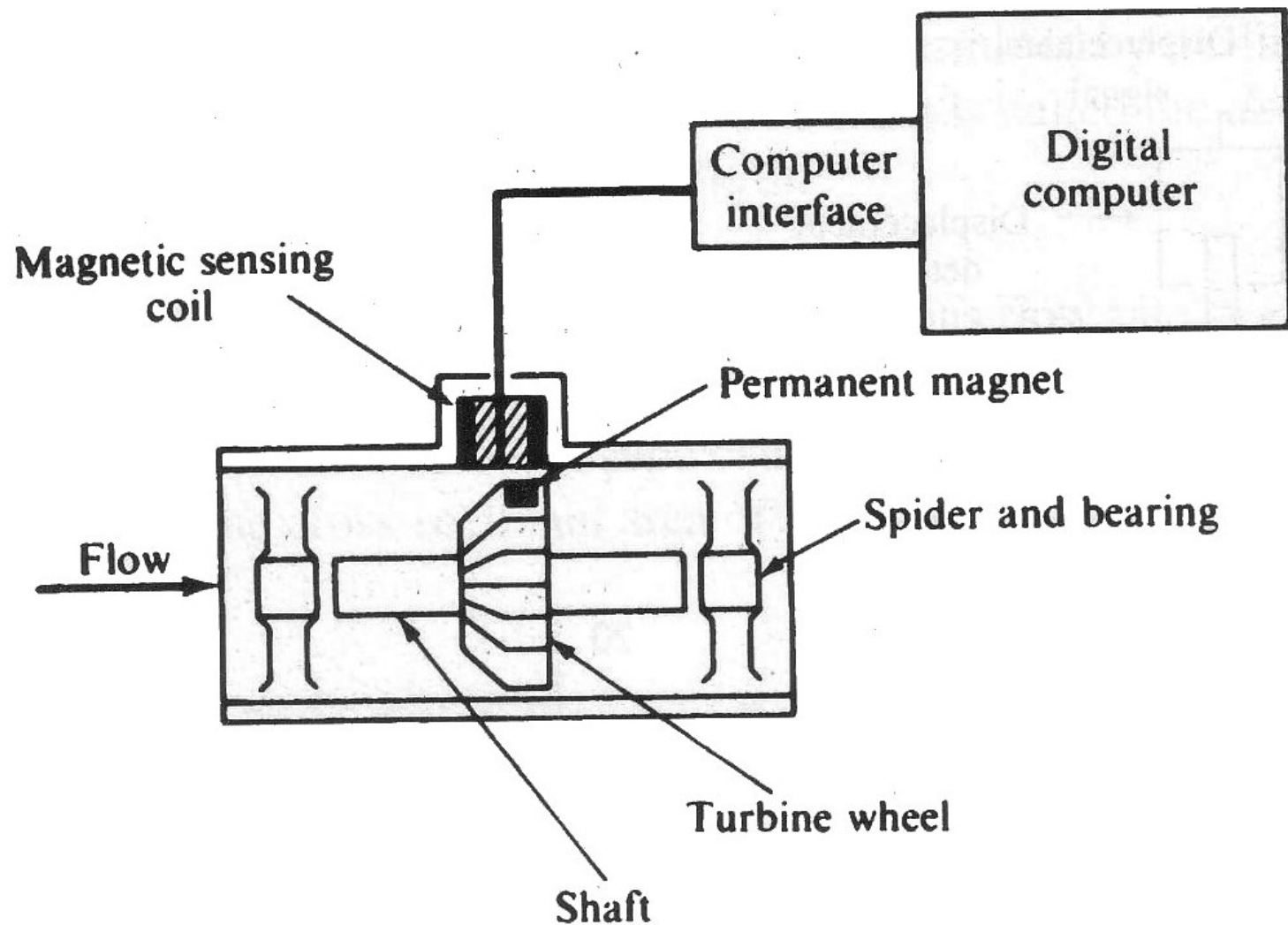
Strukturne blok-šeme senzora protoka sa prigušnicom: a) Δp -protokometar;
 b) Δp -protokometar sa senzorom gustine u radnim uslovima,
 c) Δp -protokometar za gasove (sa posrednim merenjem gustine),
 d) Δp -protokometar za tečnosti (sa posrednim merenjem gustine),

Turbinski protokomer

- Broj obrtaja turbine u jedinici vremena $n[^{\circ}/s]$ proporcionalan je brzini fluida $v[^m/s]$
 $n = kv$, odnosno $v = \frac{n}{k}$, gde je $k[^{\circ}/m]$ koeficijent proporcionalnosti
- Zapreminski protok fluida kroz poprečni presek S je definisan sa $Q_v = vS = \frac{n}{k} S$
- Ako rotor ima N lopatica, onda veza između zapreminskog protoka i broja impulsa $r[imp/s]$ koji u jedinici vremena generišu lopatice rotora $Q_v = vS = \frac{r}{Nk} S$

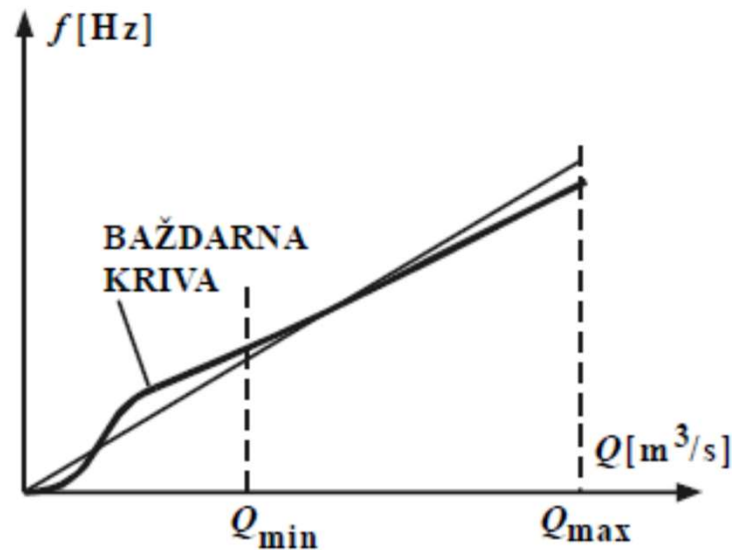


Turbinski protokomer preseki

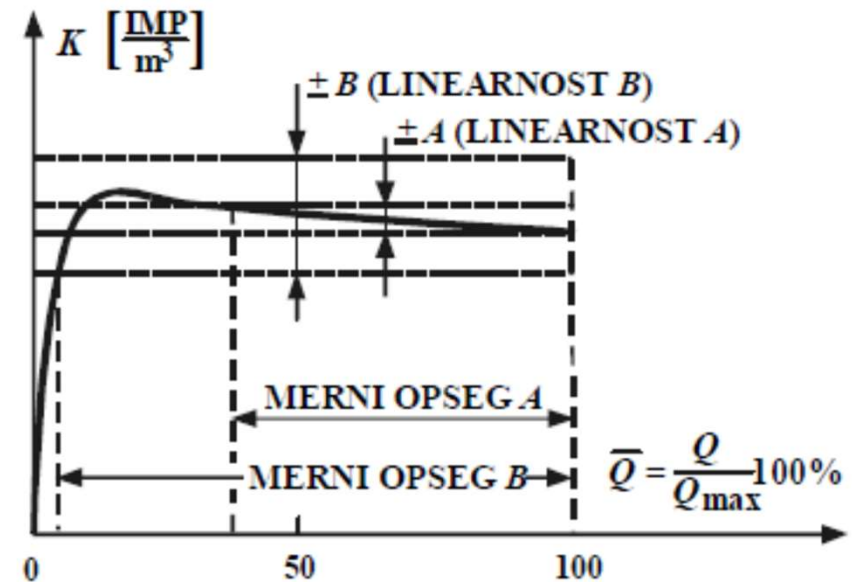


Statička karakteristika turbinskog protokomera

$$K = k \frac{N}{S} [\text{imp}/\text{m}^3] - \text{koeficijent protokomera}$$

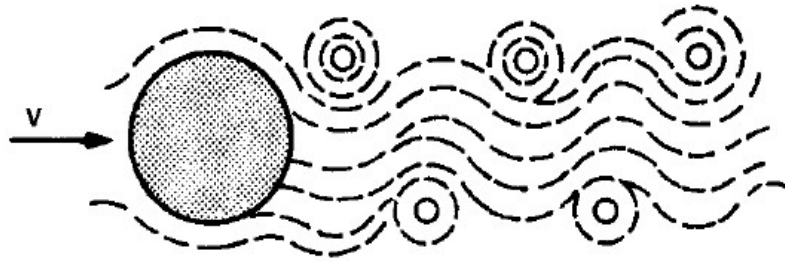


realna karakteristika



standardna baždarna kriva

Vrtložni (vorteks) protokomeri



- Princip rada vrtložnih senzora zasniva se na odvajanju vrtloga iza prepreke postavljene u toku fluida.
- Frekvencija odvajanja vrtloga proporcionalna je brzini toka.
- Nailaskom na prepreku, brzina fluida raste, a pritisak opada. Na polovini poprečnog preseka prepreke dešava se obrnuti proces – brzina opada a pritisak raste. Na taj način na prednjoj strani formira se viši, a na zadnjoj strani niži pritisak.
- Pod delovanjem ove razlike pritiska odvajaju se pogranični sloj fluida sa prepreke u obliku vrtloga.
- Vrtlozi se odvajaju naizmenično na gornjoj i donjoj strani.
- Zavisnost frekvencije vrtloga od brzine toka i prečnika cevovoda naziva se Struhalovim brojem:

$$Sh = \frac{fD}{v}$$

- Brzina toka fluida se onda može odrediti kao

$$v = \frac{fD}{Sh}$$

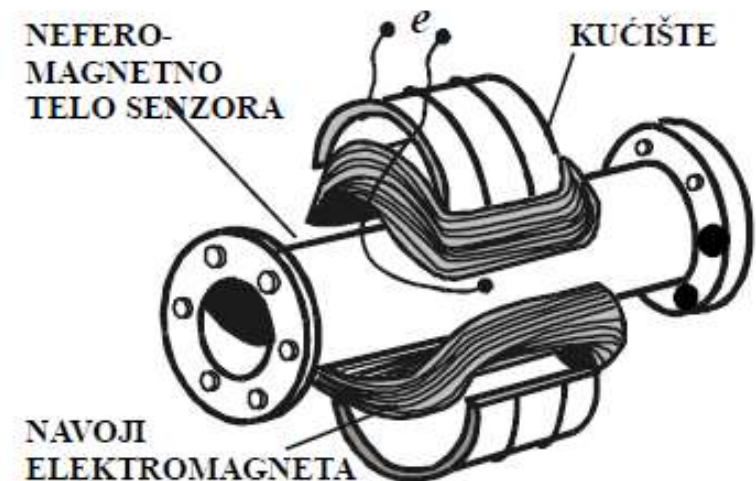
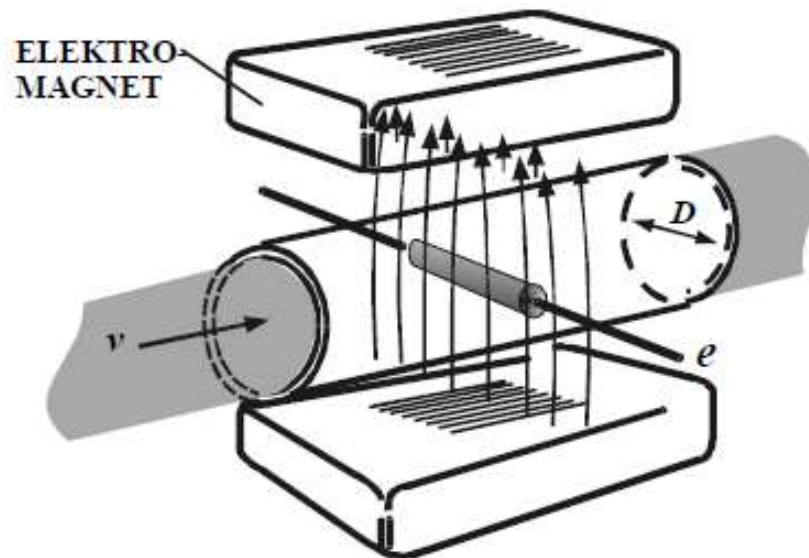
Detekcija vrtloga

- Na mestu odvajanja vrtloga dolazi do fluktuacija brzine i pritiska. Frekvencija oscilovanja brzine i pritiska jednaka je frekvenciji odvajanja vrtloga.
- Kao detektor vrtloga može se upotrebiti ili senzor brzine ili senzor pritiska.
- Praktične poteškoće nastaju zbog malih amplituda fluktuacija.
- Detekcija se najčešće ostvaruje pomoću:
 - mehaničkog senzora koji prati fluktuacije pritiska preko oscilacija pokretnog elementa
 - pjezoelementa, koji prati fluktuacije pritiska.
 - ultrazvučnog predajnika i prijemnika, postavljenih poprečno na tok iza prepreke, tako da nailazak vrtloga modulira ultrazvučni talas;

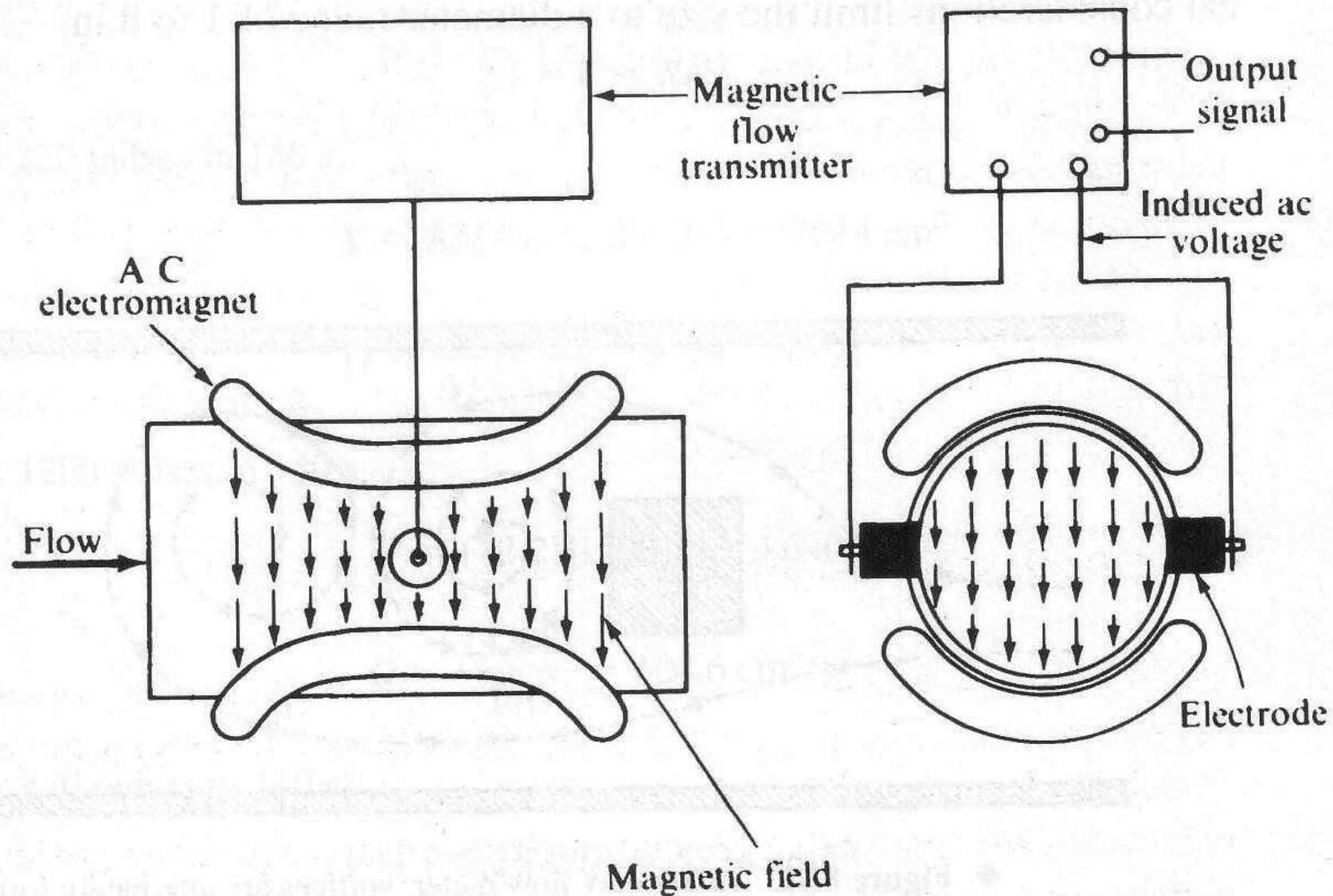
Indukcioni (magnetski) protokomeri

- To su elektromagnetni senzori koji rade na principu Faradejevog zakona indukcije.
- Relativnim kretanjem provodnika i magnetnog polja pod pravim uglom na provodnik indukuje se napon. Na ovom principu rade istosmerni i naizmenični generatori napona.
- Za merenje protoka princip je primenljiv samo za provodne tečnosti. Takva tečnost ekvivalentna je provodniku dužine jednake unutrašnjem prečniku cevi D .
- Provodnik se kreće srednjom brzinom toka v u magnetnom polju B , zbog čega se na krajevima provodnika, tj. na elektrodama indukuje napon

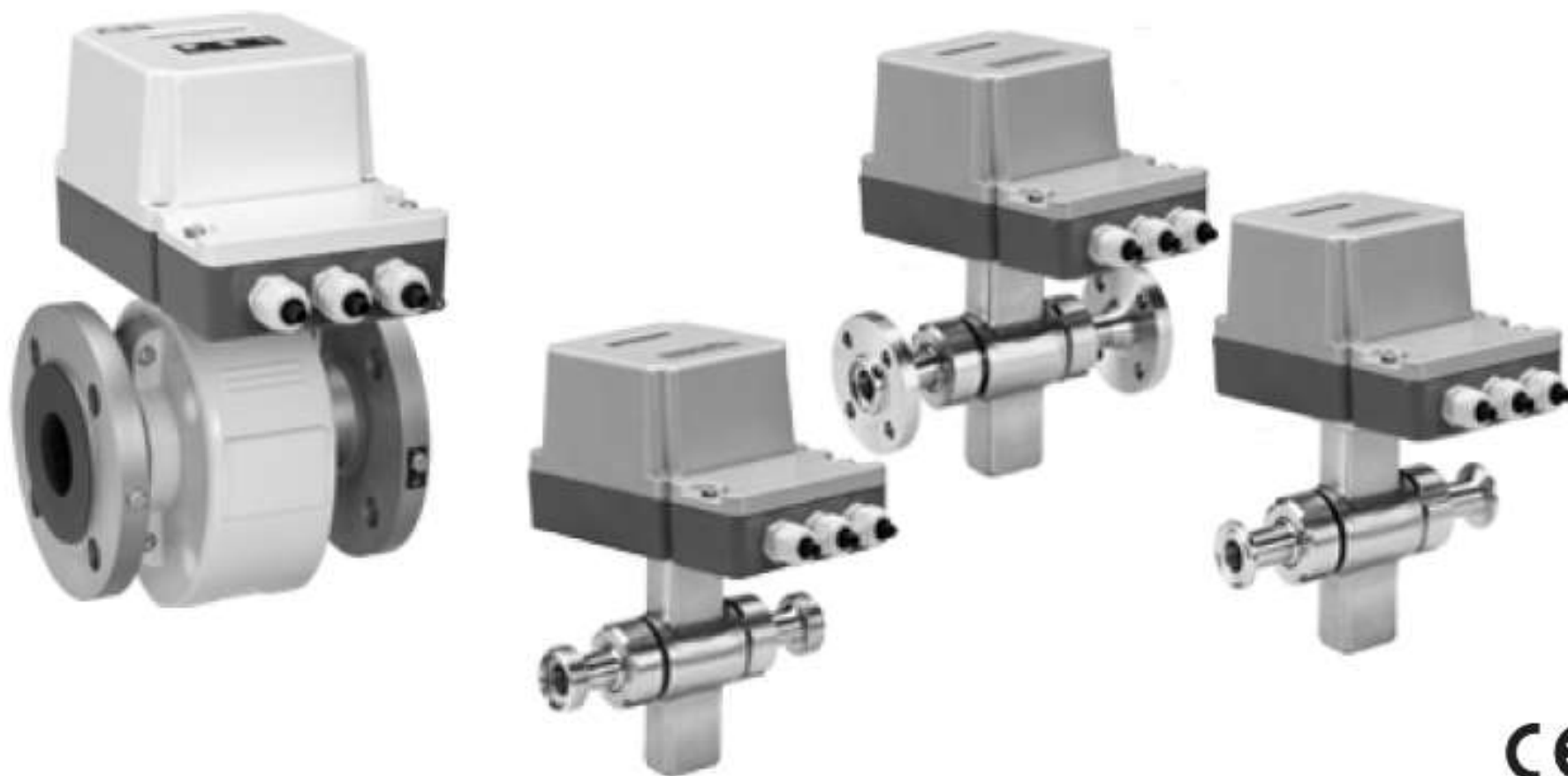
$$e = BDv = 4B \frac{Q_V}{\pi D}$$



Konstrukcija indukcionog protokomera

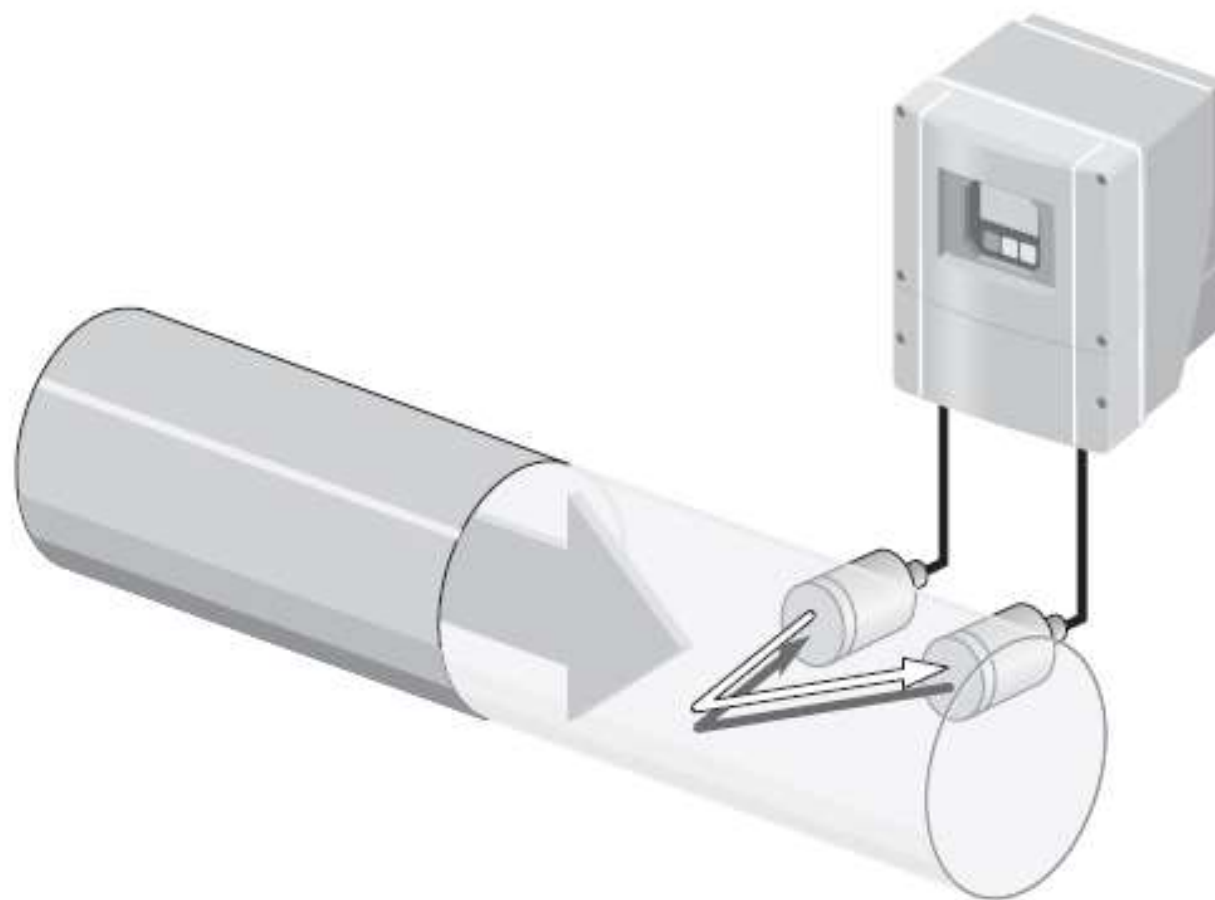


Primeri indukcionih senzora protoka

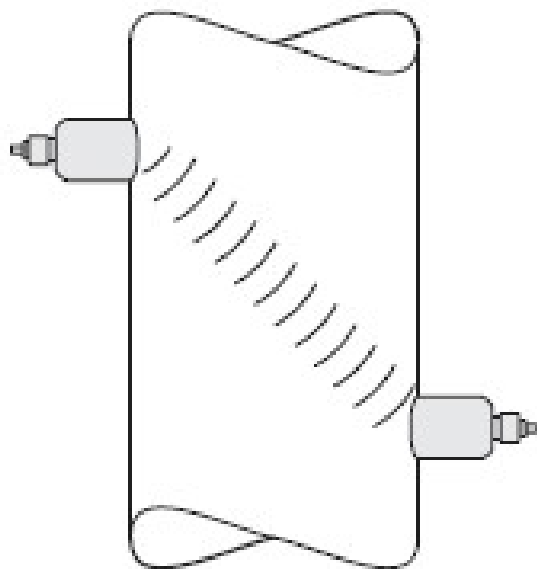


CE

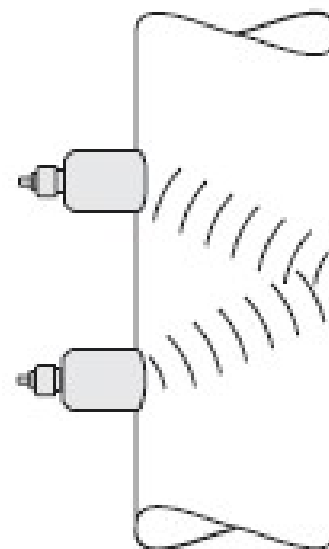
Ultrazvuční senzori protoka



Položaj ultrazvučnih sondi

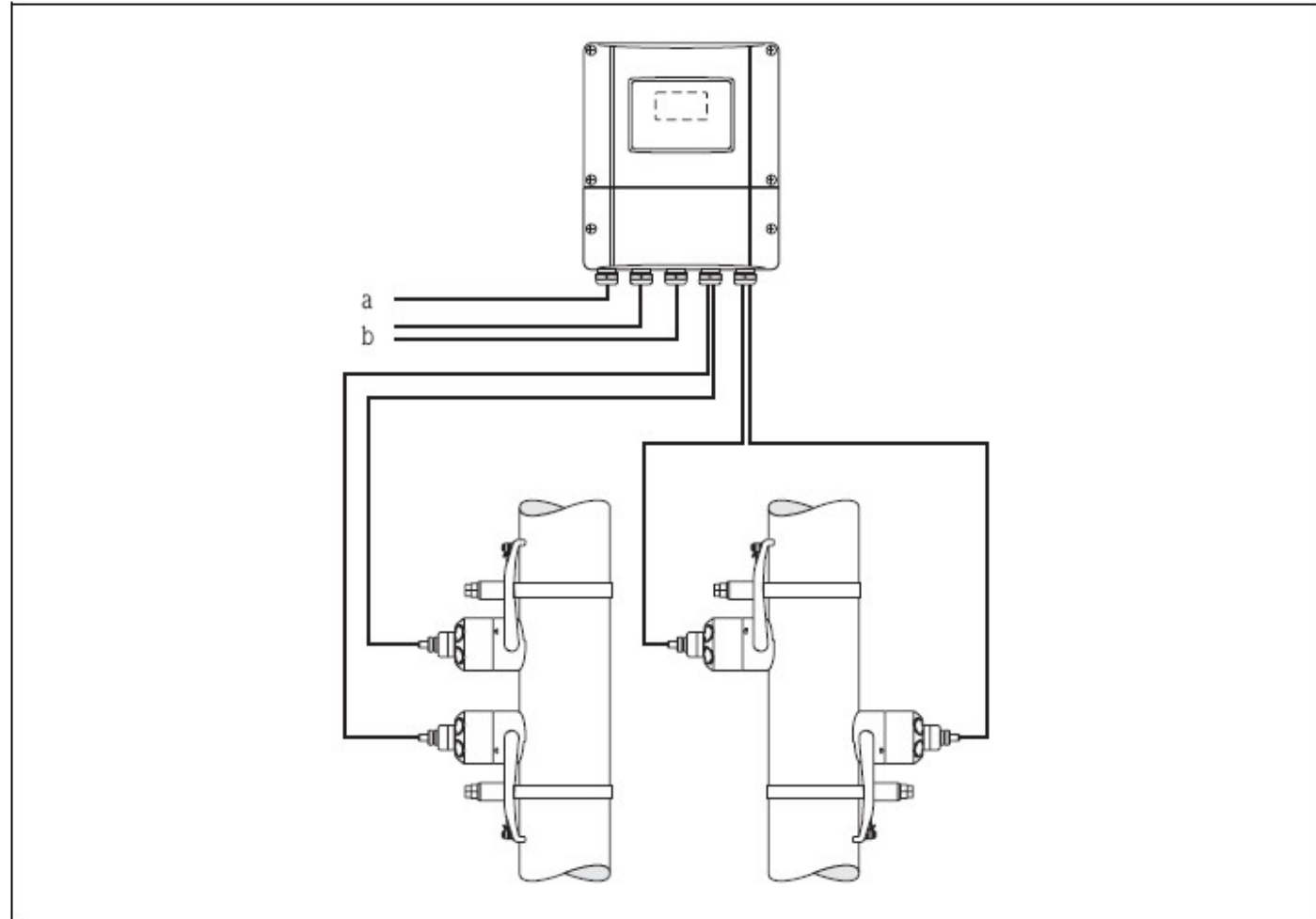


1



2

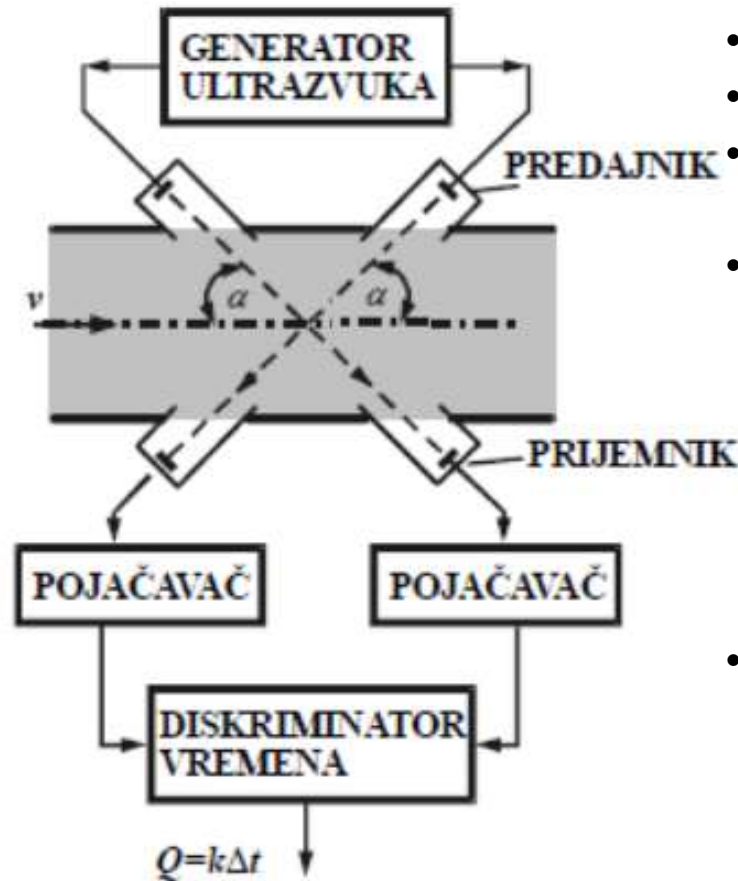
Instrumentacijski komplet



A0001150

- a Cable for power supply
- b Signal cable (Outputs)

Ultrazvučni senzor protoka – merenje vremena prostiranja 1/2



- Brzina prostiranja zvuka kroz fluid koji miruje: c
- Brzina fluida: v
- Brzina prostiranja zvuka kroz fluid koji se kreće: $\vec{c} + \vec{v}$
- Brzina prostiranja zvuka između predajnika i prijemnika:
 - Kada se zvuk prostire u smeru toka:
 $c + v \cos(\alpha)$
 - Kada se zvuk prostire suprotno od smera toka:
 $c - v \cos(\alpha)$
- Vreme potrebno da zvuk dodje od predajnika do prijemnika (D je prečnik cevovoda):
 - Kada se zvuk prostire u smeru toka:
$$t_1 = \frac{D / \sin(\alpha)}{c + v \cos(\alpha)}$$
 - Kada se zvuk prostire suprotno od smera toka:
$$t_2 = \frac{D / \sin(\alpha)}{c - v \cos(\alpha)}$$

Senzor sa dva odvojena predajnika i prijemnika

Ultrazvučni senzor protoka – merenje vremena prostiranja 2/2

- Razlika vremena prostiranja u smeru toka i suprotno od smera toka

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{\frac{D}{\sin(\alpha)}}{c - v \cos(\alpha)} - \frac{\frac{D}{\sin(\alpha)}}{c + v \cos(\alpha)} = \frac{2Dv \operatorname{ctg}(\alpha)}{c^2 - (v \cos(\alpha))^2}$$

- Pošto je $c \gg v$ izraz može da se koristi u obliku:

$$\Delta t = \frac{2Dv}{c^2 \operatorname{tg}(\alpha)}$$

- Odnosno

$$v = \frac{c^2 \operatorname{tg}(\alpha)}{2D} \Delta t = k_1 \Delta t$$

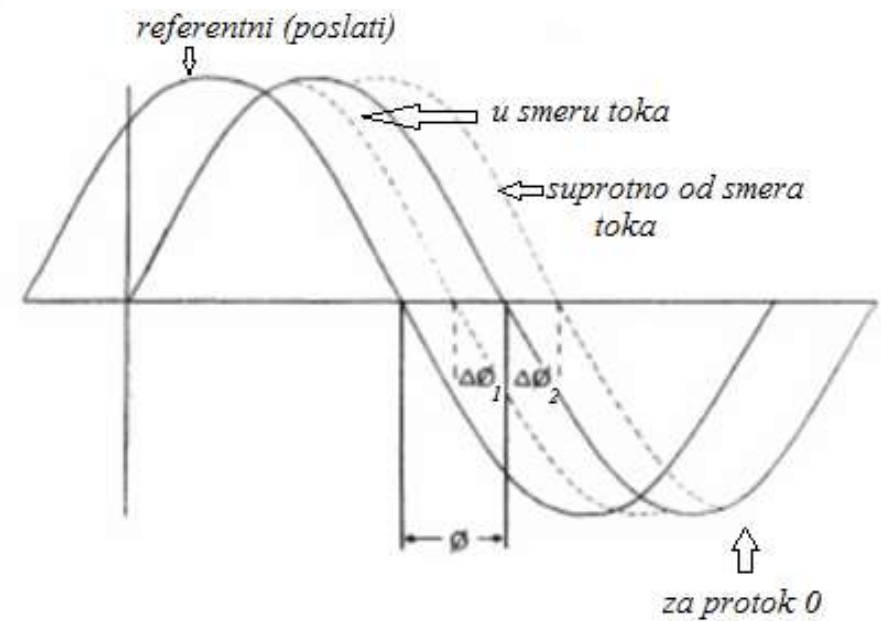
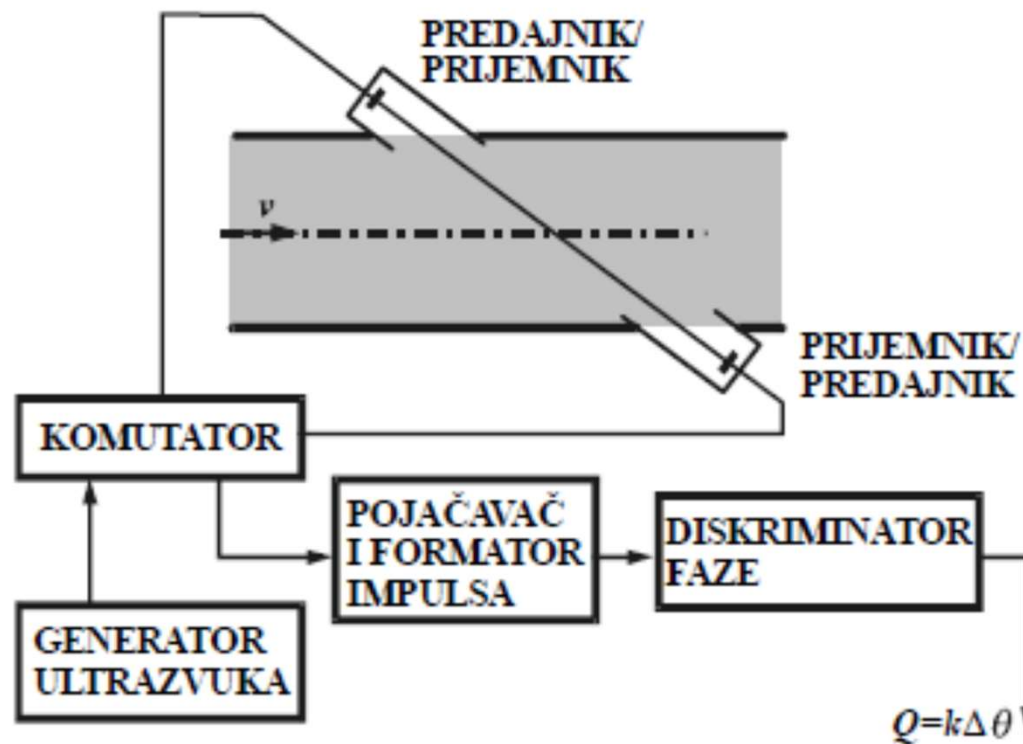
- Tako da je zavisnost protoka od određene razlike vremena Δt linearna:

$$Q = vA = k_1 A \Delta t = k \Delta t$$

- Vrednost Δt je veoma mala i senzori protoka koji su bazirani na ovom principu moraju da imaju sposobnost da mere tako male vremenske intervale

Ultrazvučni senzor protoka – merenje faze 1/2

Određuje se fazna razlika između poslatog i primljenog prostoperiodičnog ultrazvučnog signala. To se radi i za slučaj kada se zvuk prostire u smeru toka i kada se zvuk prostire suprotno od smera toka



*Senzor sa dva para predajnika i
prijemnika koji menjaju ulogu*

Ultrazvučni senzor protoka – merenje faze 2/2

- Kada se pošalje prostoperiodični ultrazvučni signal frekvencije f
$$A \sin(2\pi f t)$$
- Na prijemu će zbog kašnjenja signala za vreme τ biti primljen ultrazvučni signal
$$A_p \sin(2\pi f(t - \tau)) = A_p \sin(2\pi f t - 2\pi f \tau) = A_p \sin(2\pi f t - \emptyset)$$
- Tako da je fazna razlika između poslatog i primljenog ultrazvučnog signala
$$\emptyset = 2\pi f \tau$$
- Fazna razlika između poslatog i primljenog prostoperiodičnog signala frekvencije f kada se zvuk prostire u smeru toka:
$$\emptyset_1 = 2\pi f t_1$$
- Fazna razlika između poslatog i primljenog prostoperiodičnog signala frekvencije f kada se zvuk prostire suprotno do smera toka:
$$\emptyset_2 = 2\pi f t_2$$
- Razlika vremena prostiranja u smeru toka i suprotno od smera toka može da se dobije iz faznih razlika, pošto je:

$$\Delta \emptyset = \emptyset_2 - \emptyset_1 = 2\pi f(t_2 - t_1) = 2\pi f \Delta t$$

- Odnosno

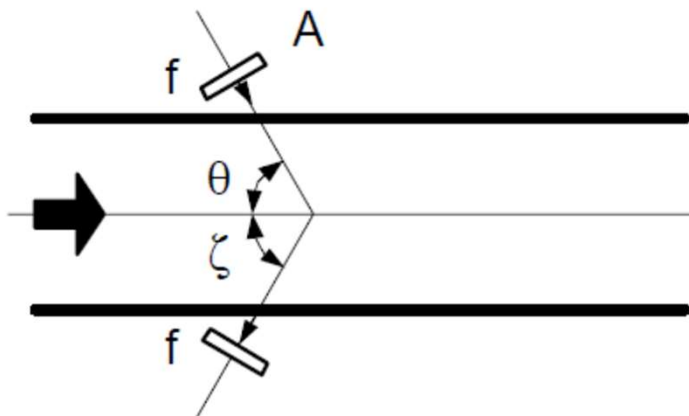
$$\Delta t = \frac{\Delta \emptyset}{2\pi f}, \quad Q = k \Delta t = \frac{k}{2\pi f} \Delta \emptyset$$

Ultrazvučni senzor protoka – Doplerov efekat

- Doplerov efekat se dešava kod zvučnih, ali i kod elektromagnetnih talasa
- Kada se izvor ili prijemnik talasa kreću u medijumu, frekvencija na prijemniku će se razlikovati od frekvencije na predajniku.
- Frekvencija se povećava kada je kretanje prema izvoru, a smanjuje kada je kretanja od izvora.
- Tokom merenja izvor (kristal koji emituje ultrazvuk) i prijemnik (kristal koji prima ultrazvuk) su nepomični, a medijum, fluid, se kreće
- Ovi senzori mogu da se koriste samo za tečnosti koje sadrže dovoljno čvrstih čestica ili gasnih džepova od kojih se odbijaju ultrazvučni talasi.
- Ultrazvuk koji se odbija od čvrstih čestica ili gasnih džepova dolazi do prijemnika
- Doplerov efekat za izvor i prijemnik postavljeni kao na slici može da se opiše izrazom

$$f_p = \frac{c - v_p}{c} \frac{c}{c + v_i} f_i = \frac{c - v_p}{c + v_i} f_i$$

- Ovde su: f_i - frekvencija signala na izvoru, f_p - frekvencija signala na prijemniku, v_i - relativna brzina izvora u odnosu na medijum, v_p - relativna brzina prijemnika u odnosu na medijum, c - brzina prostiranja talasa u medijumu



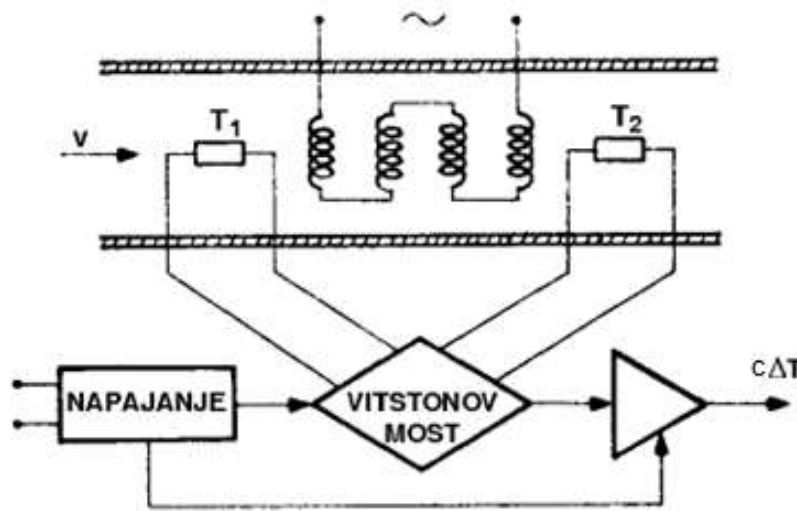
$$v_i = v \cos(\theta), \quad v_p = v \cos(\zeta)$$

$$f_p = \frac{c - v \cos(\zeta)}{c + v \cos(\theta)} f_i$$

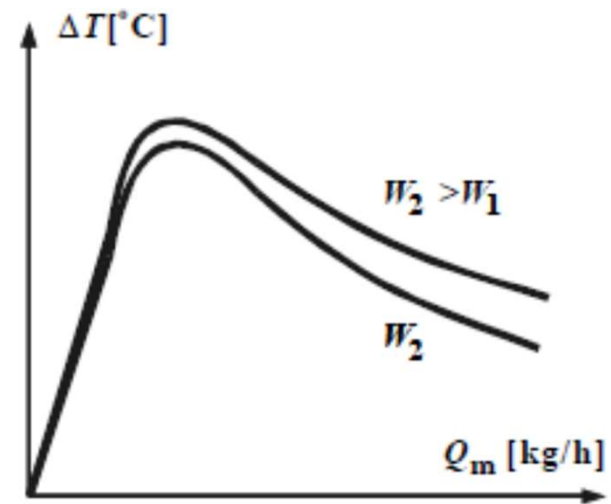
$$\Delta f = f_i - f_p = \left(1 - \frac{c - v \cos(\zeta)}{c + v \cos(\theta)} \right) f_i$$

$$\Delta f = \frac{v \cos(\theta) + v \cos(\zeta)}{c + v \cos(\theta)} f_i \approx \frac{f_i}{c} (\cos(\theta) + \cos(\zeta)) v$$

Kalorimetrski protokomeri 1/2



Princip rada



Statička karakteristika

- Koriste se za merenje masenog protoka
- Sastoji se od grejača i dva senzora temperature
- Prolaskom pored grejača fluid se zagreva, tako da se dobije temperaturna razlika $\Delta T = T_2 - T_1$
- Zavisnost temperaturne razlike od masenog protoka, za konstantnu snagu grejača je prikazana na statičkoj karakteristici
- Merenjem ΔT dobija se informacija o masenom protoku
- Linearnost statičke karakteristike postoji samo za male brzine

Kalorimetarski protokomeri 2/2

- Jednačina toplotne ravnoteže je

$$W = kQ_m c_p \Delta T$$

gde je

k - korekcionni koeficijent, koji uzima u obzir gubitke toplote u okolini i greške merenja ΔT nastale zbog neravnomerne raspodele temperatura po poprečnom preseku,

c_p - specifični toplotni kapacitet fluida (gasa pri konstantnom pritisku) na temperaturi $(T_1 + T_2)/2$

- Ukoliko se održava konstantna razlika temperatura $\Delta T = \text{const}$ prilagođavanjem snage grejača W , tada je statička karakteristika snaga grejača – protok linearna
- Zbog toga postoji izvedba kalorimetarskih protokomera kod kojih se vrši promena snage grejača kako bi se održala konstantna razlika temperatura
- Kod kalorimetarskih protokomera kod kojih se održava konstantna razlika temperatura, obično se za merenje T_2 koristi otpornički senzor koji istovremeno služi i kao grejač.

