



# MERENJE PROTOKA

# Definicija protoka

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

Zapreminski protok-  $\text{m}^3/\text{s}$       $Q_V = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{dV}{dt}$

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

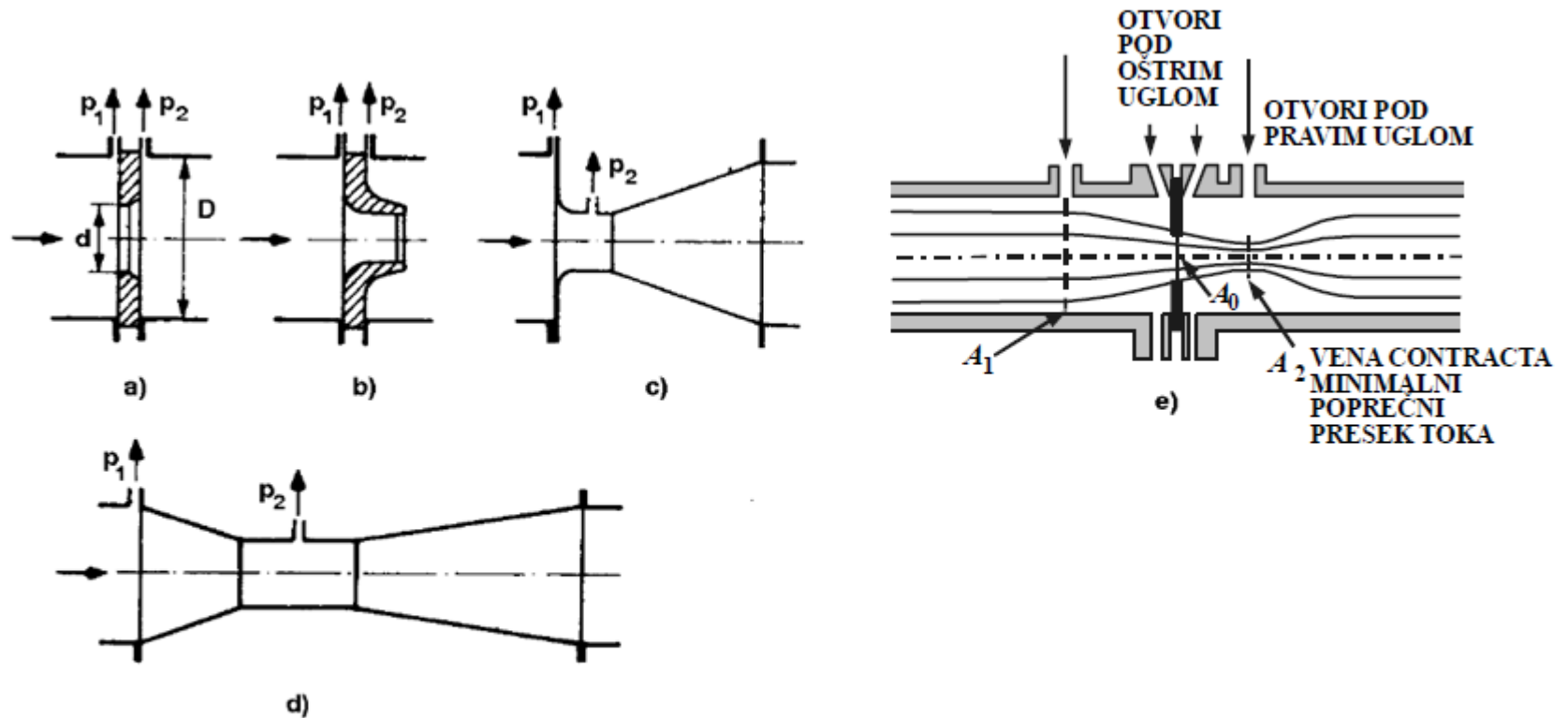
Odnos masenog i  
zapreminskog protoka      $Q_m = \rho Q_V = \rho \frac{dV}{dt}$

# Protokomeri sa prigušnicom

- U tok fluida postavlja se prepreka u obliku suženja cevi
- Iza prepreke dolazi do promene pritiska
- Protok je proporcionalan kvadratnom korenu razlike pritiska ispred i iza prepreke

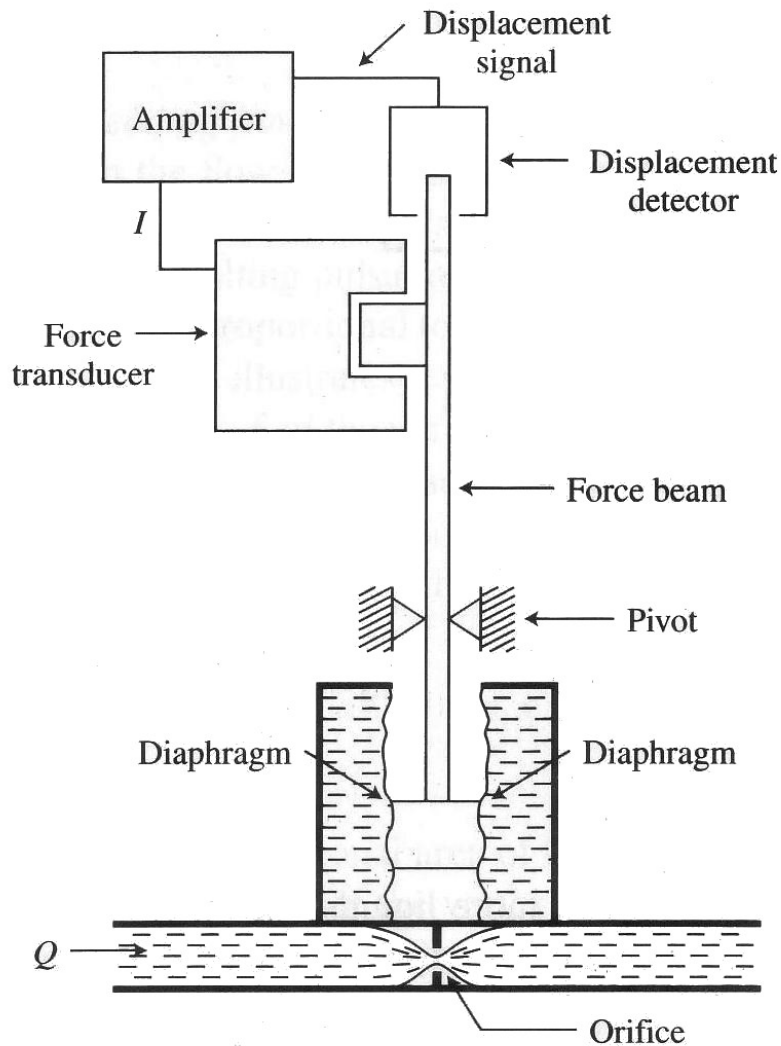
$$Q = k \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}$$

# Tipični oblici prigušnice

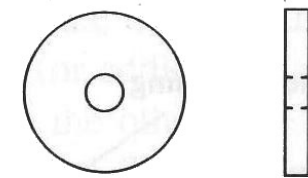


*Senzori protoka sa prigušnicom: a) merna blenda, b) mlaznica, c) Venturijeva mlaznica, d) Venturijeva cev, e) deo cevovoda sa mernom blendom*

# Princip $\Delta p$ protokomera

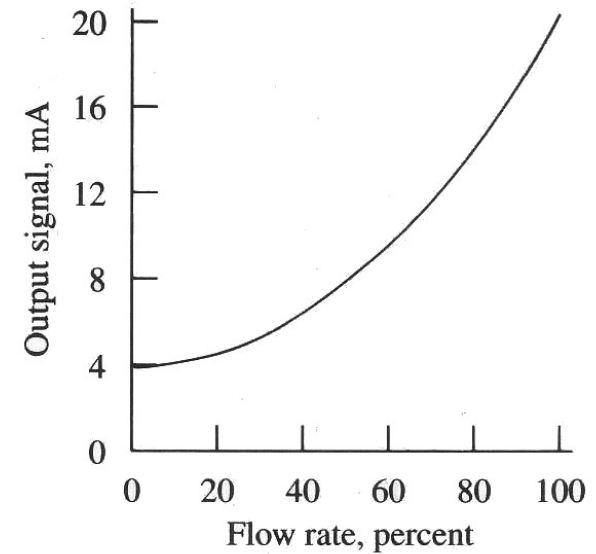


b) A typical differential pressure flow transducer



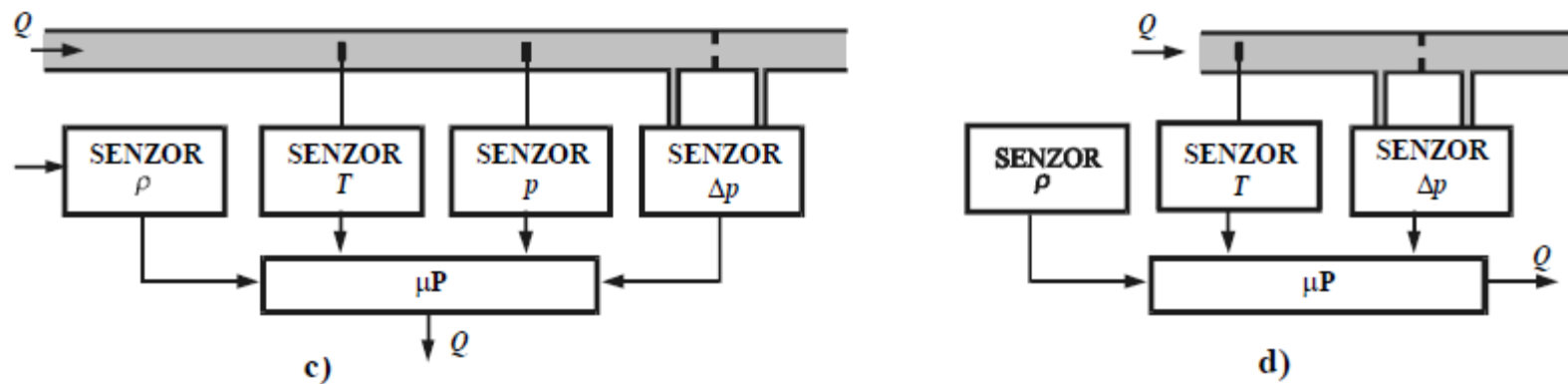
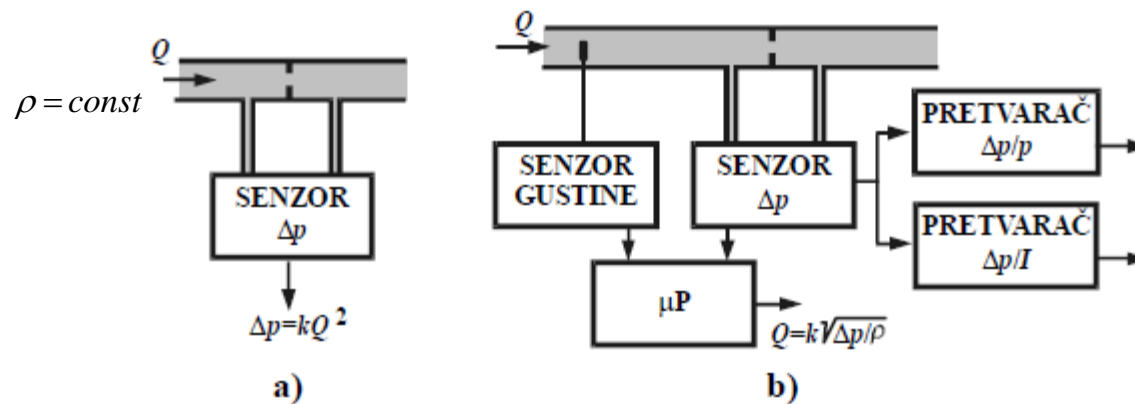
a) A typical orifice plate

Merna blenda



c) A typical calibration curve

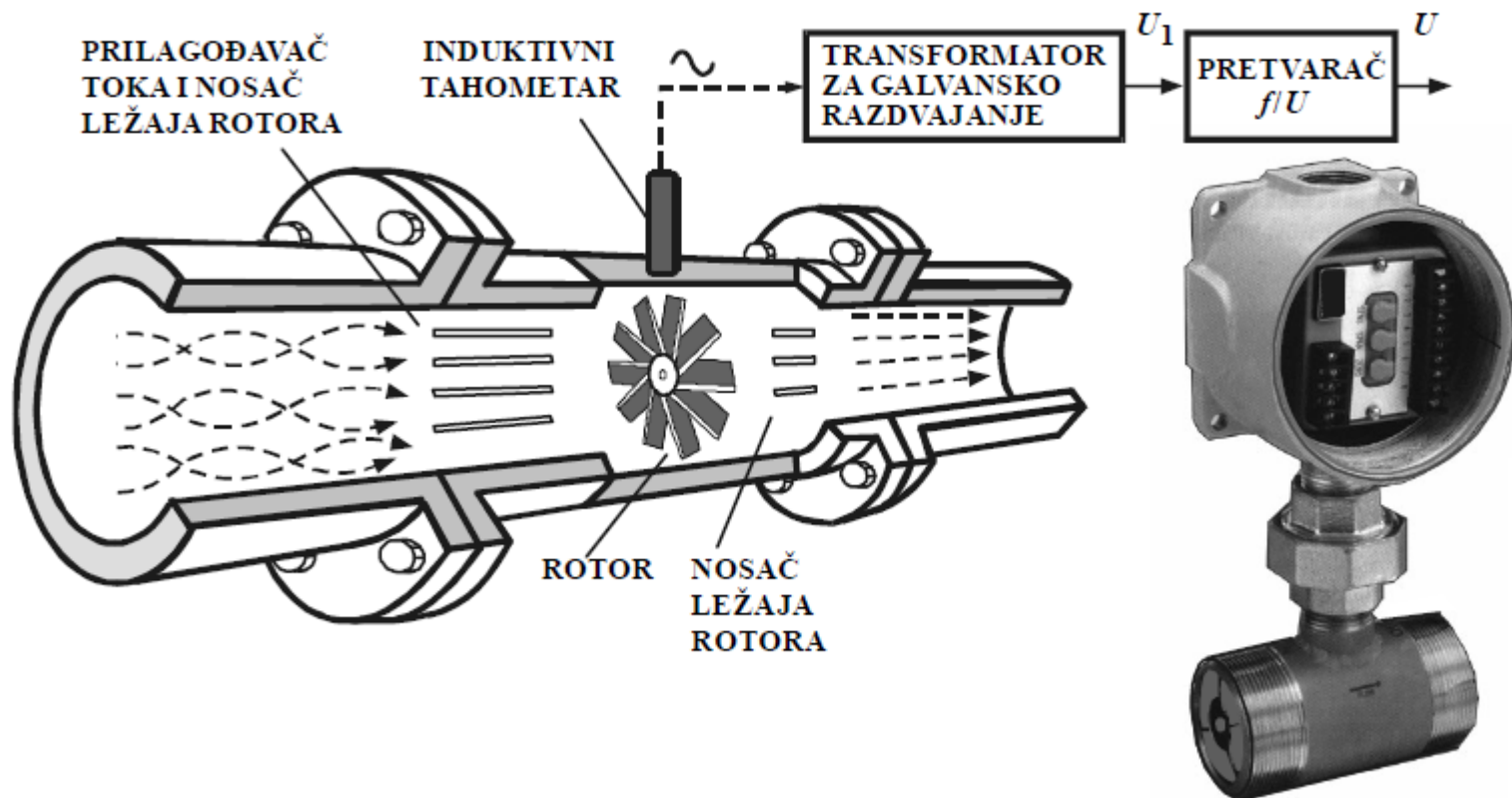
# Struktura $\Delta p$ protokomera



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

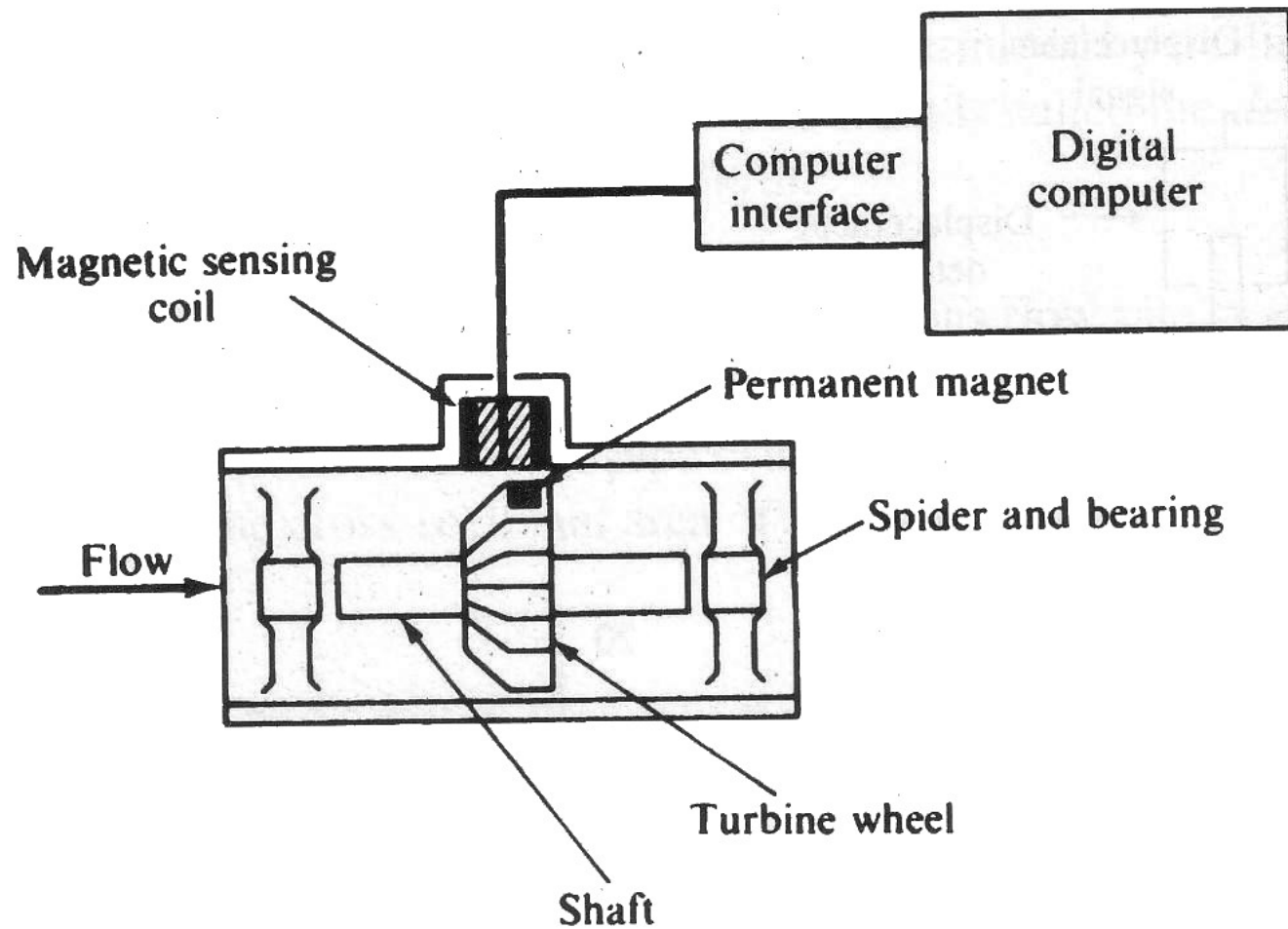
# Turbinski protokomer

- Broj obrtaja turbine u jedinici vremena proporcionalan je brzini fluida  $n = kv$ , odnosno  $v = \frac{n}{k}$
- 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 koji u jedinici vremena generišu lopatice rotora  $Q_v = vS = \frac{nN}{k}S$



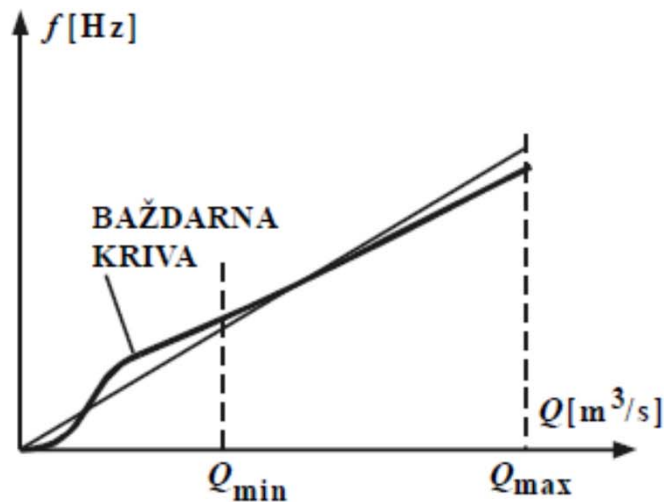


# Turbinski protokomer preseki

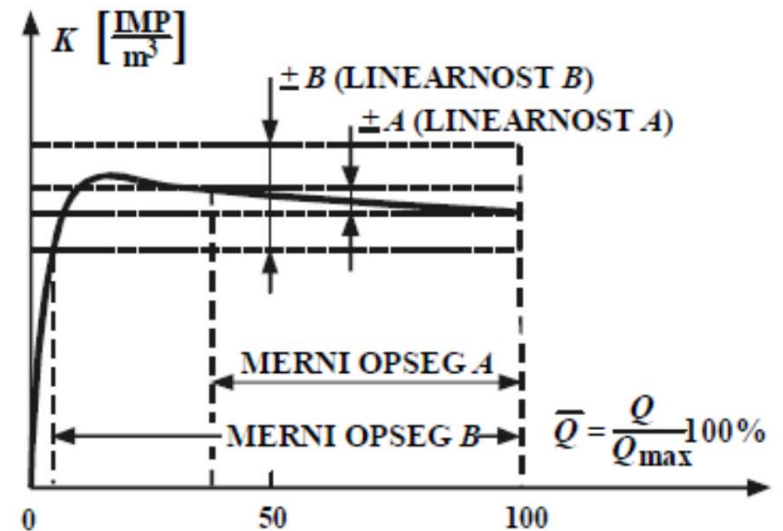




# Statička karakteristika turbinskog protokomera

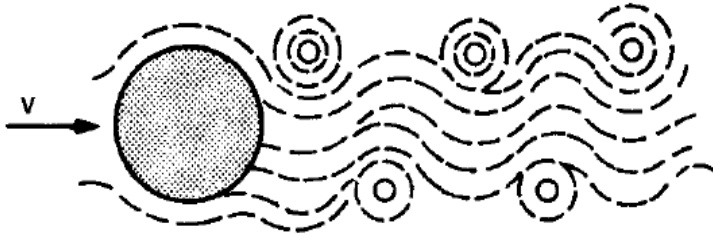


*realna karakteristika*



*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

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



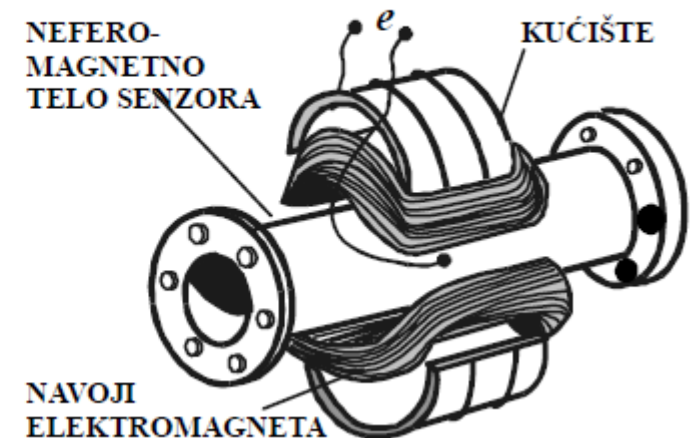
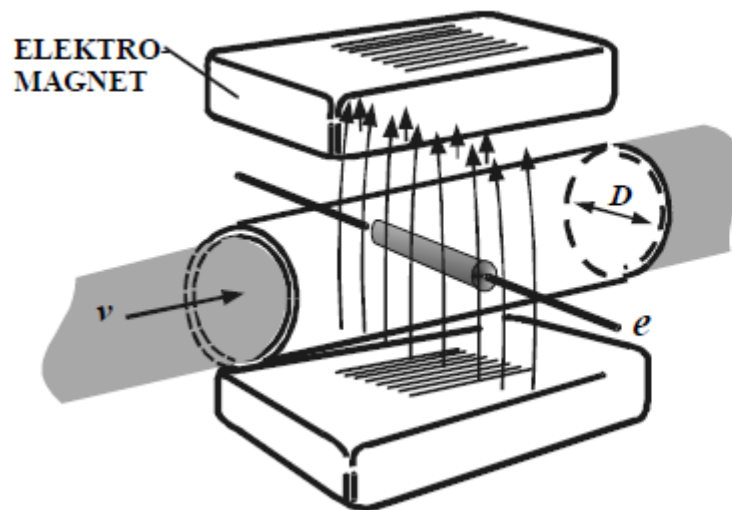
# Detekcija vrtloga

- 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:
  - ultrazvučnog predajnika i prijemnika, postavljenih poprečno na tok iza prepreke, tako da nailazak vrtloga modulira ultrazvučni talas;
  - termistora postavljenog iza prepreke, tako da se pri nailasku vrtloga termistor hladi, a u njegovom odsustvu zagrejava
  - pijezelementa, koji prati fluktuacije pritiska.

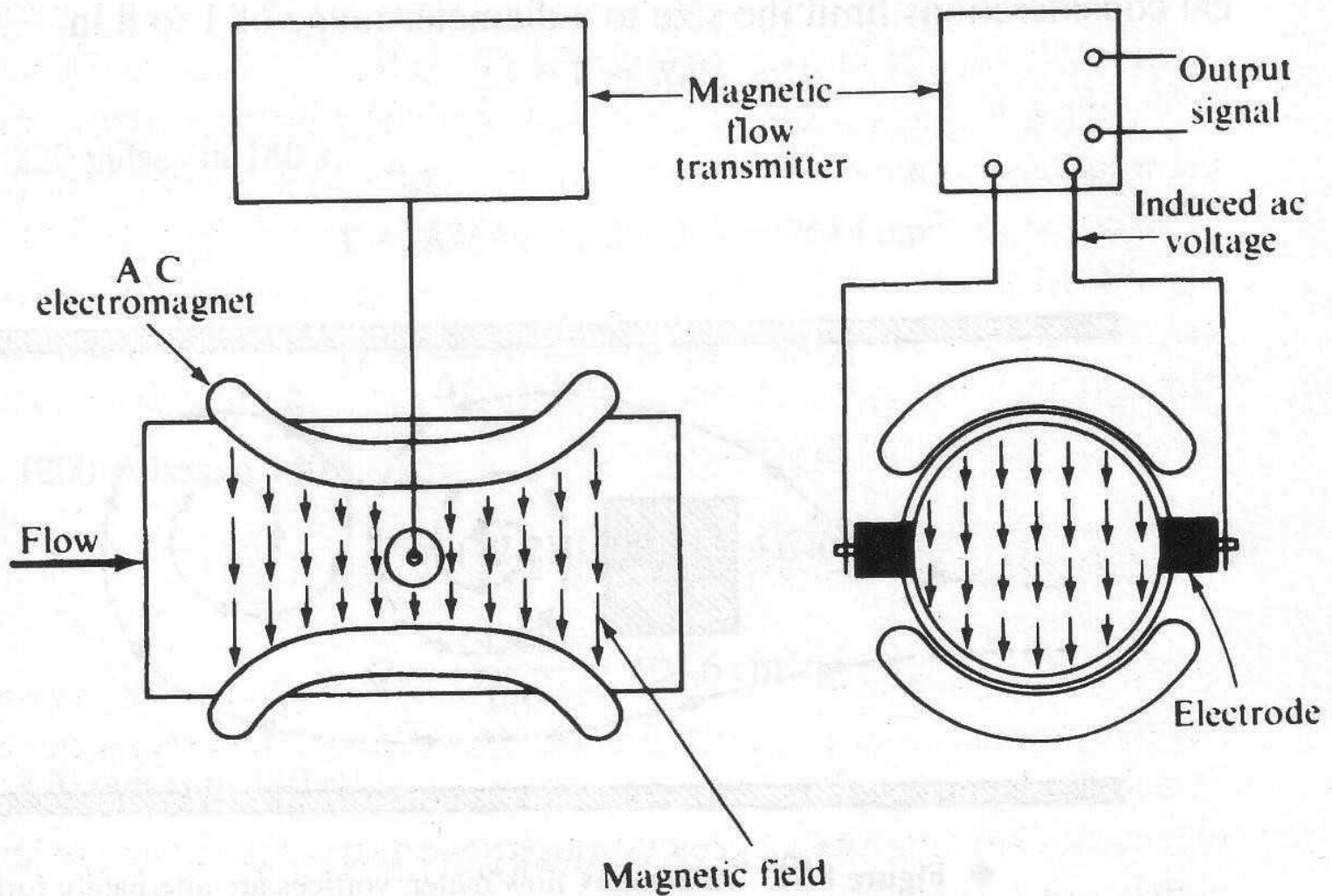
# Indukcioni (magnetski) protokomeri

- 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

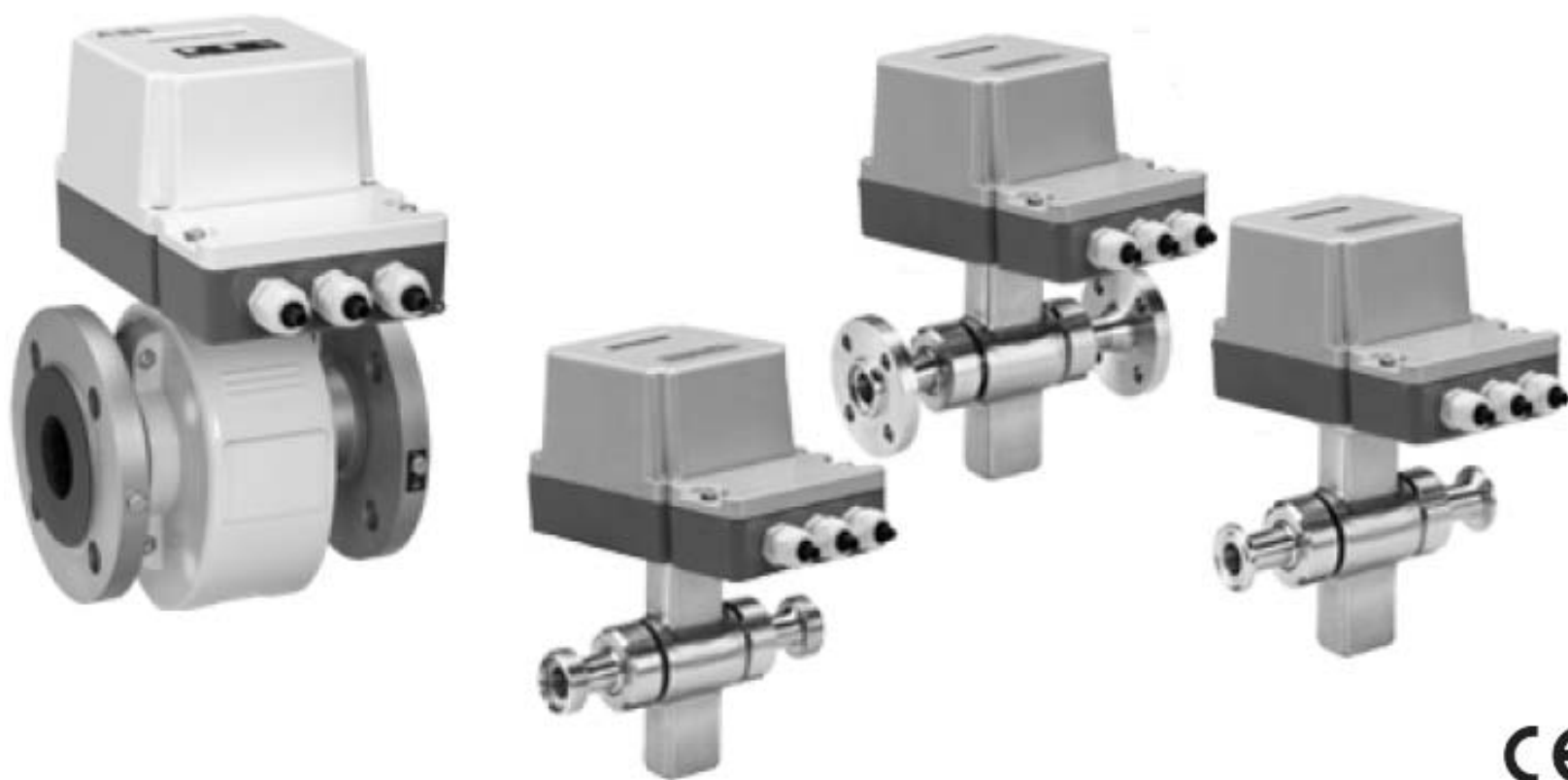
$$e = BDv = 4B \frac{Q_V}{\pi D}$$



# Konstrukcija indukcionog protokomera



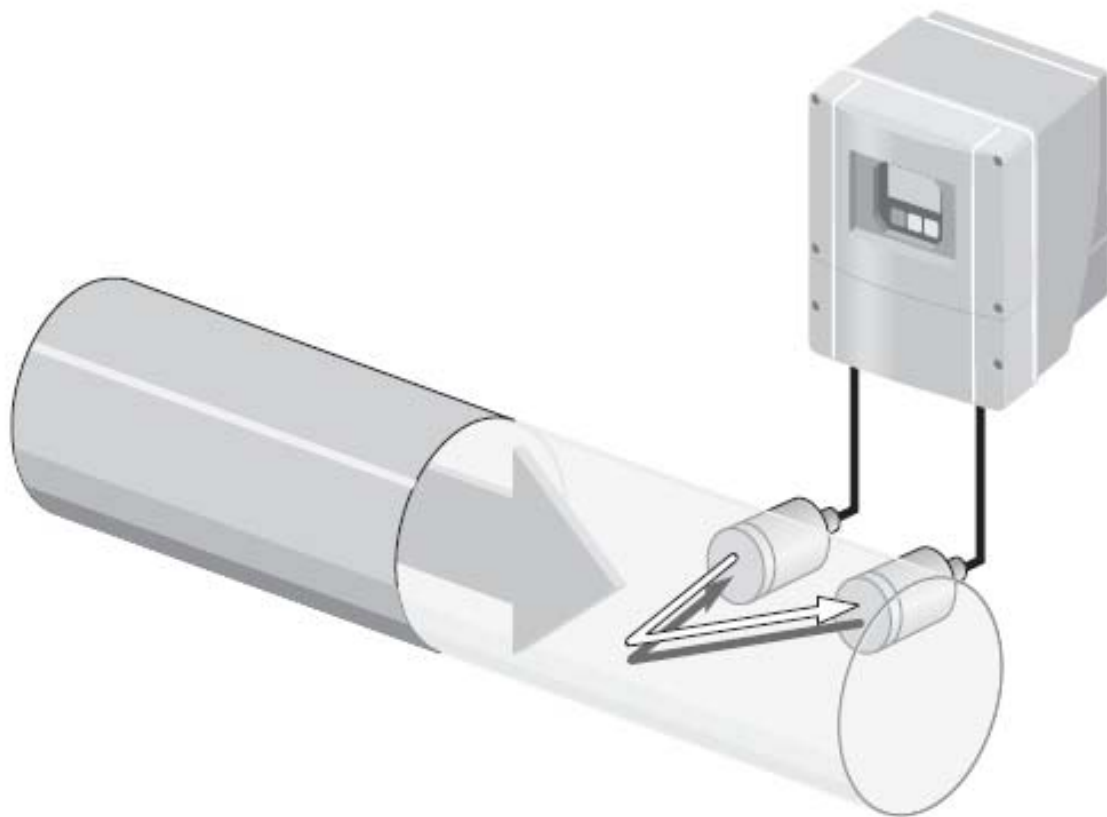
# Primeri indukcionih senzora protoka



CE

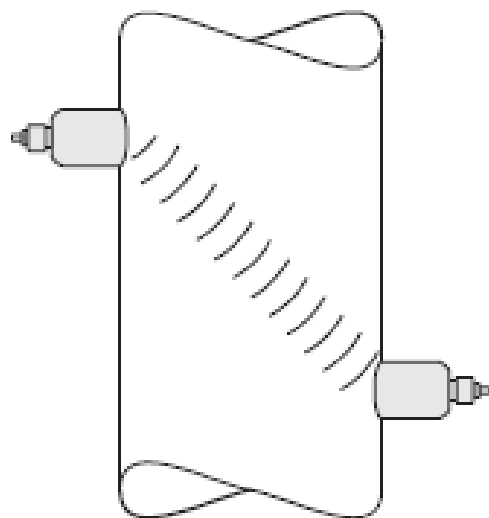


# Ultrazvučni senzori protoka

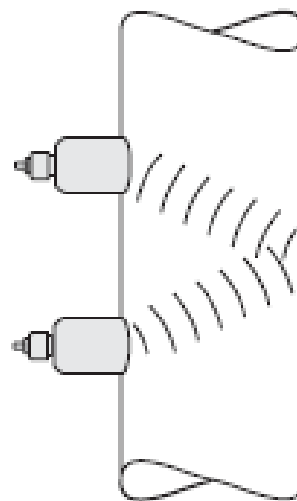




# Položaj ultrazvučnih sondi

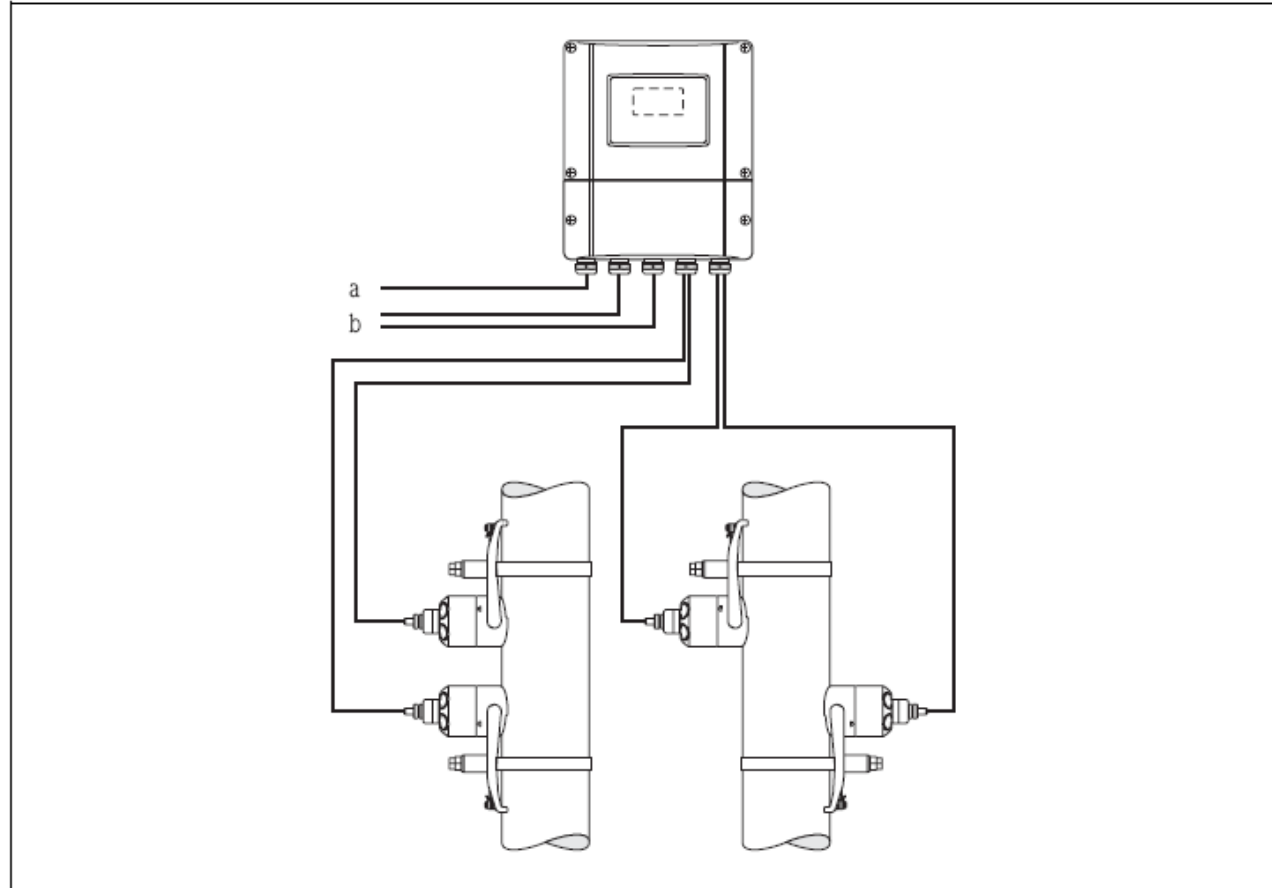


1



2

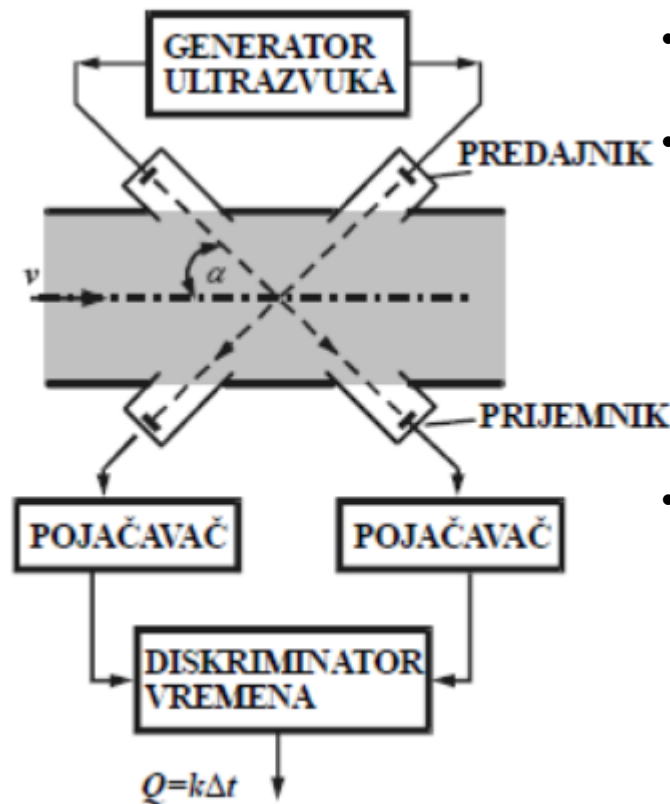
# Instrumentacijski komplet



A0001150

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

# Ultrazvučni senzor protoka – merenje vremena prostiranja 1/2



*Senzor sa dva odvojena predajnika i prijemnika*

- 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:  
$$t_2 = \frac{D / \sin(\alpha)}{c - v \cos(\alpha)}$$

# 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

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

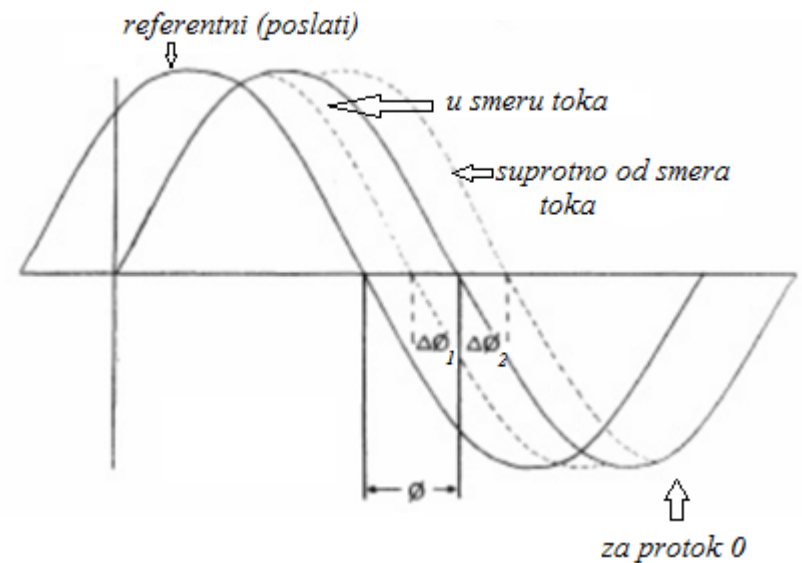
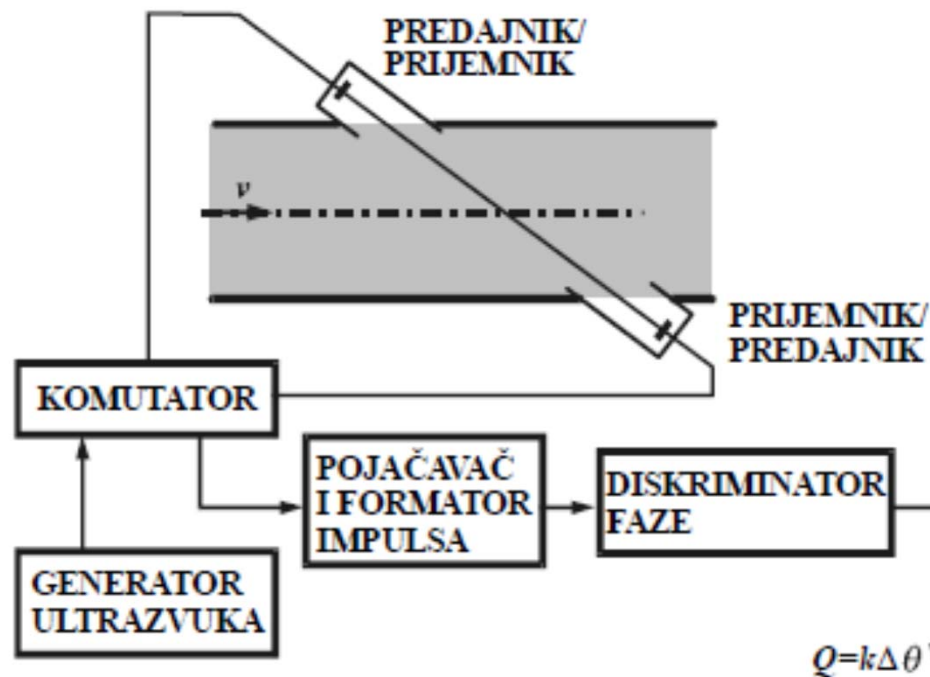
- Tako da je zavisnost protoka od određene razlike vremena  $\Delta t$  linearna:

$$Q = k \Delta t$$

- Vrednost  $\Delta t$  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

- Fazna razlika između poslatog i primljenog prostoperiodičnog signala frekvencije  $f$  kada se zvuk prostire u smeru toka:

$$\phi_1 = 2\pi f t_1$$

- Fazna razlika između poslatog i primljenog prostoperiodičnog signala frekvencije  $f$  kada se zvuk prostire suprotno do smera toka:

$$\phi_2 = 2\pi f t_2$$

- Razlika vremena prostiranja u smeru toka i suprotno od smera toka može da se dobije iz faznih razlika, pošto je:

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = 2\pi f(t_2 - t_1) = 2\pi f \Delta t$$

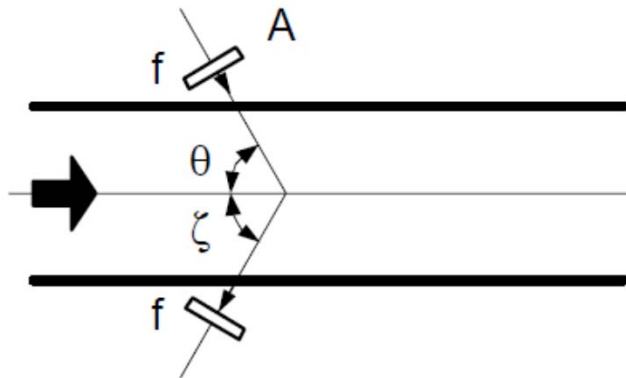
# Ultrazvučni senzor protoka – Doplerom efekt

- Doplerov efekt 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.
- Doplerov efekt za izvor i prijemnik postavljeni kao na slici može da se opiše izrazom

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

- 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

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



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

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

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



# Kalorimetarski protokomeri

