

SENZORI I METODE MERENJA NEELEKTRIČNIH VELIČINA

- SENZORI PROTOKA
- SENZORI TEMPERATURE

SENZORI PROTOKA

OSNOVI TEHNIKE MERENJA PROTOKA

- **Protok** je količina sipkastog materijala, tečnosti ili gasa koja protekne kroz posmatrani poprečni presek za jedinicu vremena. **Protokometar**

Razlikuju se:

- maseni protok $Q_m = \frac{dm}{dt} [kg/s]$ (sipkaste materijale)

- volumenski protok $Q_v = \frac{dV}{dt} [m^3/s]$ (tečnosti i gasove)
(zavisi od **gustine, pritiska i temperature**)

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

1. SENZORI VOLUMETRIJSKOG PROTOKA

Princip merenja zasniva se na tretiranju zapremine (volumena) supstance koja protiče kroz poprečni presek na osnovu merenja nekog parametra, koji je rezultat međusobnog delovanja toka fluida i tela postavljenog u tok.

- **Telo može biti:**

- a) nepokretno

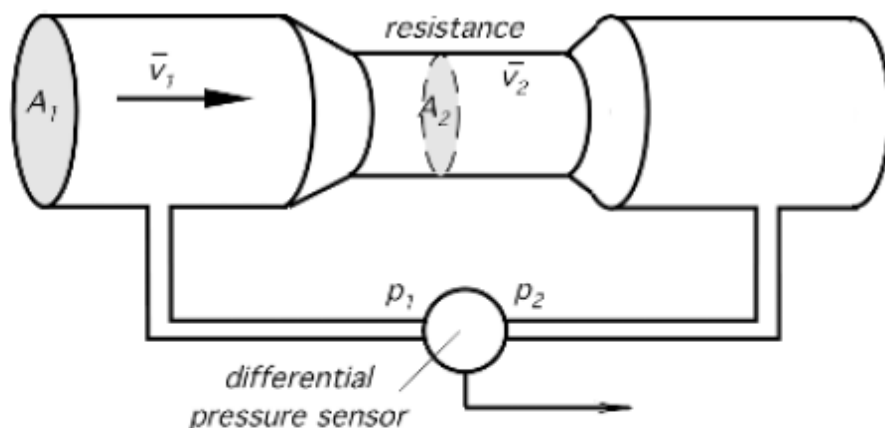
- prigušnica (66% svih senzora protoka)

- b) pokretno

- rotometarski senzor
 - turbinski senzor
 - rotacioni senzor
 - elektromagnetni senzor
 - ultrazvučni senzor
 - senzor sa Doplerovim efektom

Senzori sa **PRIGUŠNICOM**

Prigušnica menja odnos potencijalne i kinetičke energije, što uz poznatu geometriju merenjem **diferencijalnog pritiska (razlike pritiska)** omogućava određivanje protoka. Osnovna jednačina u mehanici fluida je **Bernulijeva jednačina** (za neviskozne i nestišljive supstance).



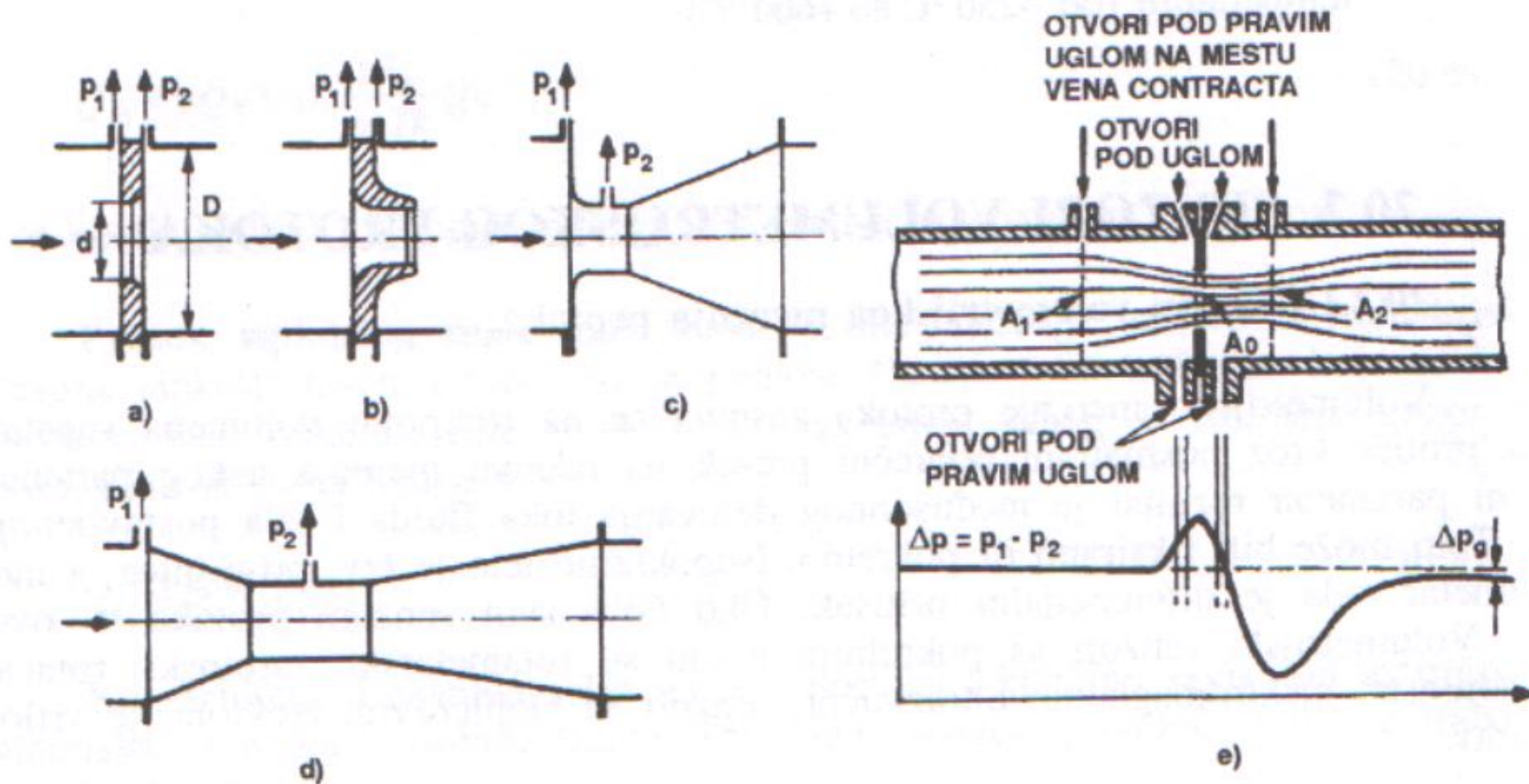
$$p + \rho \frac{1}{2} v^2 + \rho gh = \text{const}$$

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2} (v_{2a}^2 - v_{1a}^2) = k \frac{\rho}{2} v_{2a}^2 (1 - R^2)$$

$$v_{2a} = \frac{1}{\sqrt{k(1 - R^2)}} \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p}$$

$$Q = \xi A_2 \sqrt{\Delta p}$$

a) SENZORI sa PRIGUŠNICOM



Slika 20.1. Senzori protoka sa prigušnicom: a) merna blenda, b) sapnica, c) Venturijeva sapnica, d) Venturijeva cev, e) deo cevovoda sa mernom blendom

$$Q_v = C \alpha \varepsilon d^2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}$$

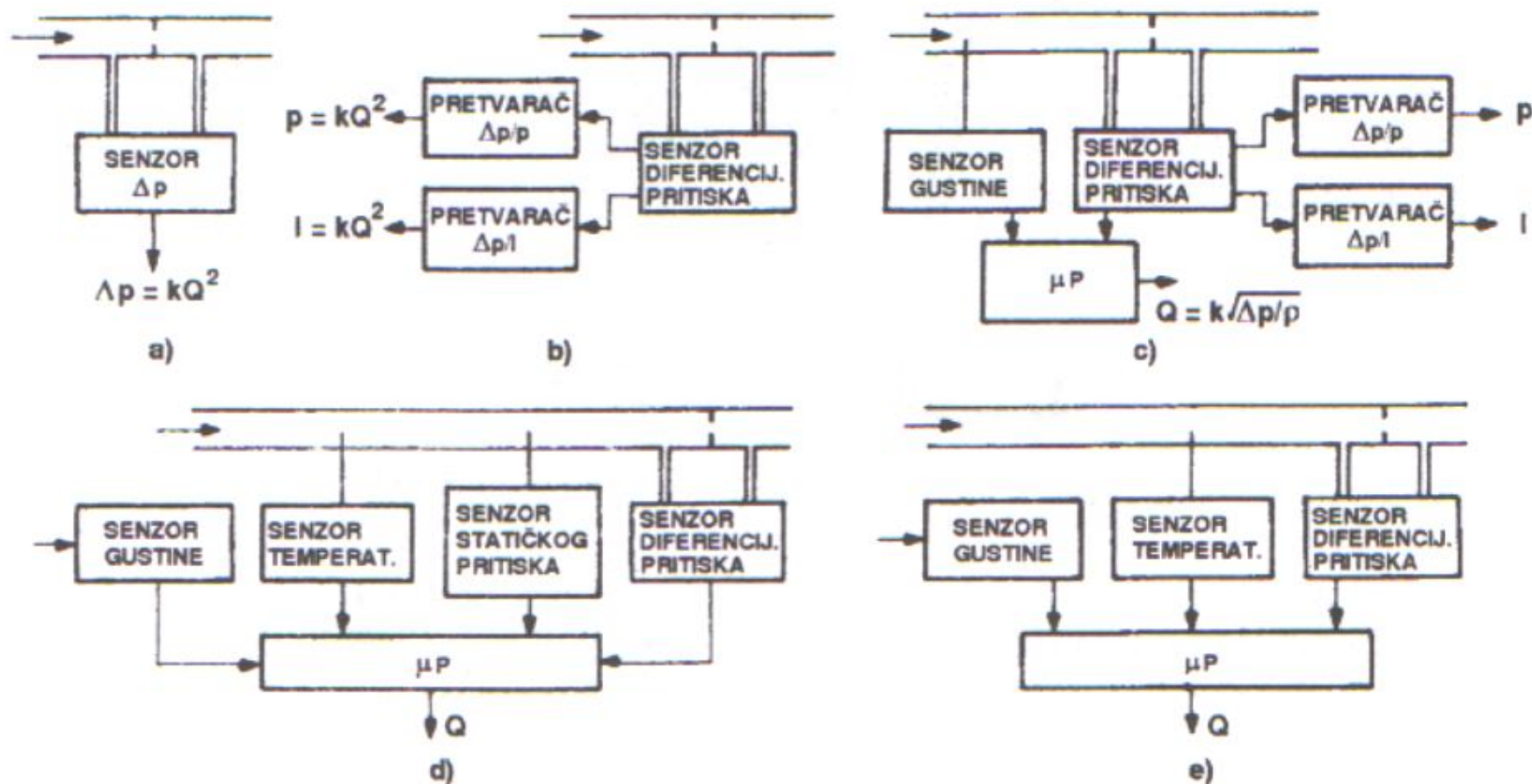
Prednosti su:

- ✓ jednostavnost,
- ✓ odsustvo pokretnih delova,
- ✓ dugovečnost, te
- ✓ pristupačna cena.

Nedostaci:

- nelinearna zavisnost od pada pritiska
- mali korisni opseg ($Q_{max}:Q_{min} = 4 : 1$)
- ograničena primena na cevovode sa $D > 50$ mm
- neophodnost pravolinij. toka (10-30 D pre i 5-10 D posle)
- trajni gubitak pritiska

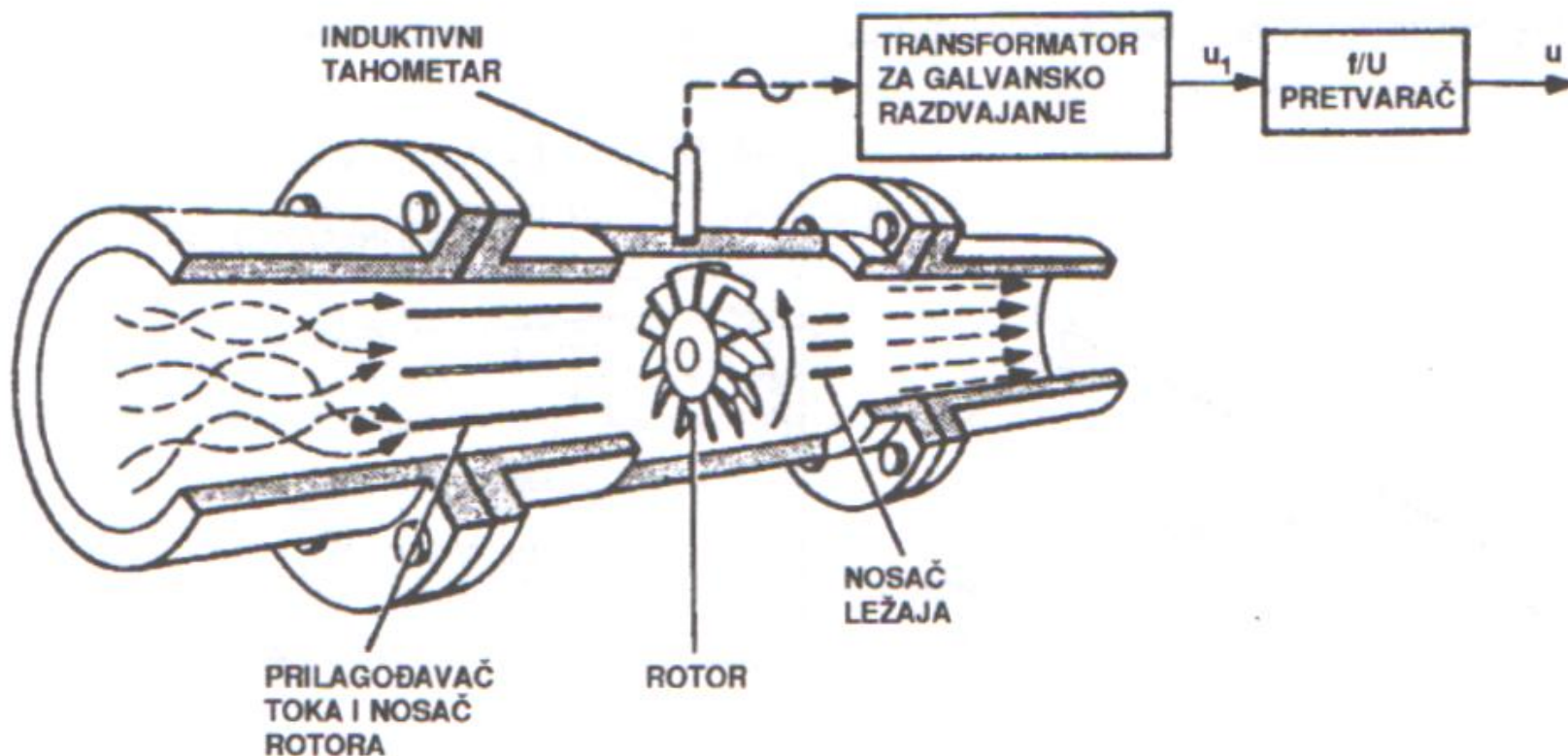
ELEMENTI AUTOMATSKIH SISTEMA – SENZORI PROTOKA



Slika 20.2. Strukturne blok-šeme senzora protoka sa prigušnicom: a) Δp -protokomer, b) Δp -protokomer sa standardnim izlazom, c) Δp -protokomer sa senzorom gustine u radnim uslovima, d) Δp -protokomer sa senzorom za posredno merenje gustine gasova, e) Δp -protokomer sa senzorom za posredno merenje gustine tečnosti

2. VOLUMETRIJSKI SENZORI PROTOKA SA MERENJEM BRZINE FLUIDA

2.1. Turbinski protokomer - turbina osetilni element



2.1. Turbinski protokomer

Prednosti:

- ✓ visoka tačnost ($\pm 0.2 - 2 \%$)
- ✓ vremenska konstanta 2 – 10 ms
- ✓ korisni merni opseg ($Q_{max}:Q_{min} = 10 : 1$)
- ✓ mali pad pritiska,
- ✓ za raznovrsne fluide,
- ✓ širok opseg temperatura i pritiska, te
- ✓ relativno jednostavna konstrukcija.

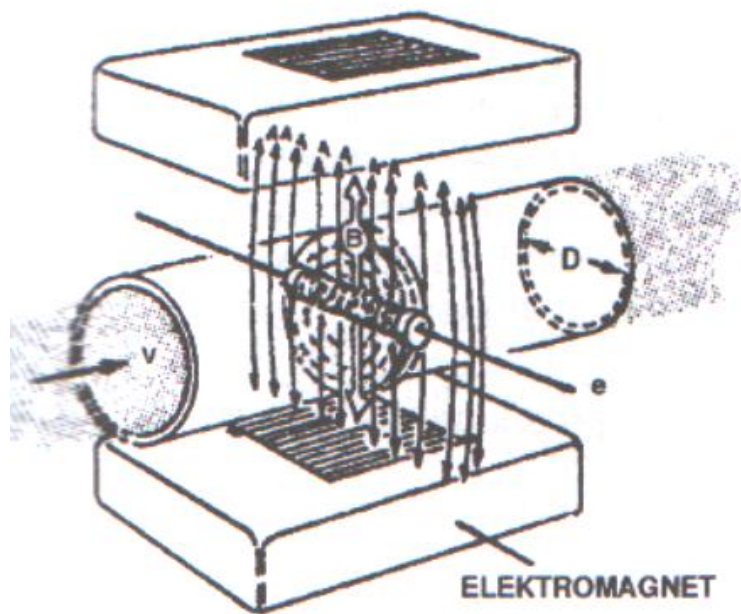
Nedostaci:

- obavezna kalibracija i
- neophodnost periodičnog servisiranja rotora.

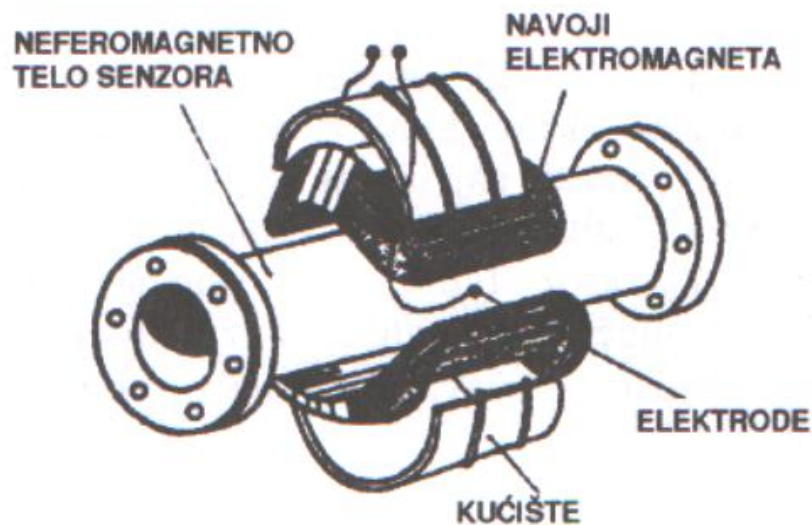
VOLUMETRIJSKI SENZORI PROTOKA SA MERENJEM BRZINE FLUIDA

2.2. Indukcioni senzori – elektromagnetni senzori koji rade na principu Faradejevog zakona inukcije

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



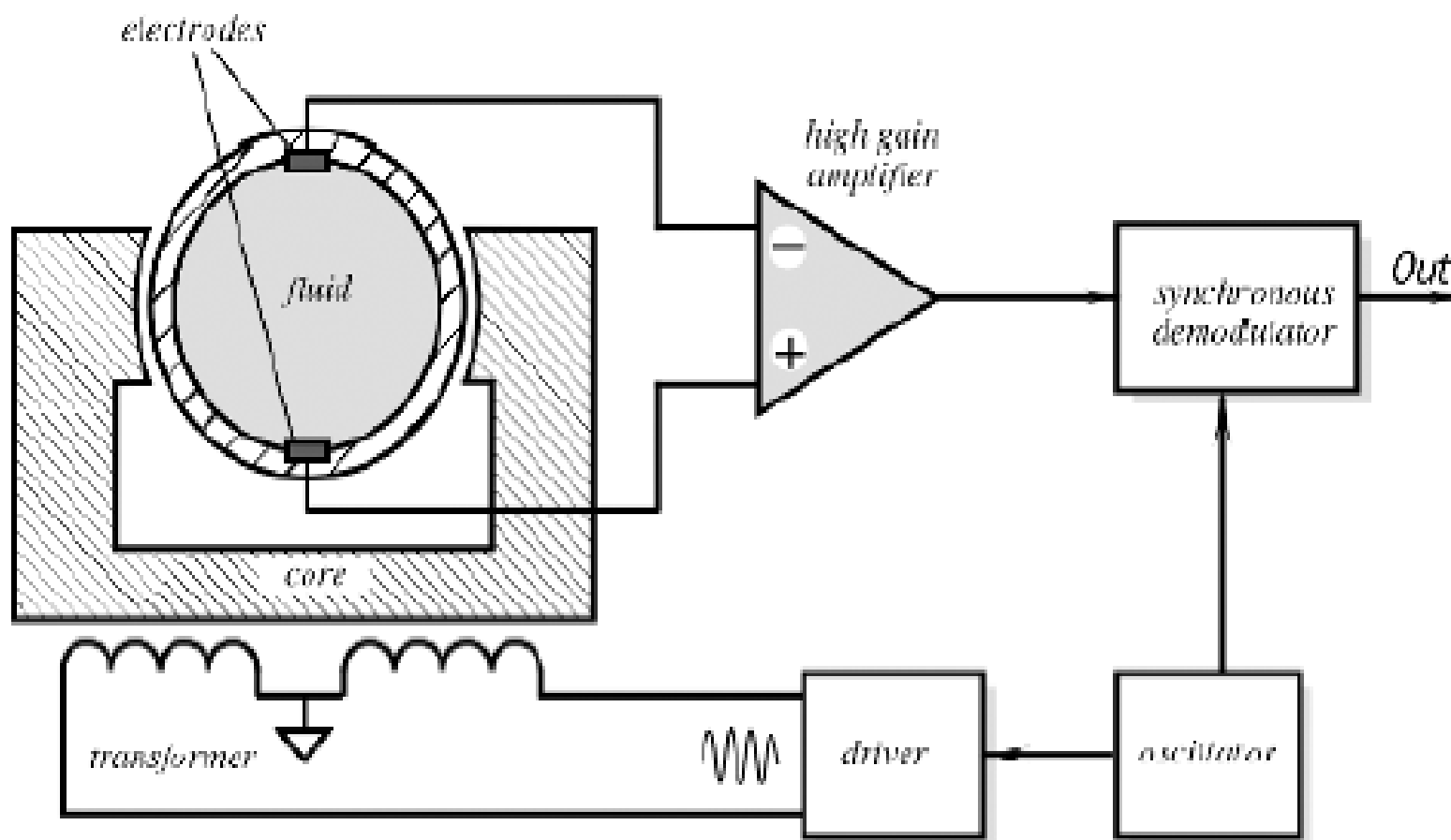
a)



b)

Slika 20.9. Indukcioni senzor: a) princip rada, b) tipični izgled

2.2. Indukcioni senzori



2.2. Indukcioni senzori

Prednosti:

- ✓ bezinercionost ($\tau \approx 0$)
- ✓ visoka tačnost ($\pm 0.2 - 2 \%$)
- ✓ korisni merni opseg ($Q_{max}:Q_{min} = 40 : 1$)
- ✓ linearna zavisnost izlaza od protoka
- ✓ nezavisnost od temperature i pritiska, te
- ✓ neremećenje toka.

Nedostaci:

- nemogućnost merenja neprovodnih fluida,
- potrošnja energije (40 – 700 W), i
- relativno visoka cena.

VOLUMETRIJSKI SENZORI PROTOKA SA MERENJEM BRZINE FLUIDA

2.3. Ultrazvučni senzori – mere brzinu na bazi interakcije toka i ultrazvuka koji prolazi kroz fluid.

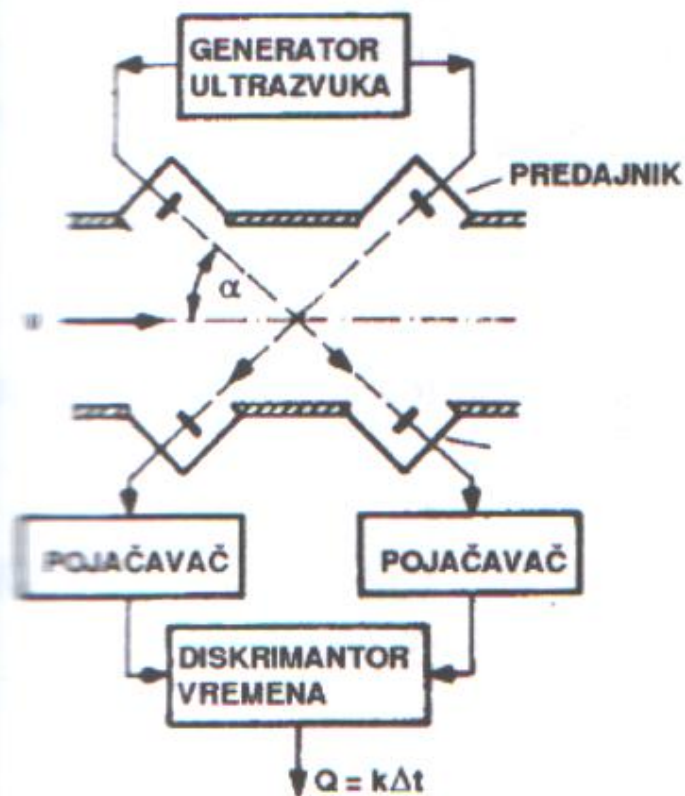
Najčešće se mere:

- promena faze
- promena frekvencije
- vreme prostiranja ultrazvuka kroz fluid.

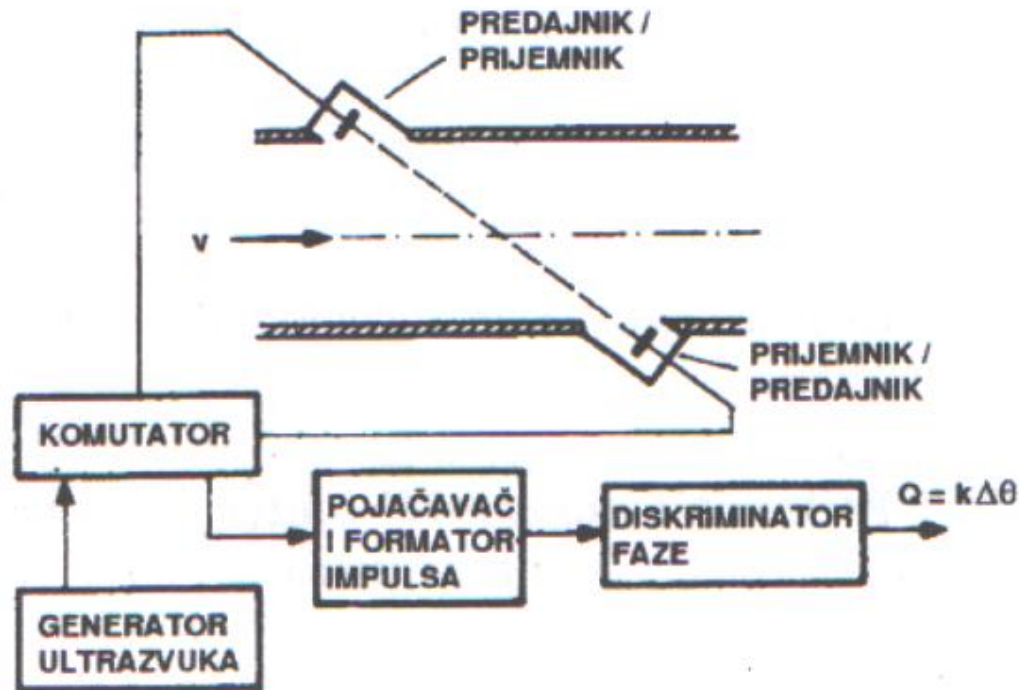
Kao generator i prijemnik ultrazvuka koriste se pijezerokeramički elementi u obliku diska prečnika $D = 10 - 20$ mm, koji radi na rezonantnoj frekvenciji ($1 - 10$ MHz).

Mernje razlike frekvencije ne zavisi od brzine ultrazvuka i ima najbolju tačnost ($\pm 0.2 - 1$ %), dok najlošiju ima merenje vremena ($\pm 0.5 - 4$ %)

2.3. Ultrazvučni senzori



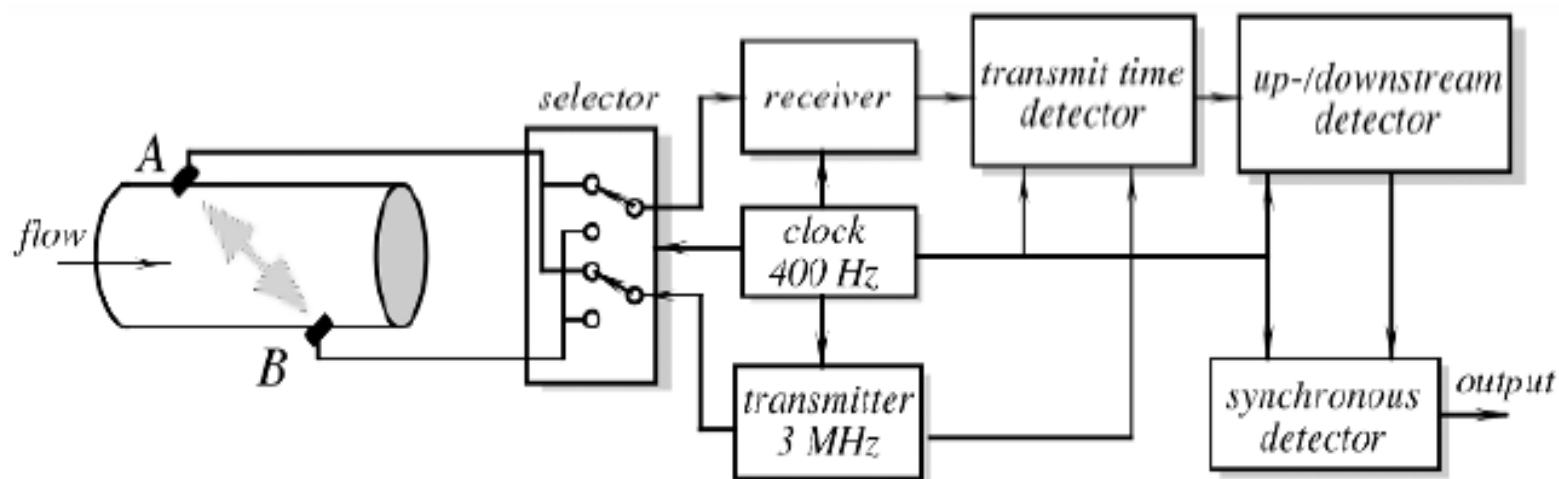
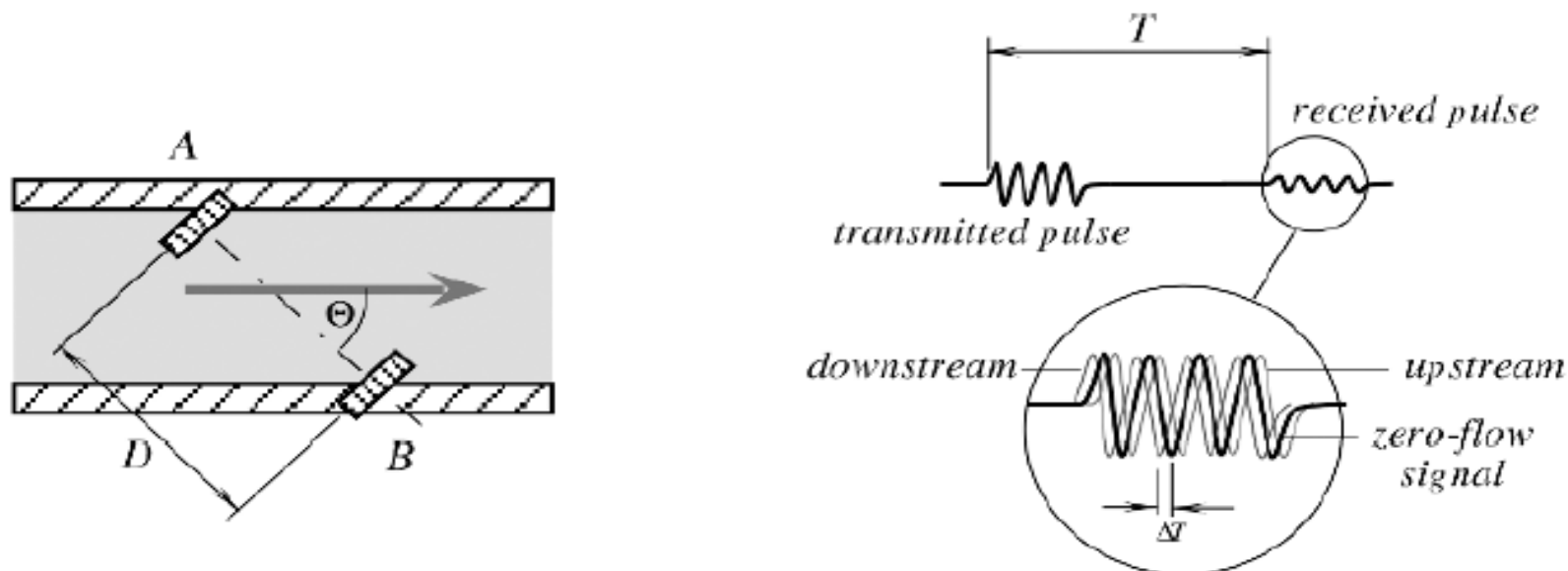
a)



b)

Slika 20.10. Ultrazvučni senzor protoka: a) princip rada sa direktnim merenjem vremena prelaza, b) fazni princip

2.3. Ultrazvučni senzori – fazni princip



3. SENZORI MASENOG PROTOKA

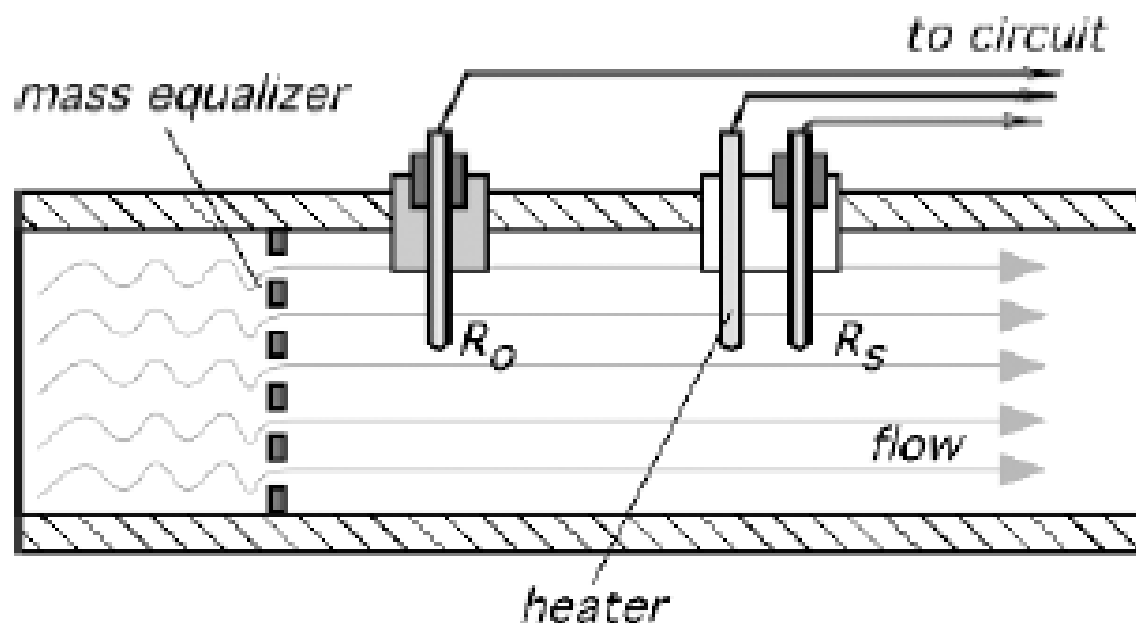
3.1. Termički senzori kalorimetarskog tipa (grejna cev)

mere razliku temperature fluida ispred i iza grejača u izolovanoj cevi, i na osnovu jednačine toplotne ravnoteže

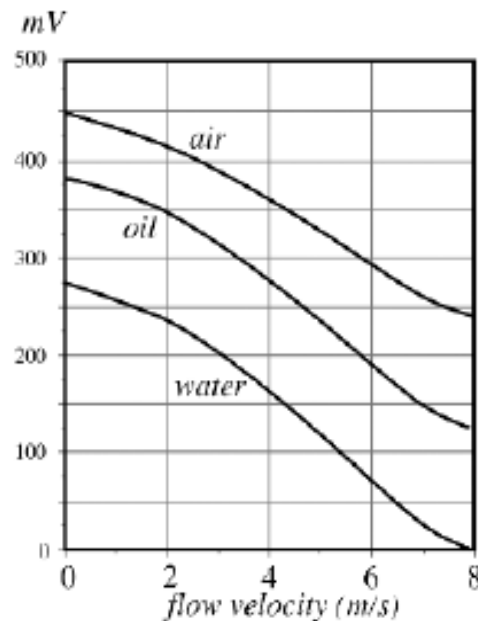
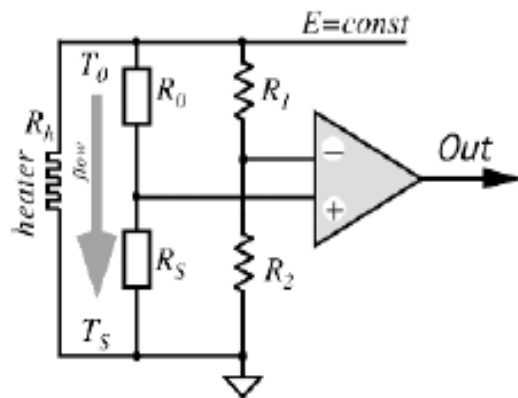
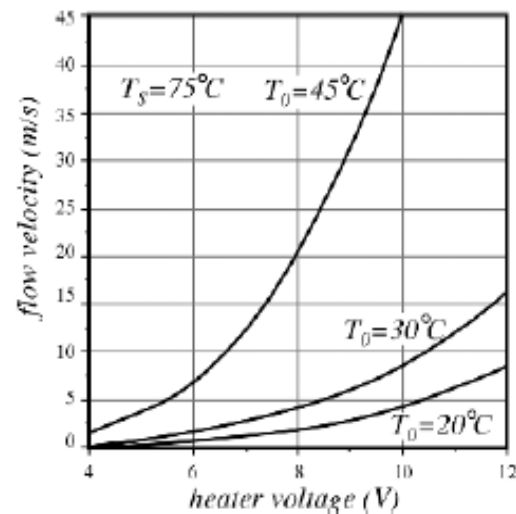
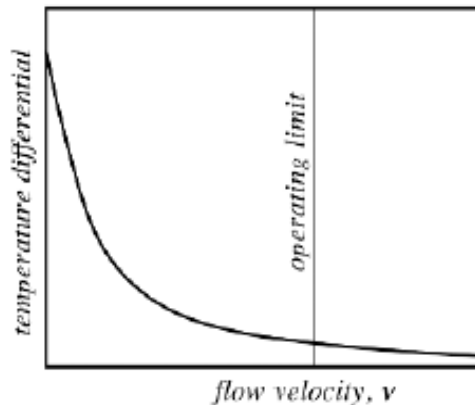
$$W = k Q_m c_p \Delta T$$

k – korekcionni koeficijent

c_p – specifični toplotni kapacitet fluida



3.1. Termički senzori



5 Hot-wire air-mass meter (circuit)

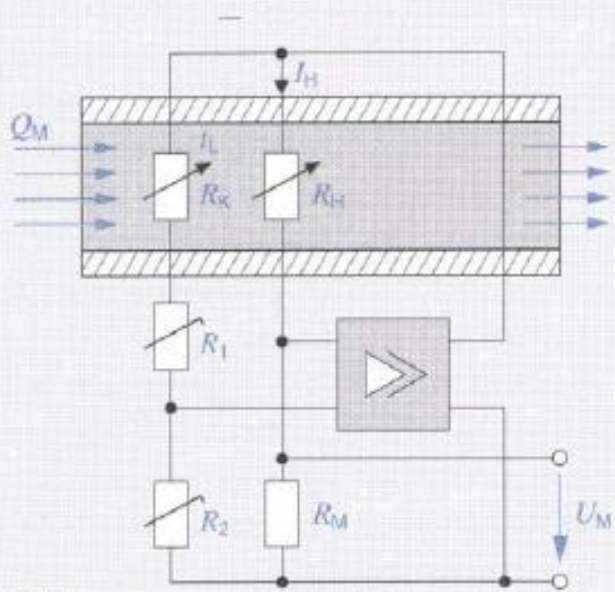


Fig. 5
 $Q_{M,0}$ Air-mass flow
 U_M Measurement voltage
 R_H Hot-wire resistor
 R_K Compensation resistor
 R_M Measuring resistor
 $R_{L,0}$ Calibration resistors

6 Hot-wire air-mass meter (components)

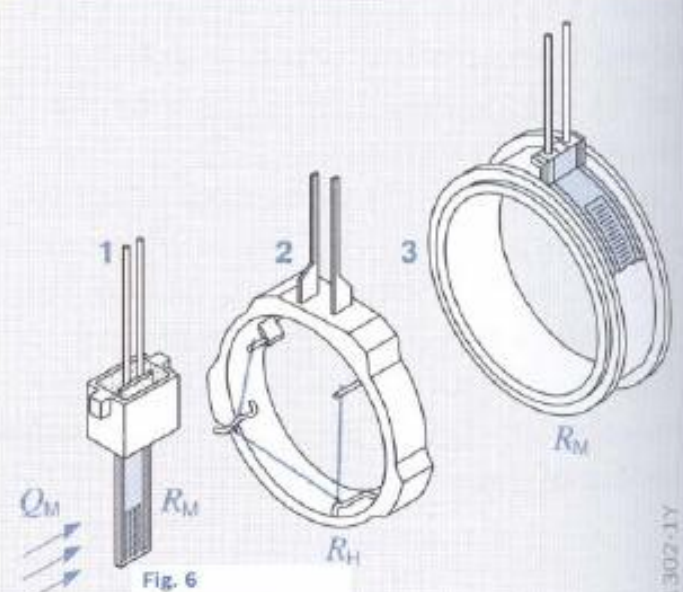


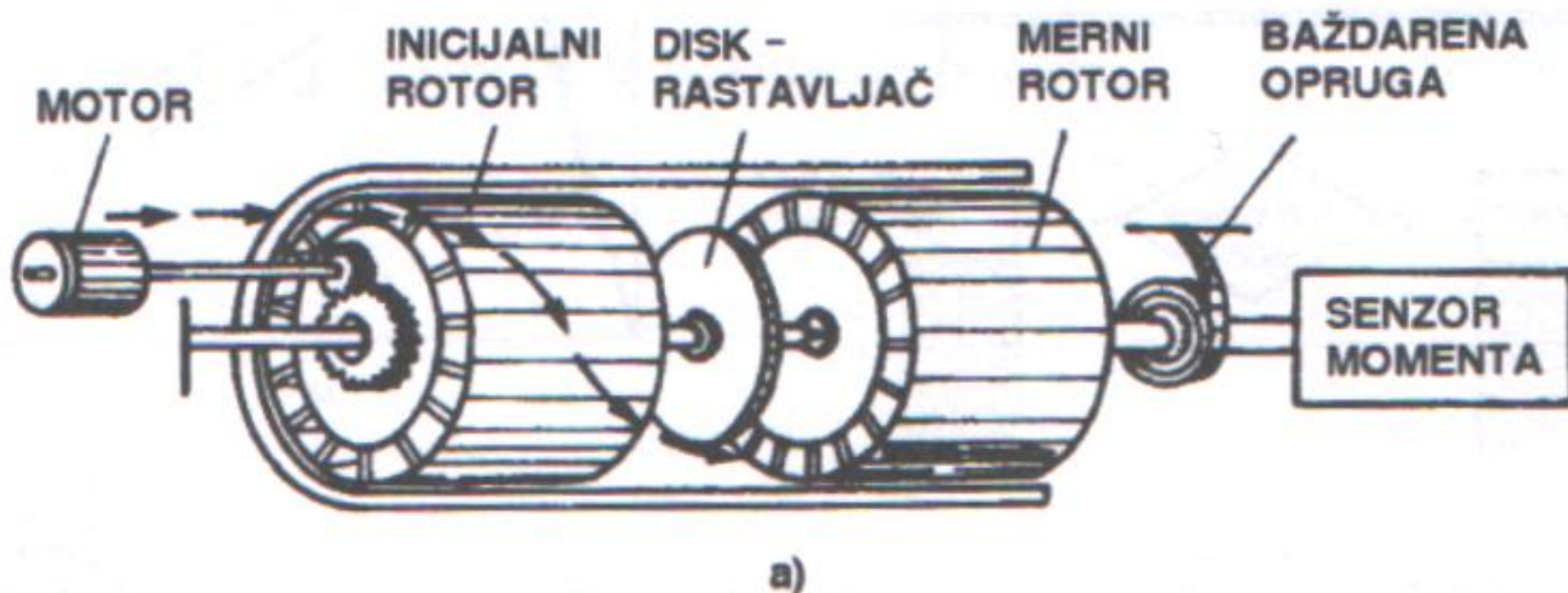
Fig. 6
 1 Temperature compensation resistor R_K
 2 Sensor ring with hot wire R_H
 3 Precision measuring resistor (R_M)
 Q_M Air-mass flow



3. SENZORI MASENOG PROTOKA

3.2. Momentni senzori

3.2.1 Turbinski momentni senzor – merenjem zakreta vratila mernog rotora meri se obrtni moment koji je proporcijalan masenom protoku.



3. SENZORI MASENOG PROTOKA

3.2.1 Turbinski momentni senzor

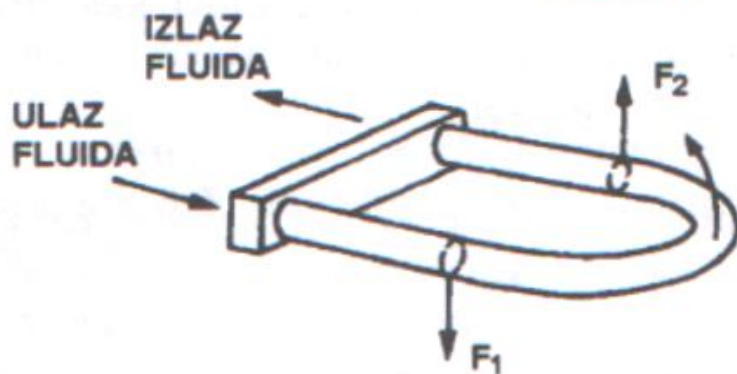
Karakteristike:

- ✓ visoka tačnost ($\pm 0.5 \div 2 \%$)
- ✓ prečnik cevovoda $D = 50 \div 200$ mm
- ✓ korisni merni opseg ($Q_{max} : Q_{min} = 10 : 1$)
- ✓ mogućnost rada pri pritiscima do 10 MPa i
- ✓ temperaturama od -30 do 50°C

3.2.2 Koriolisov senzor masenog protoka meri ugao uvrtnanja zbog dejstva Koriolisove sile na U-cev (element) koja osciluje frkvencijom 80 Hz i kroz koju protiče fluid određenog protoka.

Amlituda uvrtnanja je proporcijalna **masenom protoku**.

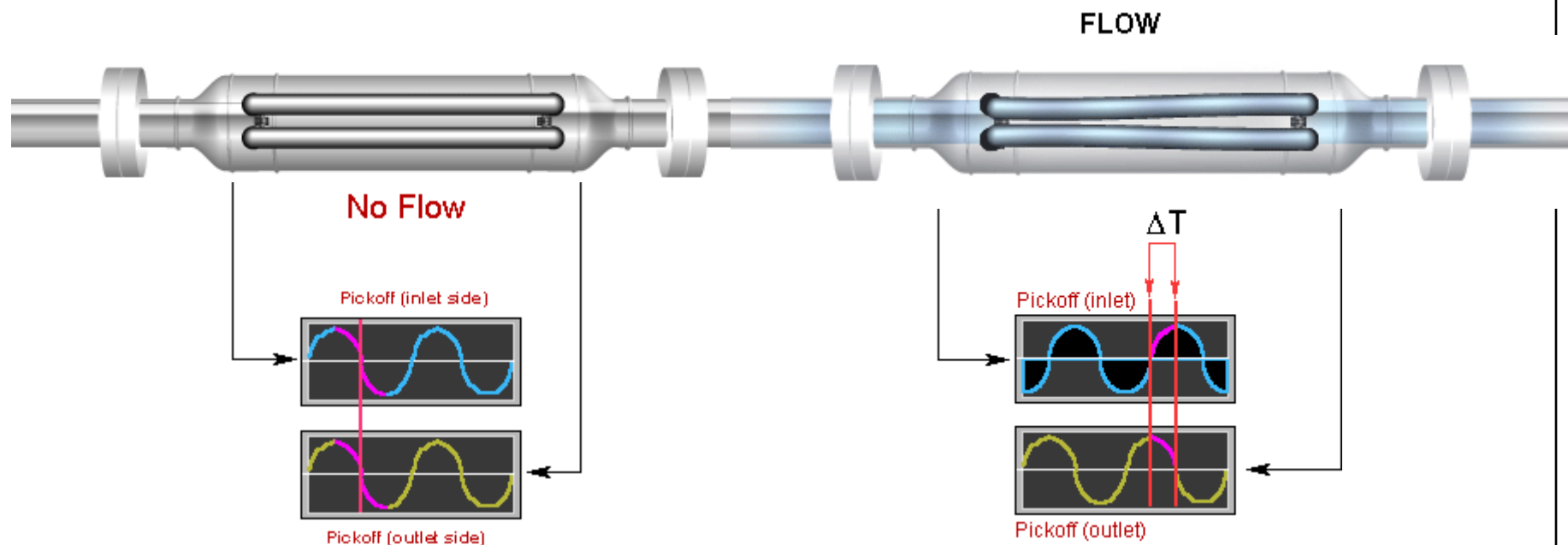
ELEKTROMAGNET
ZA POBUĐIVANJE
OSCILACIJA



IZGLED SENZORA SA
ZADNJE STRANE

3.2.2 Koriolisov senzor masenog protoka

Princip rada Koriolis senzor masenog protoka meri moment koji se javlja usled delovanja koriolisove sile, koja zavisi od protoka. Koriolisova sila je inercijalna sila, koja nastaje pri složenom kretanju.



SENZORI TEMPERATURE

METROLOŠKI OSNOVI MERENJA TEMPERATURE

- **Temperatura** je fizikalna veličina koja predstavlja stepen zagrejanosti tela.
- Temperatura je intezivna (aktivna) veličina koja nema svojstvo **aditivnosti** (prilikom deljenja tela svaki deo zadržava temperaturu tog tela).
- Ne može se izgraditi deljitelj ili sabirač).
- Temperatura je najčešće merena veličina u tehnološkim procesima (60 % svih merenja)
- Senzori:
 - Ekspanzioni senzori temperature
 - Termoelementi
 - Otpornički senzori temperature

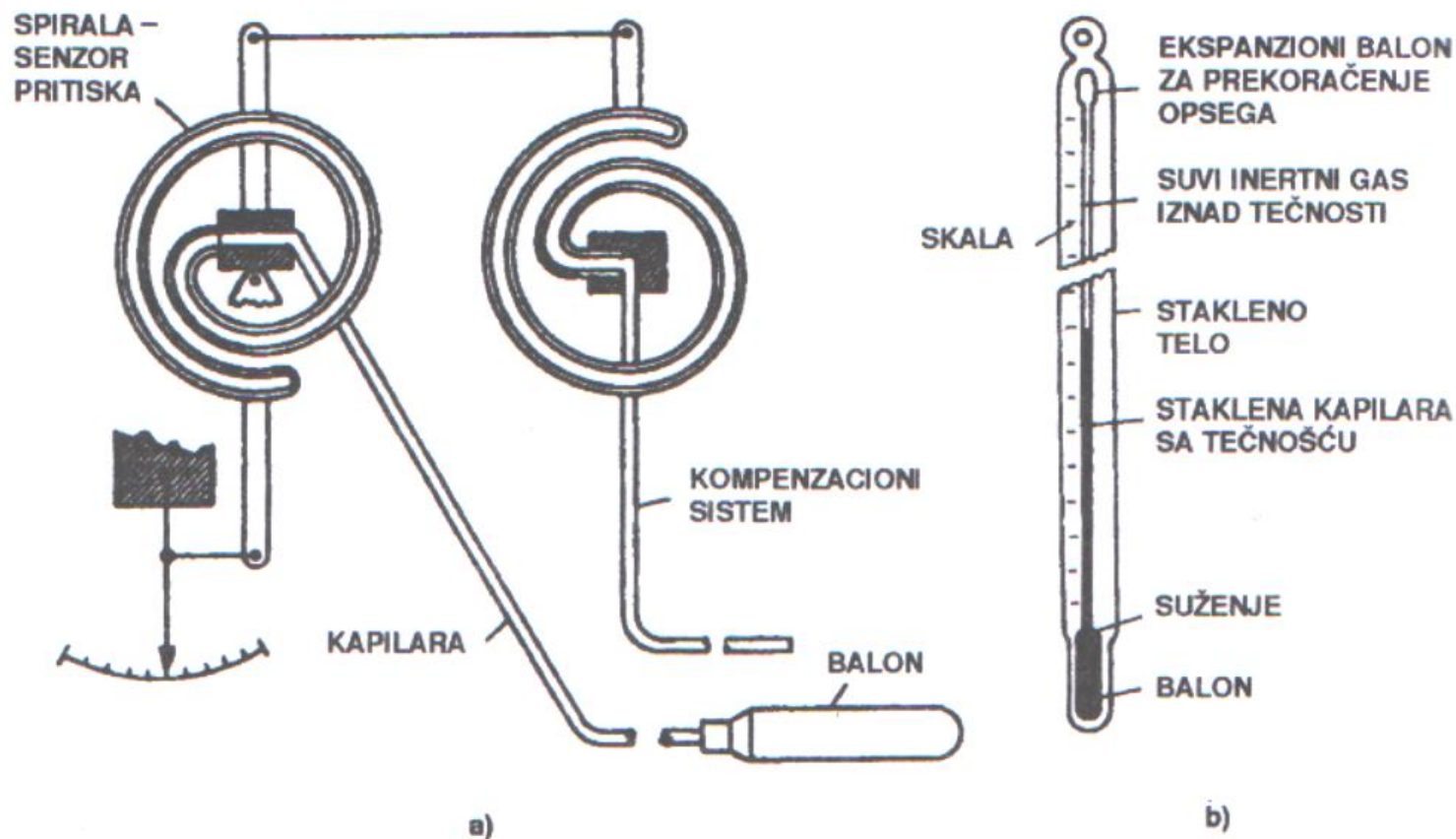
1. EKSPANZIONI SENZORI TEMPERATURE

- To su termometri čiji se radni medij grejanjem širi, a hlađenjem skuplja, tako da linearno menja svoje geometrijske dimenzije.
- Ako je zapremina konstantna, tada se umesto promene dimenzija javlja promena pritiska.
- Razlikujemo:
 - Gasne ekspanzione senzore temperature i
 - Tečne ekspanzione senzore temperature

karakteristike:

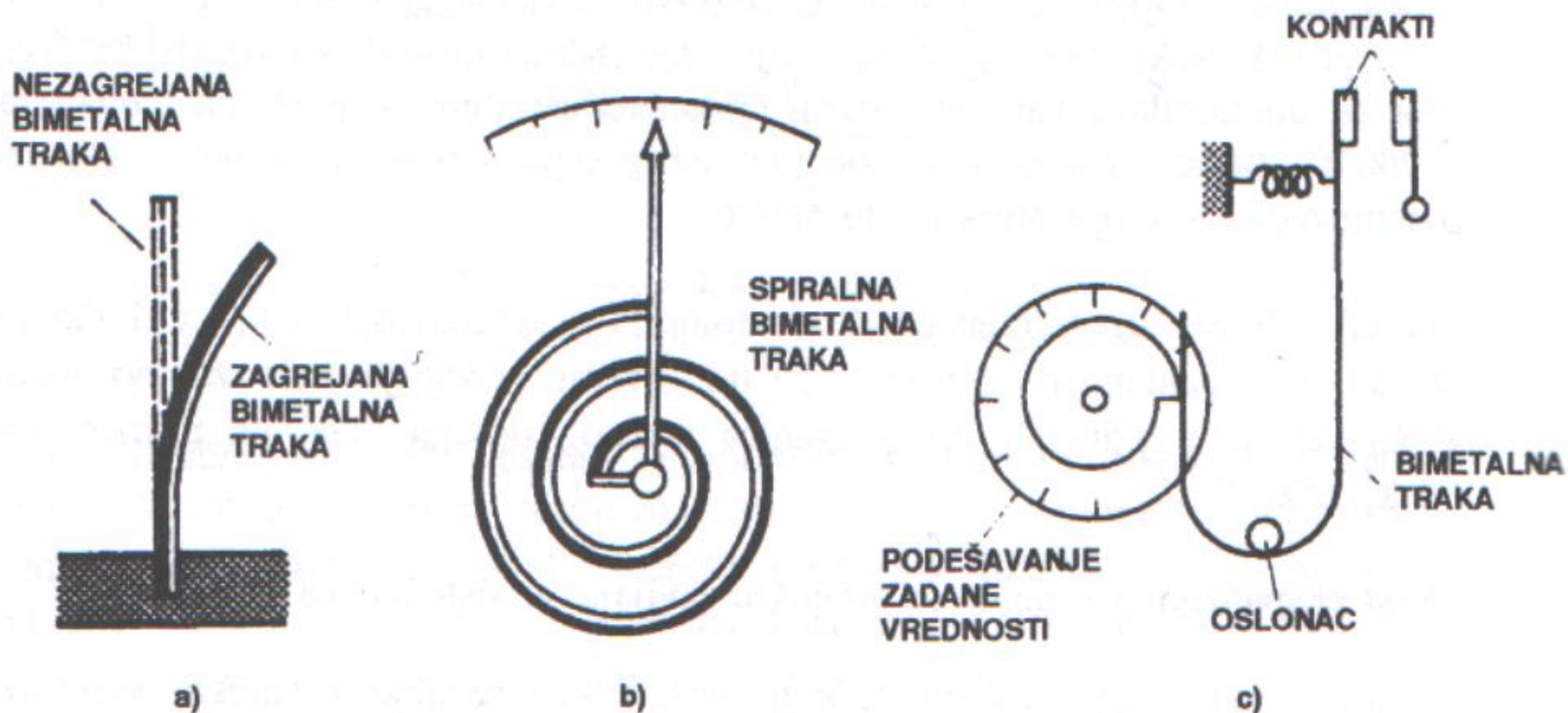
- ✓ tačnost $\pm 0.1 - 2.0 \%$
- ✓ jednostavnost
- ✓ laka mogućnost ugradnje
- ✓ vremenska konstanta 4 – 5 s
- ✓ uglavnom za indikaciju, veoma retko za regulaciju.

1. EKSPANZIONI SENZORI TEMPERATURE



Slika 21.1. Ekspanzioni senzor temperature: a) gasni ekspanzioni senzor sa kompenzacijom uticaja temperature okoline, b) ekspanzioni senzor sa tečnošću

1. EKSPANZIONI SENZORI TEMPERATURE

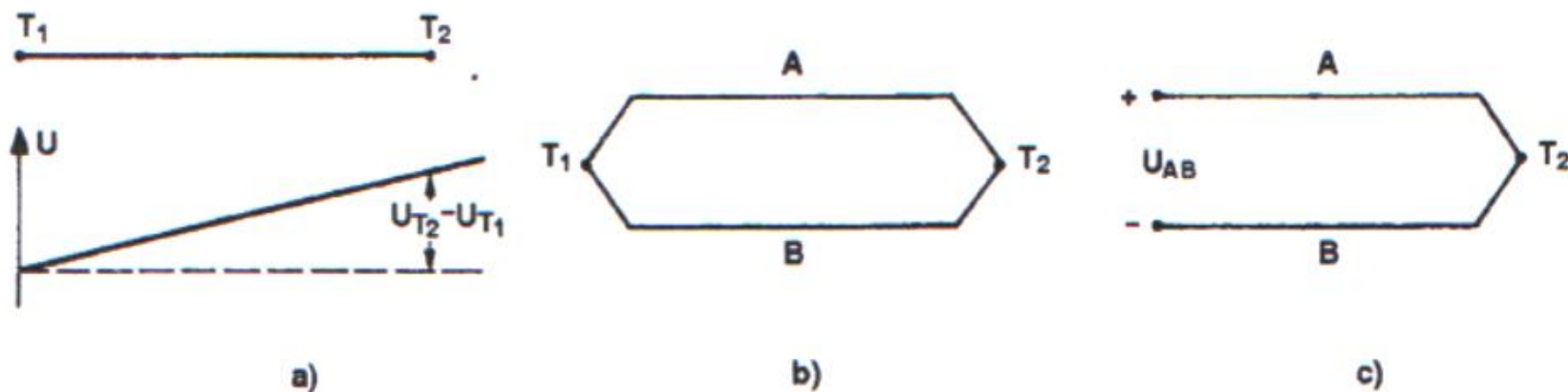


Slika 21.2. Bimetalni senzor temperature: a) bimetalna traka, b) bimetalna spirala, c) termostat

2. TERMOELEMENTI

Prvobitna namena **termoelemenata** bila je merenje visokih temperatura (500-1000°C), ali danas je taj opseg znatno proširen i na niže i više temperature.

Termoelektrični potencijal (napon) je posledica toplotnog toka slobodnih elektrona provodnika čiji su krajevi na različitim temperaturama ($T_2 > T_1$).



Slika 21.3. Termoelektrični efekt: a) otvoreno termoelektrično kolo, b) zatvoreno termoelektrično kolo sa dva provodnika, c) otvoreno termoelektrično kolo sa dva provodnika

2. TERMOELEMENTI

Termoelektrični efekat (Zebekov termoelektrični efekat) je pojava da kroz kolo od dva provodnika, napravljena od različitih materijala, čiji su krajevi na različitim temperaturama teče **termoelektrična struja** (slika 21.3.b).

Ako se kolo prekine u centru prvog spoja (slika 21.3.c), dobija se napon na otvorenim krajevima

$$U_{AB} = (U_{T2} - U_{T1}) - (U_{T1} - U_{T2}) = K_A(T_2 - T_1) - K_B(T_1 - T_2) = \alpha(T_2 - T_1)$$

To je **termoelektrično kolo**, koje se uobičajeno još naziva **termoelement (termopar)**.

2. TERMOELEMENTI

Izrada termoelemenata

Materijali za izradu. U principu mogu se koristiti bilo koja dva čista metala ili legure, ali za praktičnu primenu broj kombinacija je ograničen, jer se od materijala zahteva:

- stabilnost i ponovljivost termoelektričnog svojstva
- jednoznačna zavisnost termoelektrič. napona od temper.
- visoka osetljivost
- mogućnost zavarivanja i mehaničke obrade
- mehanička čvrstina
- pristupačna cena

2. TERMOELEMENTI

Izrada termoelemenata

Standarni tipovi termoelemenata su:

- bakar/konstantan $(-200 \div 350^{\circ}\text{C})$
- kromel/konstantan $(-200 \div 900^{\circ}\text{C})$
- gvožđe/konstantan $(0 \div 750^{\circ}\text{C})$
- platina+10%rodijum/platina $(0 \div 1450^{\circ}\text{C})$
- platina+30%rodijum/platina $(0 \div 1700^{\circ}\text{C})$

a za specijalne namene koriste se:

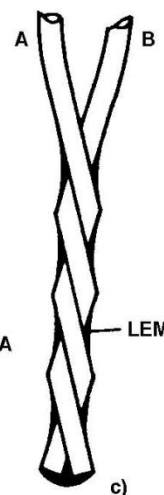
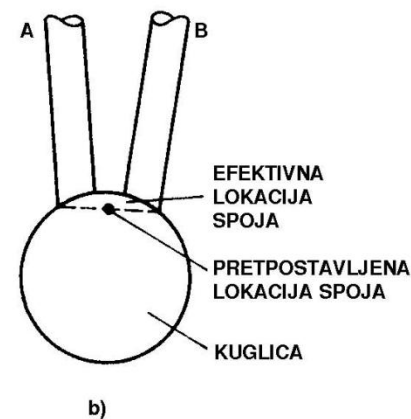
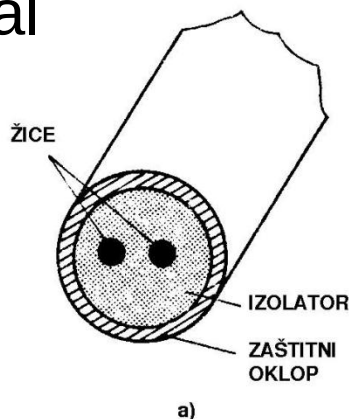
- volfram/volfram+26%renijum,
- volfram+5%renijum/volfram+26%renijum (za visoke temperature do $2\,760^{\circ}\text{C}$)

2. TERMoeLEMENTI

Konstrukcija termoelemenata. Svi termoelementi prave se na isti način: dve žice od termoelektričnog materijala spoje se na toplom kraju i zaštite keramičkim izolacionim materijalom i metalnim oklopom (slika a).

Postoji više različitih tehnika spajanja žica:

- žice se zavare topljenjem tako da se formira kuglica (slika b)
- žice se zaleme pomoću metala sa nižom tačkom topljenja (slika c)
- žice se zaleme za metal



2. TERMOELEMENTI

Prednosti:

- ✓ rad bez spolj. izvora energije (aktivni senzor)
- ✓ jednostavna i kompaktna konstrukcija
- ✓ velika mogućnost ugradnje
- ✓ širok temperaturni opseg merenja ($-270^{\circ}\text{C} - +4000^{\circ}\text{C}$)
- ✓ visoka tačnost ($\pm 1 - 2.5 \%$) standar. ($\pm 0.5 - 1.1 \%$) spec.

Nedostaci:

- nizak nivo izlaznog signala ($<100 \text{ mV}$)
- mala osetljivost
- nelinearne statičke k-ke
- osetljivost na hemijsko delovanje radne okoline

Praktične preporuke

Da bi se umanjili nedostaci termoelementa kao senzora temperature i smanjile greške merenja, potrebno je pridržavati se sledećih pravila:

- termoelement ne sme biti na direktnom plamenu niti u njegovoj neposrednoj blizini zbog agresivnog delovanja gasova i čestica u okolini plamena
- za tela sa raspodeljenom vrednošću temperature termoelement treba ugraditi u zoni srednje vrednosti temperature jer on meri temperaturu u jednoj tački
- poželjno je da se termoelement locira na vidnom i dostupnom mestu radi lakše inspekcije i eventualne zamene
- telo termoelementa u celosti treba da se nalazi u mernom mediju
- svi kontakti moraju biti čisti i čvrsti kako bi prelazni otpor kontakata bio što manji
- priključni vodovi ne smeju biti u blizini visokonaponskih energetskeih vodova zbog elektromagnetne indukcije.

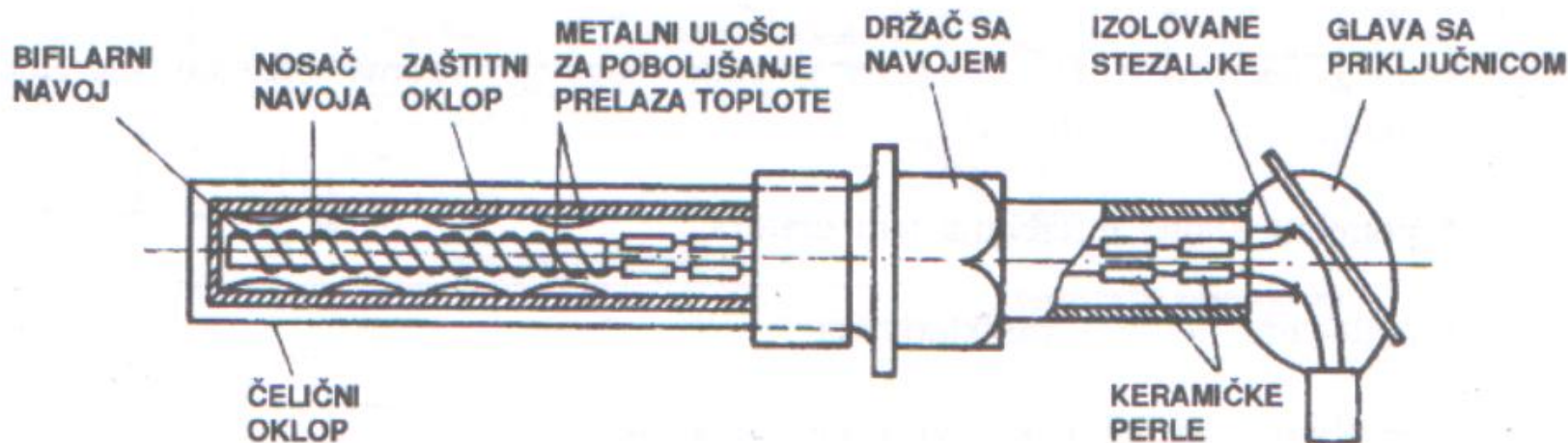
3. OTPORNIČKI SENZORI TEMPERATURE

3.1. Metalni otpornički senzori

Zavisnost otpora od temperature, prvi je uočio H. Dejvi 1821. godine. Senzori koji rade na ovom principu često se označavaju akronimom *RTD (Resistance Temperature Detektor)*.

Termootpornici od metala prave se u obliku kalema, po pravilu sa bifilarnim navojima (slika 21.14).

Prečnik žice je $0,05 - 0,1 \text{ mm}$, a dužina $50 - 100 \text{ mm}$.



Slika 21.14. Konstrukcija metalnog termootporničkog senzora

3. OTPORNIČKI SENZORI TEMPERATURE

Materijali za izradu.

Platina je najbolji materijal za izradu metalnih termootpornika jer se može dobiti sa čistoćom do 99,999%, hemijski je neutralna, ima dovoljno veliki linearni temperaturni koeficijent otpora.

Merni opseg temperature je od $-260 \div 650^{\circ}\text{C}$ (maksimalno do 1500°C)

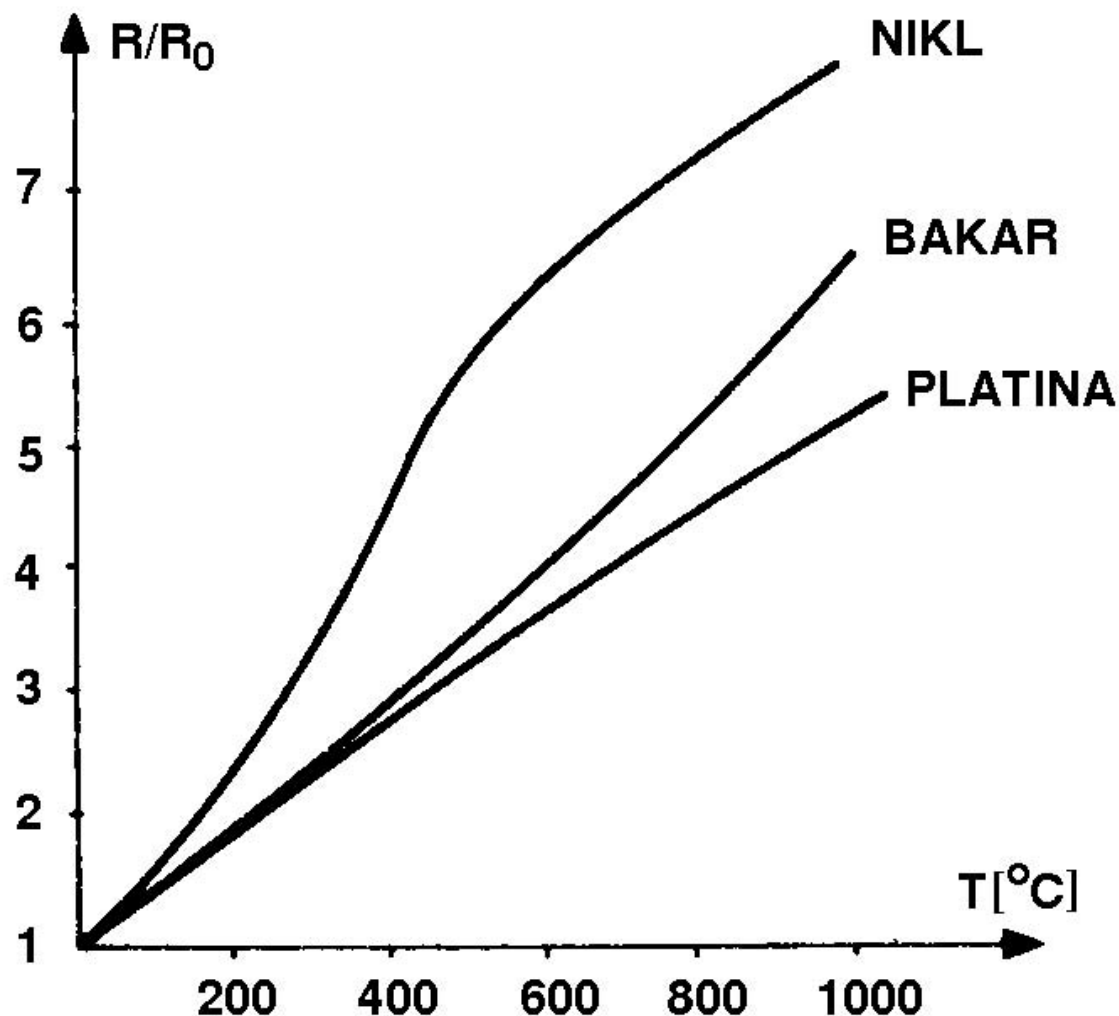
Nikl, gvožđe i neke njihove legure imaju slične osobine kada je u pitanju mogućnost izrade termootpornika.

Merni opseg temperature je od $-50 \div 250^{\circ}\text{C}$ (maksimalno mogući od $-200 \div 430^{\circ}\text{C}$)

Bakar je jeftin metal, može se dobiti sa visokim procentom čistoće i ima linearni temperaturni koeficijent otpora.

Merni opseg temperature je od $-50 \div 180^{\circ}\text{C}$ (maksimalno mogući od $-200 \div 260^{\circ}\text{C}$)

3. OTPORNIČKI SENZORI TEMPERATURE



3. OTPORNIČKI SENZORI TEMPERATURE

3.1. Metalni otpornički senzori

Prednosti:

- ✓ visoka tačnost ($\pm 0.2 \div \pm 0.6 \%$)
- ✓ velika linearnost, veća nego kod termoelemenata
- ✓ brz odziv
- ✓ male dimenzije
- ✓ pristupačna cena

Nedostaci:

- potreban spoljni izvor energije (pasivni senzor)
- mala promena otpora ΔR
- mala nominalna vrednost otpora na $0\text{ }^{\circ}\text{C}$
- pojava samozagrevanja
- osetljivost pojedinih izvedbi na mehaničke udare i lom.

3. OTPORNIČKI SENZORI TEMPERATURE

3.2. Poluprovodnički otpornički senzori temperature

Termistor je temperaturno osetljivi otpornik, koji se pravi od čistog germanijuma, oksida metala hroma, kobalta, gvožđa, nikla i drugih.

Promena otpora sa temperaturom izrazito je nelinearna i u širem temperaturnom opsegu (od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $100\text{ }^{\circ}\text{C}$) može se opisati jednačinom

$$R_T = AT^b e^{B/T}$$

gde su:

- T apsolutna temperatura u [K] ,
- A , b i B konstante zavisne od vrste materijala i konstrukcije termistora.

3. OTPORNIČKI SENZORI TEMPERATURE

3.2. Poluprovodnički otpornički senzori temperature

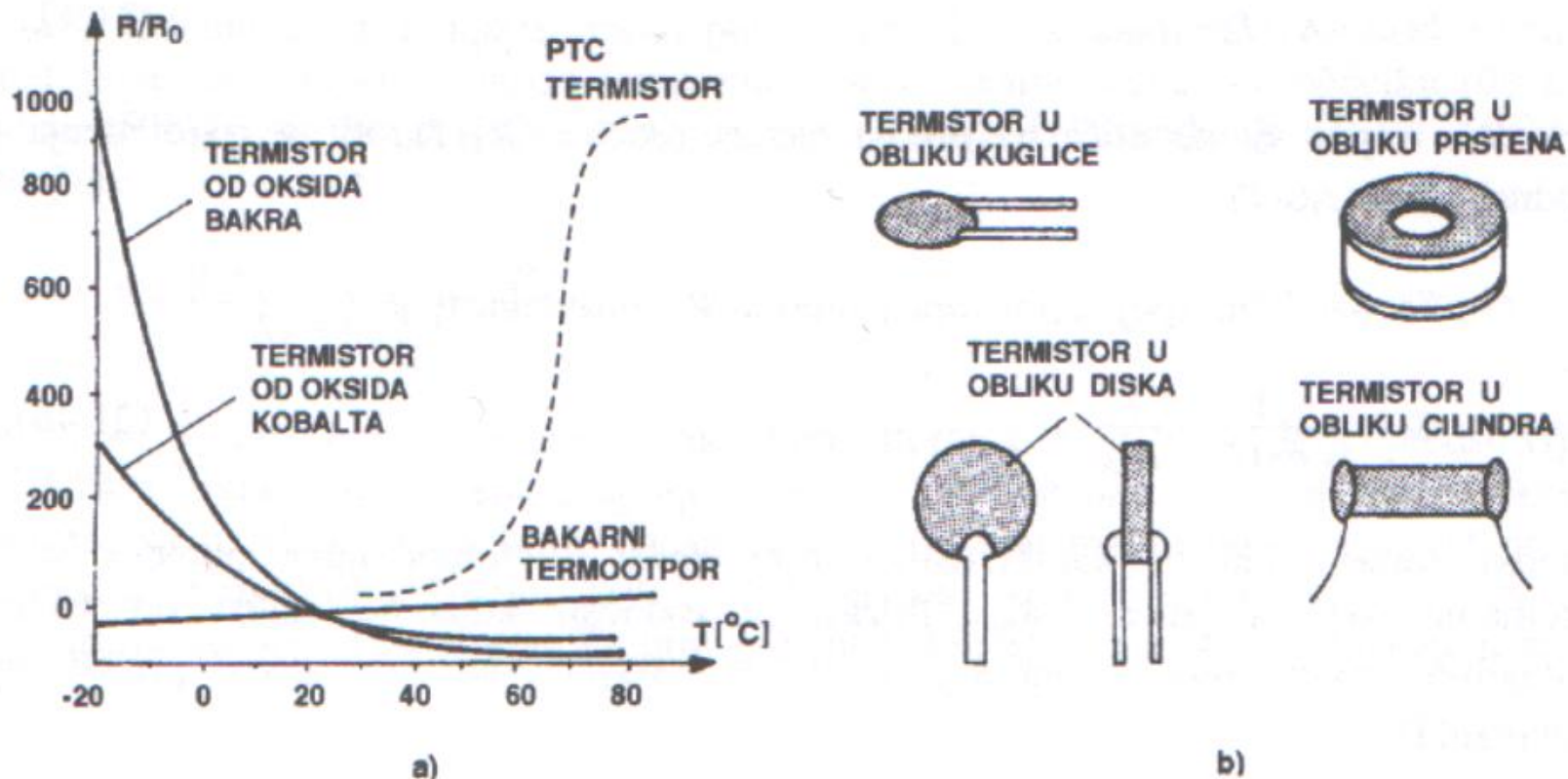
Vrste termistora Za razliku od žičanih termootpornika, za većinu termistora otpor opada sa porastom temperature, što znači da je temperaturni koeficijent otpora negativan. Takvi termistori često se nazivaju **NTC-otpornici (Negative Temperature Coefficient)**.

Temperaturni koeficijent termistora, međutim, može biti pozitivan, kao što je kod metala. Tada je reč o **PTC-otporima (Positive Temperature Coefficient)**.

Termistori najčešće imaju oblik diska, prstena ili cilindra (slika 21.17.b).

3. OTPORNIČKI SENZORI TEMPERATURE

3.2. Poluprovodnički otpornički senzori temperature



Slika 21.17. Termistor; a) statička karakteristika, b) izgled

3. OTPORNIČKI SENZORI TEMPERATURE

3.2. Poluprovodnički otpornički senzori temperature

Prednosti:

- ✓ visoka osetljivost
- ✓ male dimenzije
- ✓ velika brzina odziva, od 1ms do 150 s (najčešće oko 30 s)
- ✓ neosetljivost na otpor priključnih vodova
- ✓ niska cena

Nedostaci:

- izrazito nelinearna karakteristika
- velike varijacije parametara, pa je eventualna zamena drugim termistorom uvek problematična
- mali temperaturni opseg
- povećano samozagrevanje zbog velikog otpora i malih dimenzija, zbog čega termistori rade sa manjom strujom nego žičani termootpornici ($< 100\mu\text{A}$),