

UVODNA RAZMATRANJA O UPRAVLJANJU

Osnovna struktura sistema upravljanja

Regulaciona petlja sadrži 4 glavna osnovna dela:

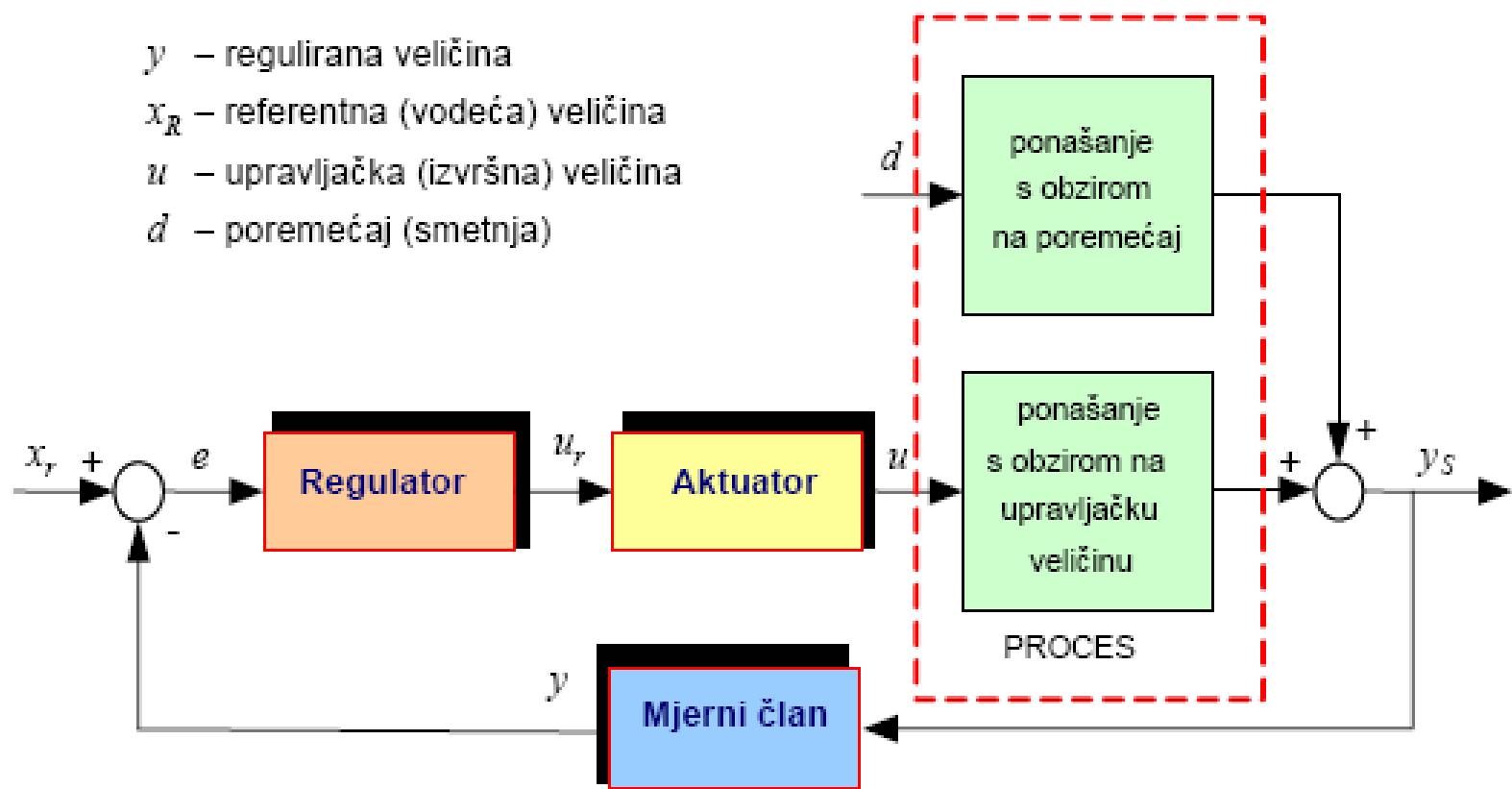
- proces
- merni element
- regulator
- izvršni element

y – regulirana veličina

x_R – referentna (vodeća) veličina

u – upravljačka (izvršna) veličina

d – poremećaj (smetnja)



Senzor

- izlaz ovog elementa, koji je u kontaktu sa procesom, zavisi od fizičke veličine koja se mjeri.

Primeri:

Termopar; napon termopara (mV) zavisi od temperature;

Kod uređaja za mjerenje naprezanja otpor senzora zavisi od mehaničkog naprezanja.

Pretvarači - Elementi za obradu signala

Izlaz iz senzora pretvara u oblik prikladan za prikaz ili dalje korišćenje.

Primjeri:

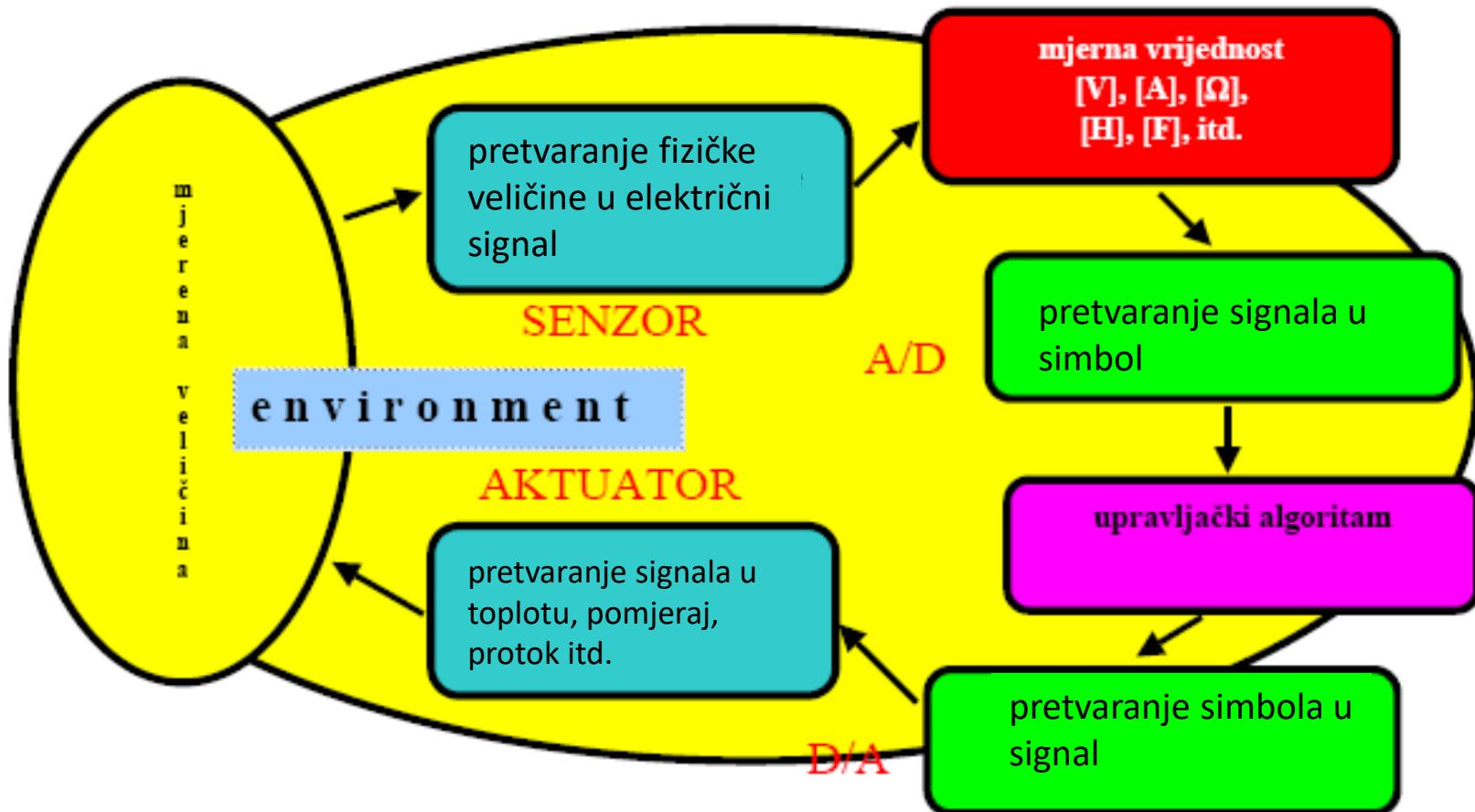
A/D pretvarači za pretvaranje napona u digitalni oblik za ulaz u računar

mikroprocesor koji izračunava mernu vrijednost na bazi ulaznih digitalnih podataka (npr. za računanje ukupne mase gasa na bazi protoka i gustine, korekcija nelinearnih senzora)

➤ **Aktuator** je izvršni organ mehaničkog tipa. Izvršni mehanizam se obično sastoji iz mehaničkog uređaja kojim se mijenja upravljačka veličina i pogonskog uređaja koji mogu, ali ne moraju, biti izvedeni kao jedinstvena konstrukcijska celina. Ulaz u aktuator je signal iz regulatora, a izlaz pokreće izvršni organ.

➤ Izvršni organ je element direktne grane SAU kojim se neposredno mijenja izvršna veličina. Izvršni organ mijenja tok energije ili materijala kroz objekat upravljanja u cilju dostizanja određenih radnih stanja.

Uloga senzora u sistemima upravljanja



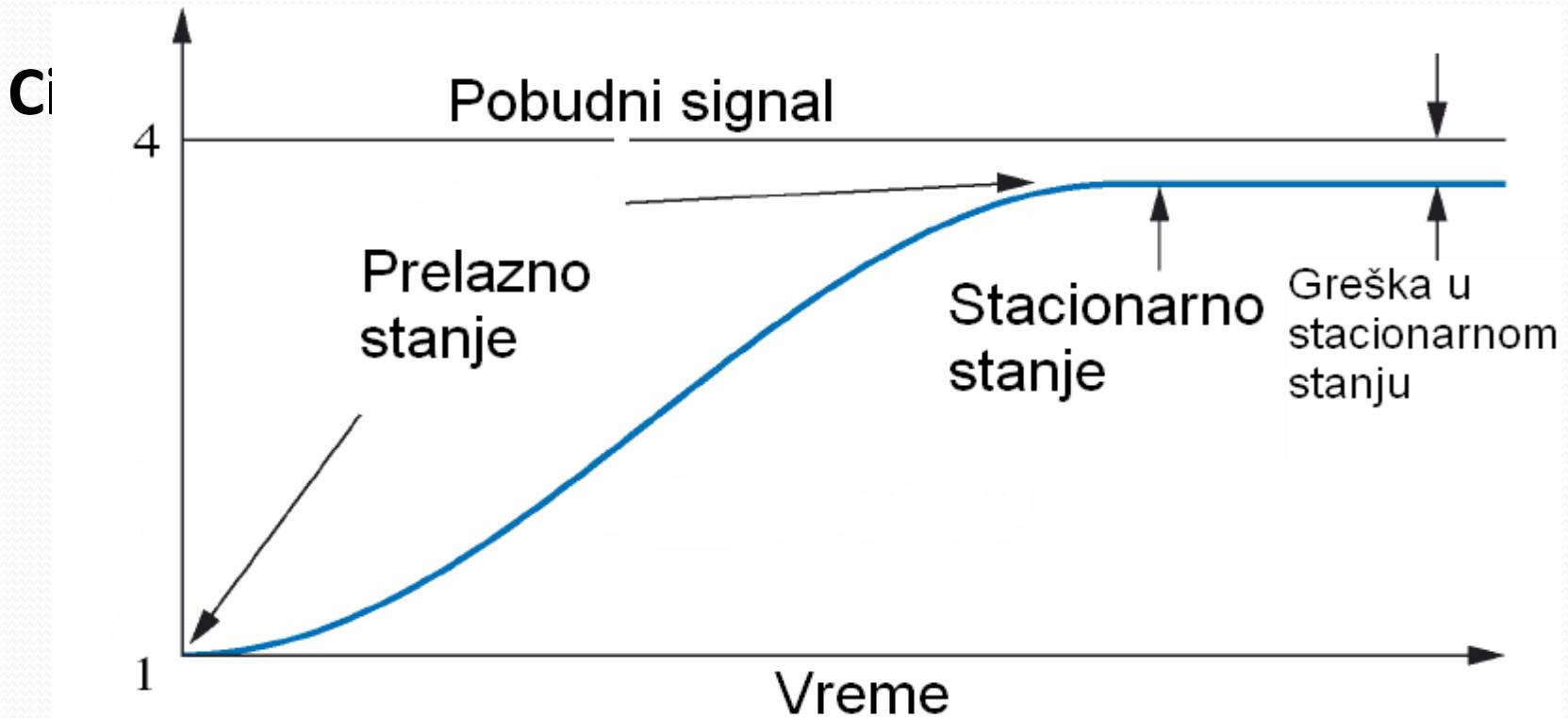
SAU su primarno podeljeni u dve klase

- a) ***Regulatori*** (cilj je održati fizičku varijablu nepromenjenu u prisustvu poremećaja)

Primer: kontrola broja obrtaja turbina u električnim centralama.

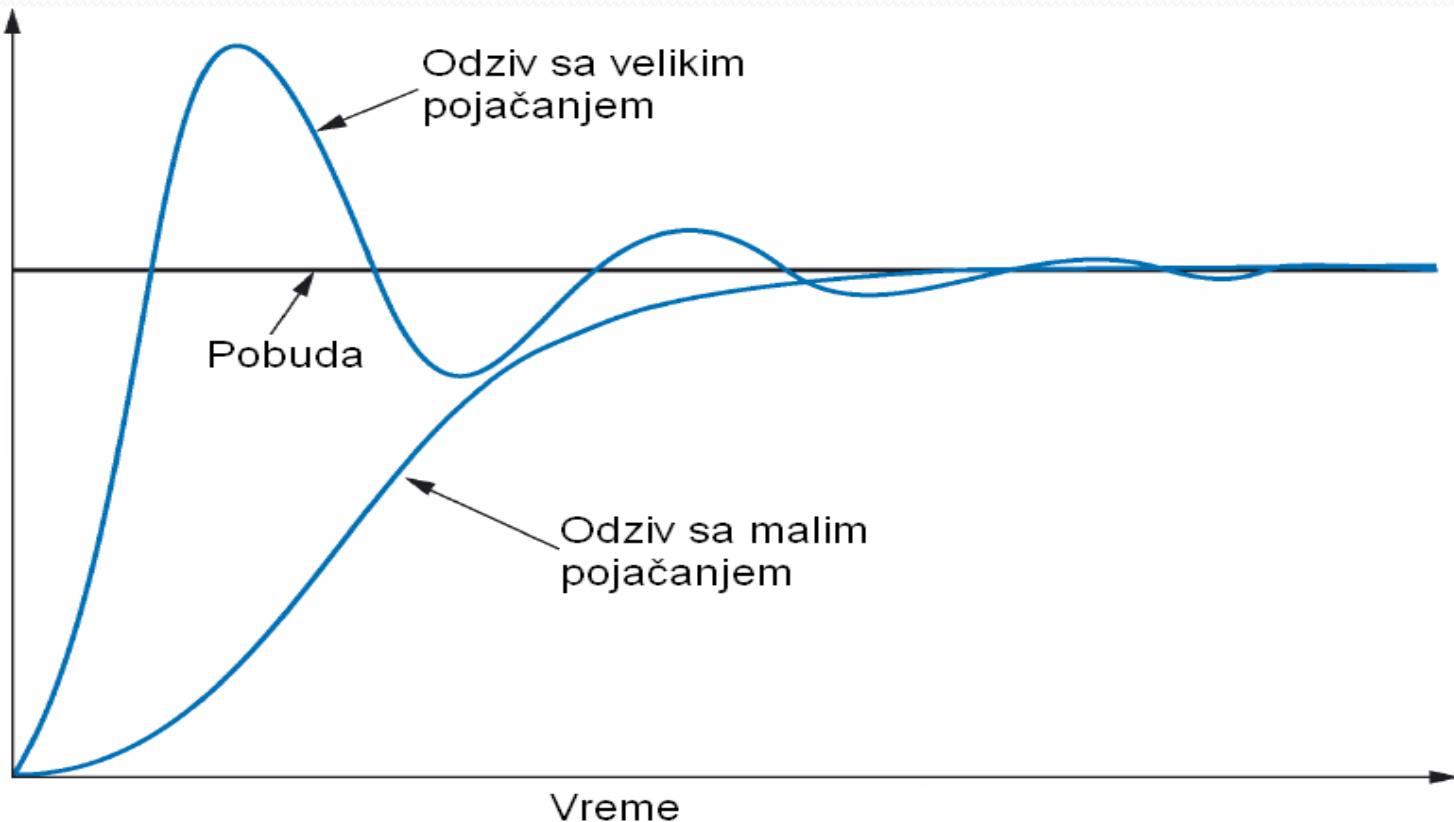
- b) ***Servomehanizmi***. Fizička varijabla sledi (prati) neku željenu vremensku funkciju.

Primer: sistem za automatsko sletanje aviona, ili ruka robota dizajnirana da sledi odgovarajuću putanju u prostu.



Zahtevana **stabilnost**, minimalna greška u stacionarnom stanju i oblik prelaznog odziva SAU

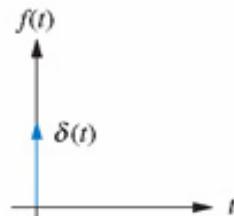
Mogući odziv SAU u zavisnosti od parametara regulatora



Najčešće korišćeni signali pri analizi SAU

$\delta(t)$

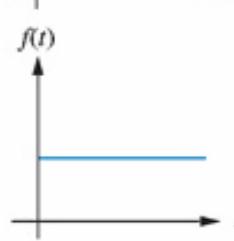
$$\begin{aligned}\delta(t) &= \infty \text{ for } 0- < t < 0+ \\ &= 0 \text{ elsewhere} \\ \int_{0-}^{0+} \delta(t) dt &= 1\end{aligned}$$



Prelazni odziv
Modeliranje

$u(t)$

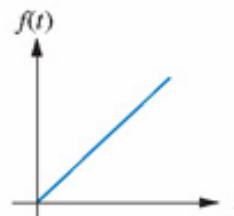
$$\begin{aligned}u(t) &= 1 \text{ for } t > 0 \\ &= 0 \text{ for } t < 0\end{aligned}$$



Prelazni
odziv
Greška u
st.stanju

$tu(t)$

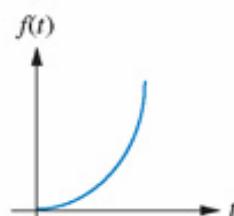
$$\begin{aligned}tu(t) &= t \text{ for } t \geq 0 \\ &= 0 \text{ elsewhere}\end{aligned}$$



Greška u st.
stanju

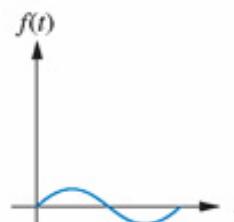
$\frac{1}{2}t^2u(t)$

$$\begin{aligned}\frac{1}{2}t^2u(t) &= \frac{1}{2}t^2 \text{ for } t \geq 0 \\ &= 0 \text{ elsewhere}\end{aligned}$$



Greška u st.
stanju

$\sin \omega t$



Prelazni odziv
Greška u st.
stanju
Modeliranje

Greška i karakteristične konstante u stacionarnom stanju

$$e(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} (sE(s))$$

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} (G(s))$$

Konstanta položaja

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} (sG(s))$$

Brzinska konstanta

$$K_a = \lim_{s \rightarrow 0} (s^2 G(s))$$

Konstanta ubrzanja

Zavisnost greške u stacionarnom stanju

Astatizam nultog reda	Step Pobuda	Ramp Pobuda	Parabolična Pobuda
Greška u stac.st. (Formula)	$1/(1+K_p)$	$1/K_v$	$1/K_a$
Veličina konstante	$K_p = \text{konačna}$	$K_v = 0$	$K_a = 0$
Veličina greške	$1/(1+K_p)$	beskonačno	beskonačno

Astatizam prvog reda	Step Pobuda	Ramp Pobuda	Parabolična Pobuda
Greška u stac.st. (Formula)	$1/(1+K_p)$	$1/K_v$	$1/K_a$
Veličina konstante	$K_p = \text{beskonačno}$	$K_v = \text{konačna}$	$K_a = 0$
Veličina greške	0	$1/K_v$	beskonačno

Astatizam drugog reda	Step Pobuda	Ramp Pobuda	Parabolična Pobuda
Greška u stac.st. (Formula)	$1/(1+K_p)$	$1/K_v$	$1/K_a$
Veličina konstante	$K_p = \text{beskonačno}$	$K_v = \text{beskonačno}$	$K_a = \text{konačna}$
Veličina greške	0	0	$1/K_a$

Statičke, dinamičke i prenosne karakteristike

Karakteristike elemenata:

- statičke
- dinamičke
- statističke

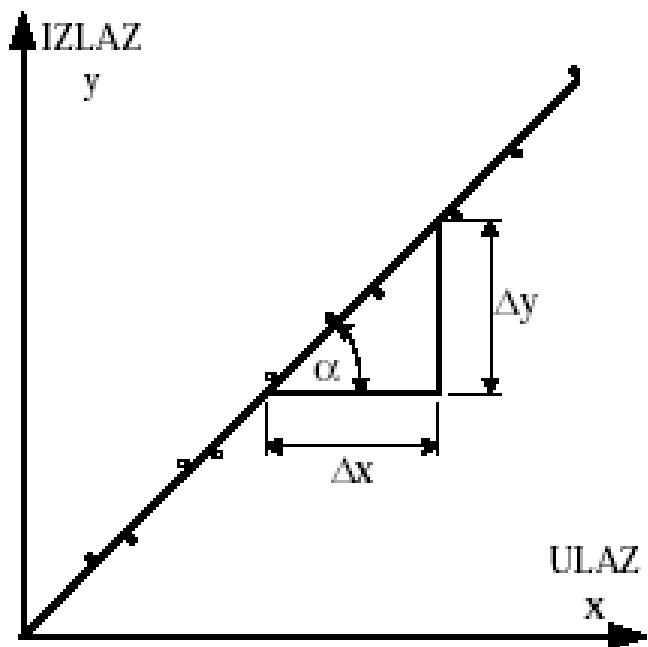
Statičke i dinamičke karakteristike se mogu egzaktno kvantifikovati matematički ili grafički.

Staticka karakteristika

- Statička karakteristika je odnos izlazne i ulazne veličine u stacionarnim uslovima

$$y = k \cdot x$$

Što podrazumeva da su sve dinamičke promene jednake nuli.



Koeficijent prenosa

$$k = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \tan \alpha$$

Za većinu fizičkih principa koji su našli svoju praktičnu primenu statička karakteristika se nalazi uz uslov da:

- Prateći efekti i efekti višeg reda nisu bitni;
- Merena, odnosno ulazna veličina ne zavisi od vremena;
- Vrednosti karakteristike dobijene za rastući interval ulazne veličine podudaraju se sa vrednostima karakteristike dobijene za opadajući interval.

Prethodni uslovi nisu sasvim
zadovoljeni,
pa realna staticka karakteristika
odstupa od idealne!!!!!!

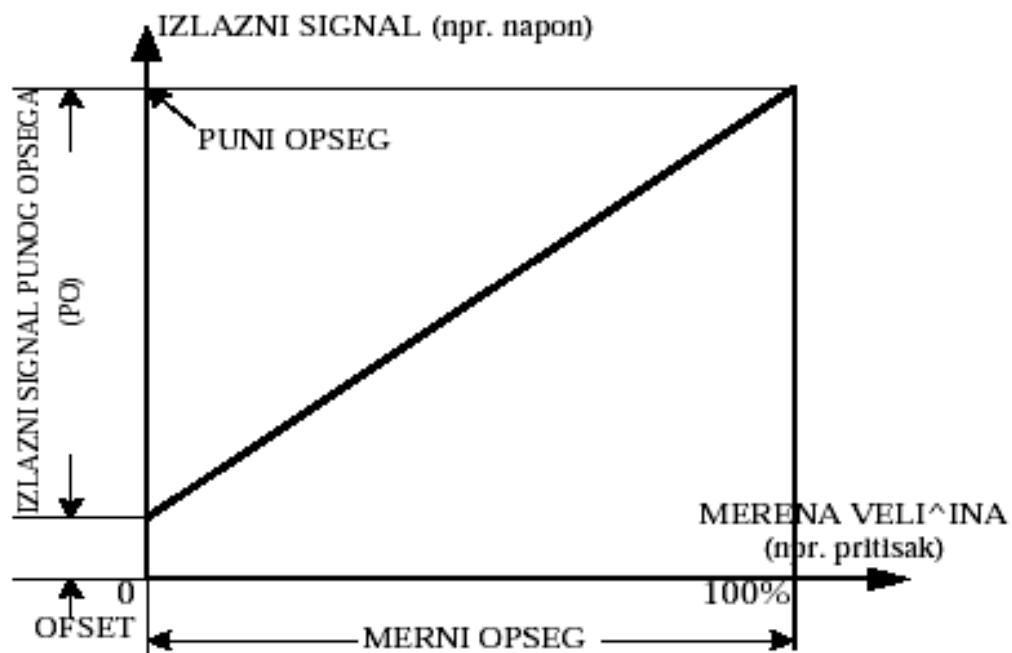
Parametri statičke karakteristike

- Merno područje (Range)
- Merni opseg
- Tačnost
- Linearnost
- Nelinearnost
- Osetljivost
- Histerezis
- Mrtva zona
- Zasićenje
- Rezolucija
- Habanje i starenje
- Radni vek

Merno područje (Range):

- Merno područje je skup podataka između dve određene vrednosti na skali.
- Primeri:
 - * Merno područje strujnog signala na izlazu iz mernog pretvarača je 4-20mA
 - * Merno područje senzora pritiska je 0-2obar
 - * Merno područje optičkog pirometra je 700-2000°C

Merni opseg izražava se kao algebarska razlika najveće i najmanje vrednosti na skali.



Merni opseg, izlazni signal punog opsega, offset

Primer 1:
termopar može
imati ulazno
područje
 $50\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$,
a izlazno $4\text{--}10\text{ mV}$.

- Ulazno područje se specificira s minimalnom i maksimalnom vrednošću merene veličine I : I_{min} i I_{max}
- Izlazno područje specificira se s minimalnom i maksimalnom vrednošću izlazne veličine O : O_{min} i O_{max}

Raspon (Span): maksimalna promena na ulazu ili izlazu,tj.:

ulazni raspon $I_{max} - I_{min}$ ($20 \log (I_{max} / I_{min})$)

izlazni raspon $O_{max} - O_{min}$

za primer 1: $I_{max} - I_{min} = 150^{\circ}C$

$O_{max} - O_{min} = 6 \text{ mV}$

Linearna statička karakteristika

$$O_{ideal} = K \cdot I + a$$

$$K = \frac{O_{max} - O_{min}}{I_{max} - I_{min}} \quad a = O_{min} - K I_{min}$$

Tačnost

Tačnost karakteriše sposobnost senzora da u određenim radnim uslovima daje pokazivanja bliska stvarnoj vrednosti merene veličine. Tačnost u potpunosti odražava osobine senzora u pogledu grešaka merenja.

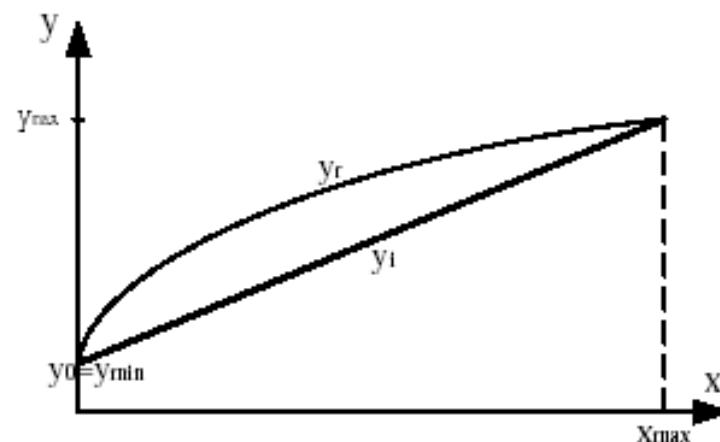
Tačnost se izražava u odnosu na neku određenu vrednost, najčešće u odnosu na merni opseg senzora. Ako je za senzor pritiska sa opsegom 0-10 bar deklarisana tačnost +1%, to znači da je maksimalna greška prilikom merenja bilo koje veličine unutar opsega 0,1 bar. Takva greška, međutim, za merenu vrednost od 1 bar iznosi 10% te vrednosti. Zbog toga je važno da se opseg senzora odabere adekvatno očekivanim promenama merene veličine, kako bi se što više očuvala tačnost senzora. Prema tome, ako se očekuje promena pritiska 0-1 bar, tada nije uputno upotrebiti senzor sa opsegom 0-10 bar.

Linearost

Linearost je podudarnost realne karakteristike y_r , i idealne statičke karakteristike y_i . U zavisnosti od toga kojim interpolacionim postupkom je određen idealni pravac, razlikuju se: nezavisna, nulta i terminalna linearost. Najčešće se primenjuje terminalna linearost, koja se računa kao

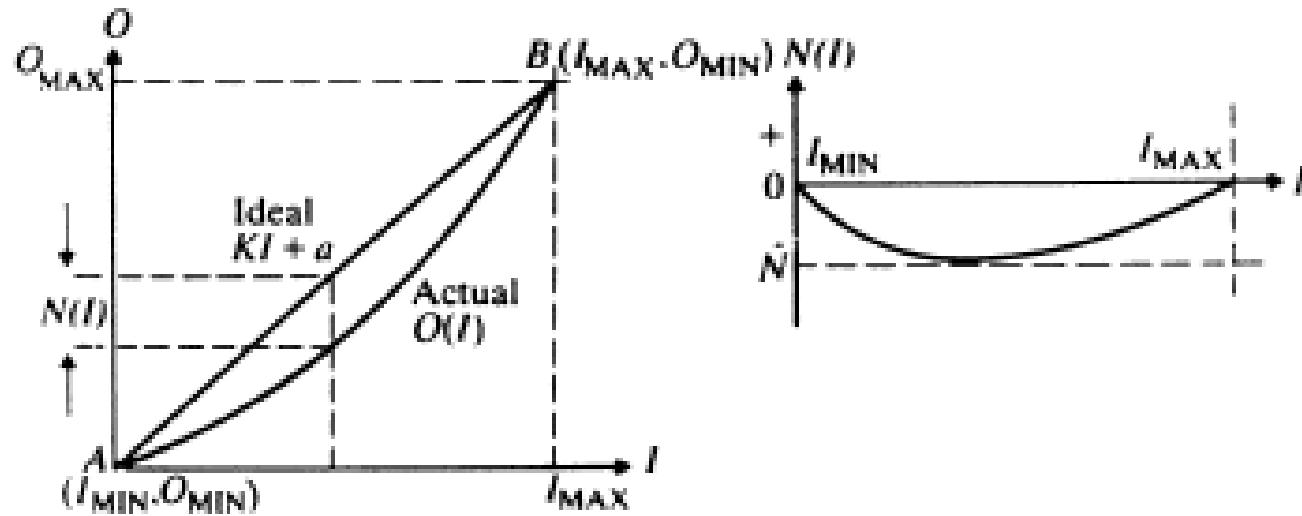
$$L = \frac{|y_r - y_i|_{\max}}{y_{\max} - y_{\min}} \cdot 100\%$$

gde je u brojiocu maksimalna razlika izmedju realne i idealne statičke karakteristike, a u imeniocu je razlika krajnjih (terminalnih) tačaka realne statičke karakteristike kroz koje je interpolirana idealna statička karakteristika



Terminalna linearost

Nelinearnost



$$O(I) = KI + a + N(I) \quad (*)$$

$$\hat{N} \doteq \text{maksimalna nelinearnost} \quad \hat{N} [\%] = \frac{\hat{N}}{O_{\text{MAX}} - O_{\text{MIN}}} \cdot 100$$

U mnogim se slučajevima $O(I)$ (a prema tome i $N(I)$) može izraziti u obliku polinoma (polinomska interpolacija, npr. termopar E(T)):

$$O(I) = a_0 + a_1 I + a_2 I^2 + \cdots + a_m I^m = \sum_{q=0}^{q=m} a_q I^q$$

Osetljivost

Osetljivost senzora odreduje se za datu vrednost merene veličine nakon dostignutog stacionarnog stanja kao odnos priraštaja izlazne veličine i priraštaja merene veličine:

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x},$$

S obzirom da je statička karakteristika senzora linearna, osetljivost je konstantna na celom opsegu, pa se može predstaviti kao odnos mernog opsega na izlazu i mernog opsega na ulazu. Osetljivost je, kao što se vidi iz jednačine jednaka nagibu statičke karakteristike. Na primer, ako pritisak od 5 bar daje na izlazu iz senzora 10 mA, tada je osetljivost 2 mA/bar.

Spoljni uslovi mogu imati presudan uticaj na rad komponenti (senzora, pretvarača...).

Oni uključuju: temperaturu, ubrzanje, vibraciju, potres, spoljni pritisak, vlažnost, korozivne materijale, elektromagnetsko polje....

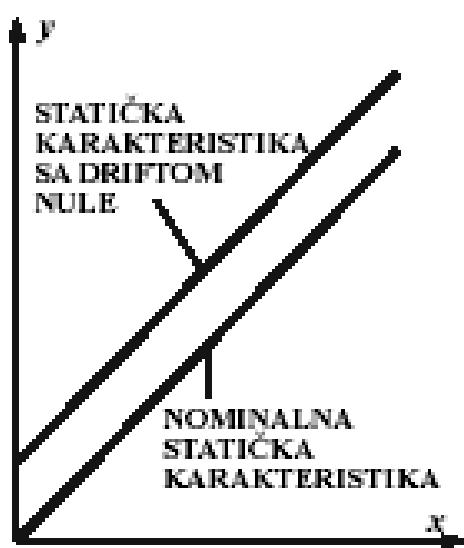
Osetljivost na poremećaje određuje uticaj spoljnih uslova, pre svega temperature, na staticku karakteristiku senzora.

Ovi uticaji najčešće se izražavaju kao *drift nule* i *drift osetljivosti*.

Drift je promena (nestabilnost) statičke karakteristike i, uopšte, metroloških parametara senzora koji se nalazi u uobičajenim uslovima upotrebe, u toku dužeg vremenskog perioda. Obično se izražava u procentima opsega.

Drift nule (offset) opisuje promene (nestabilnosti) očitavanja izlaza za nullu vrednost ulaznog signala koje nastaju delovanjem spoljnih faktora. Drift nule obično se izražava u jedinicama merene veličine po jedinici temperature, s obzirom da je temperatura dominantan spoljni uticaj. Efekat drifta nule odražava se na pomicanje statičke karakteristike duž ordinate.

Drift osetljivosti odreduje vrednost sa kojom se osetljivost senzora menja u zavisnosti od spoljnih uticaja. Efekat drifta osetljivosti odražava se kao promena nagiba statičke karakteristike. Drift osetljivosti izražava se kao (jedinica izlaza/jedinica ulaza) /°C.



a)



b)



c)

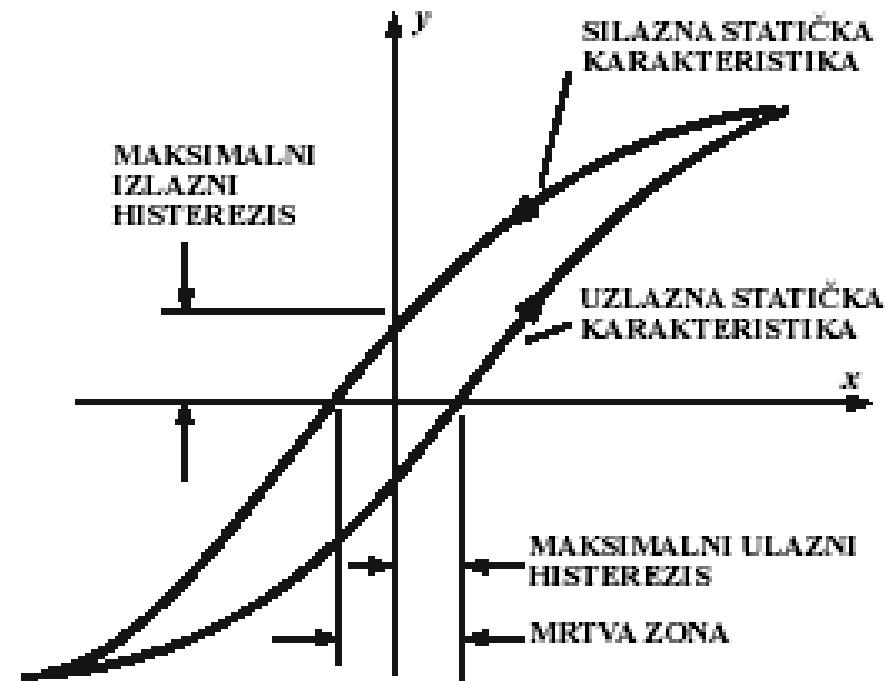
Nestabilnost statičke karakteristike: a) drift nule, b) drift osetljivosti, c) kombinovani drift

Histerezis

- Histerezisna greška je fenomen neslaganja statičke krive prenosa dobijene za rastuću sekvencu ulazne veličine i krive dobijene pri opadajućoj sekvenci.
- Histerezis je posebno prisutan kod elektromehaničkih senzora i izražava se u procentima punog opsega na sledeći način:

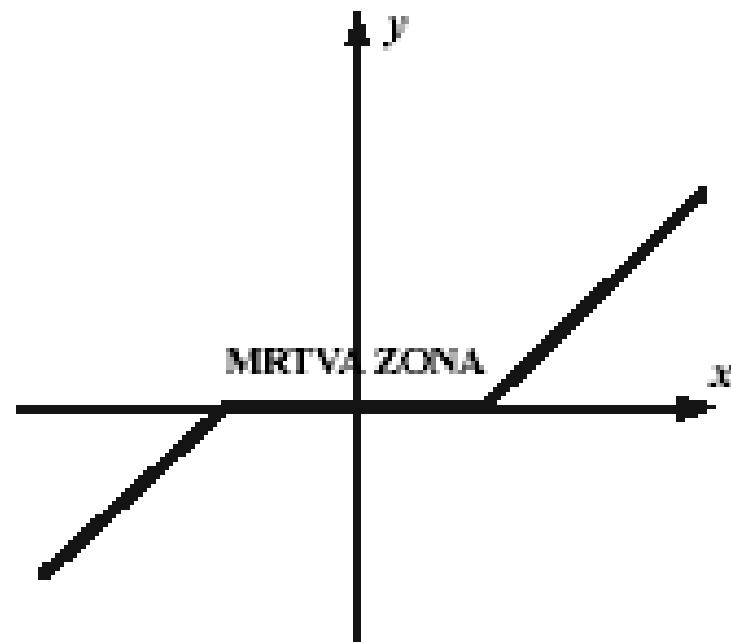
Na primer, senzor pomeraja, kada se objekt pomera od leve ka desnoj strani na određenoj tački, proizvodi napon koji se razlikuje za 20 mV od napona koji se proizvodi kada se objekt pomera od desne ka levoj strani. Ako je osteljivost senzora 10 mV/mm, histerezisna greška, izražena u pomeranju, iznosi 2 mm. Tipični uzroci ove greške su neslaganje i strukturne promene u materijalima.

$$H = \frac{|y_2 - y_1|_{\max}}{y_{\max} - y_{\min}} 100\%$$

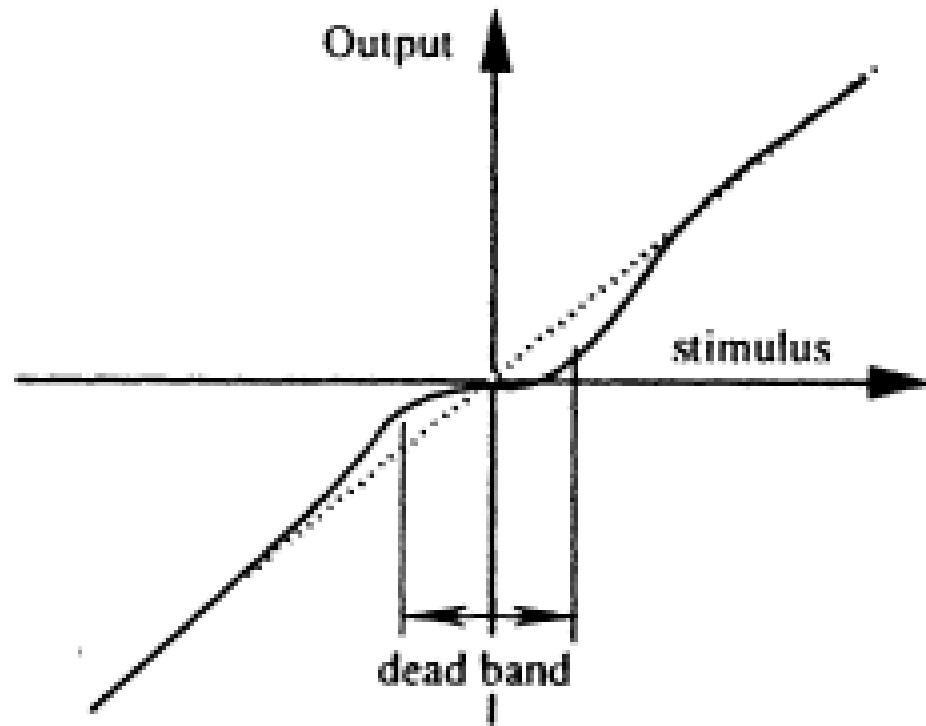


Mrtva zona

- Mrtvi opseg predstavlja neosetljivost senzora na specifičan opseg ulaznih signala. U tom opsegu, izlaz može postojati u blizini određene vrednosti (najčešće je to nula).
- Histerezis je uvek praćena mrtvom zonom, ali se mrtva zona pojavljuje i kao zaseban efekat.

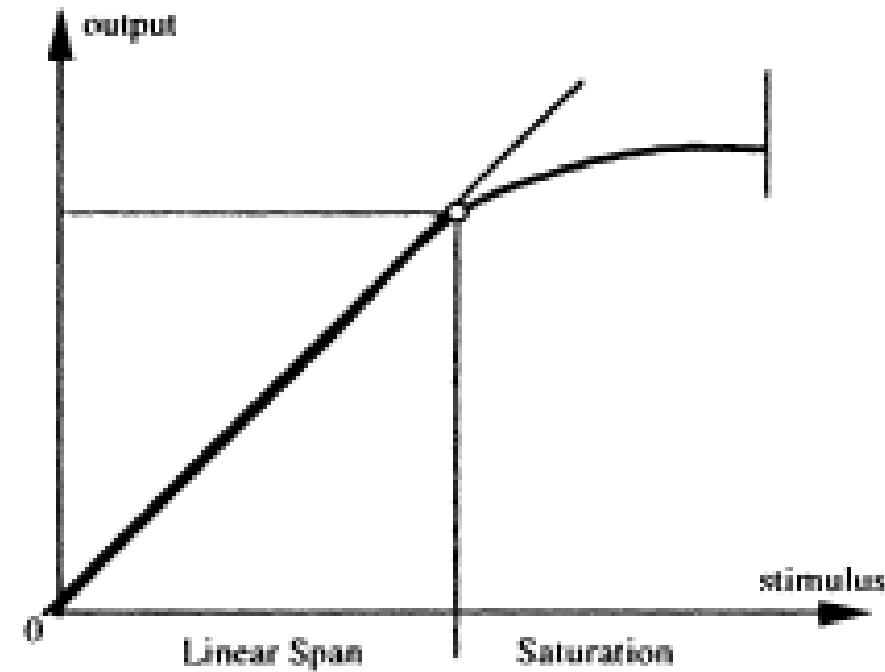


Zona neosjetljivosti (Dead-Band)

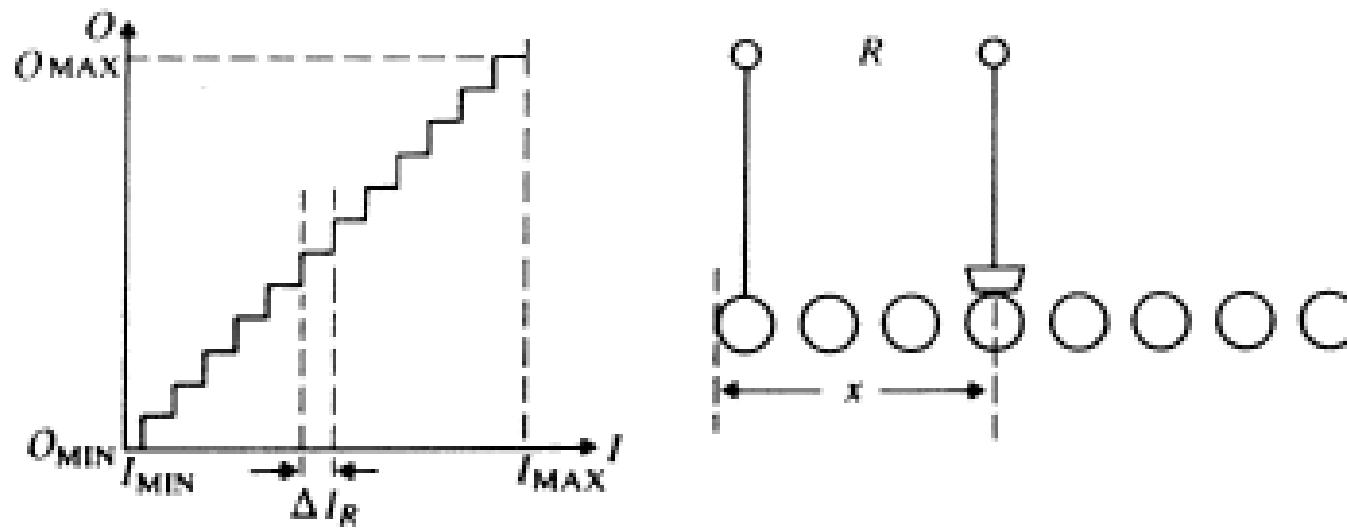


Zasićenje

- Svaki senzor ima svoj radni vek. Čak i kada senzor ima linearnu karakteristiku, pri nekim ulaznim vrednostima, senzor neće imati odziv na izlazu. Dalje povećanje ulaznog stimulusa neće proizvesti željeni izlaz. Ovo je rečeno zbog toga što senzor, na kraju svog opsega, prikazuje nelinearnost ili zasićenje.



Rezolucija opisuje najmanju, inkrementalnu, ulaznu vrednost ulaza koja se može detektovati. Kada ulazni stimulus kontinualno varira duž opsega, izlazni signali nekih senzora neće biti savršeno ravni, čak i u uslovima kada nema šuma. Izlaz se menja u malim koracima. Svaki signal konvertovan u digitalni format je razbijen u male korake, gde je broj dodeljen svakom koraku. Rezolucija senzora, sa digitalnim izlaznim formatom, se predstavlja preko bita. Na primer, rezolucija može biti 8-bitna rezolucija.



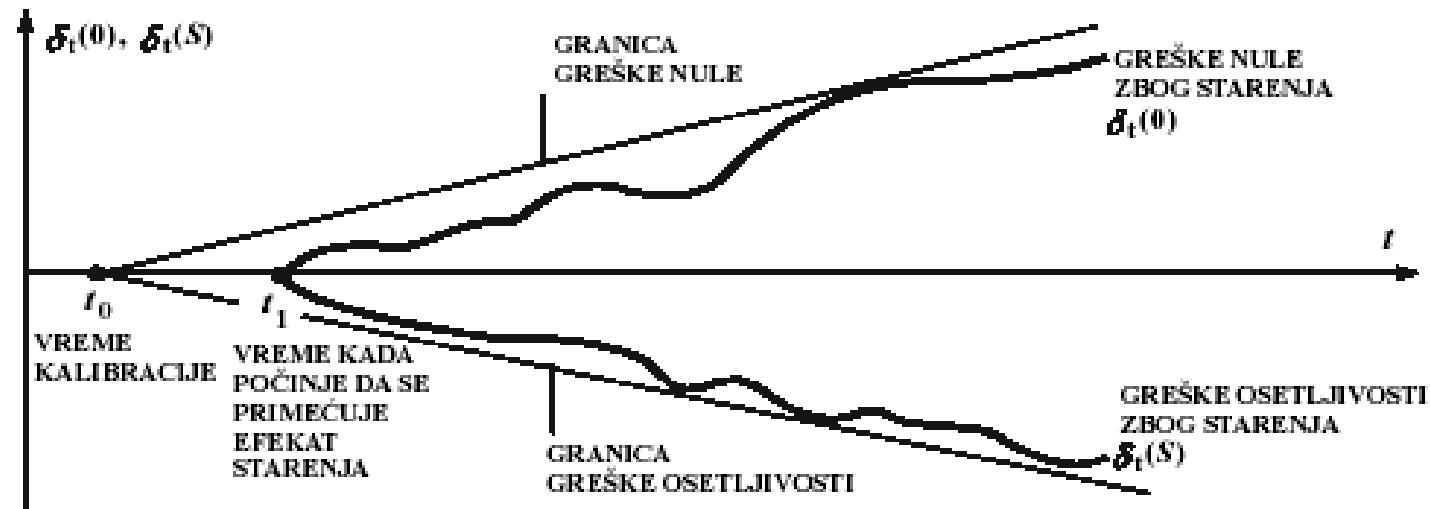
$$R [\%] = \frac{\Delta I_R}{O_{MAX} - O_{MIN}} \cdot 100$$

žičani potenciometar , A/D konverzija

Habanje i staranje

Ovi efekti uzrokuju promenu karakteristika lagano i sistematski tokom životnog veka elementa.

PR.: promena konstante krutosti opruge, promjena konstanti u termoparu (zbog hemijskih promjena u metalu termopara).



Relativna promena nule i osetljivosti senzora zbog starenja

Radni vek

- Radni vek je minimalna dužina vremena za koji će neki element raditi, bilo trajno ili preko odreženog broja ciklusa uključenja-isključenja čije trajanje je određeno, bez promena karakterističnih parametara posmatranog elementa izvan odreženih tolerancija.

Dinamičke karakteristike

Kada je merni element deo sistema upravljanja najčešće ga nije dovoljno opisati njegovom statičkom karakteristikom, već je neophodno uzeti i njegove dinamičke karakteristike.

Ako senzor ne daje trenutni odziv, on može pokazivati vrednosti ulaznog stimulusa koje se donekle razlikuju od pravih vrednosti, što predstavlja odziv senzora sa dinamičkom greškom. Razlika između statičke i dinamičke greške je ta što je dinamička greška uvek vremenski zavisna.

Vreme od priključenja na napajanje do trenutka spremnosti mernog elementa za rad sa deklarisanim karakteristikama naziva se **vreme zagrevanja** (warm-up time) ili **vreme pripreme**.

- U teoriji sistema za kontrolu, uobičajeno je da se odnos, ulaz-izlaz, opiše preko koeficijenata linearne diferencijalne jednačine.
- Onda se, dinamičke (vremenski zavisne) karakteristike senzora mogu proučavati izračunavanjem takve jednačine. Zavisno od senzora, diferencijalne jednačine mogu biti različitog reda.

Najčešće korišćeni signali pri analizi

$\delta(t)$

$$\begin{aligned}\delta(t) &= \infty \text{ for } 0- < t < 0+ \\ &= 0 \text{ elsewhere} \\ \int_{0-}^{0+} \delta(t) dt &= 1\end{aligned}$$

$u(t)$

$$\begin{aligned}u(t) &= 1 \text{ for } t > 0 \\ &= 0 \text{ for } t < 0\end{aligned}$$

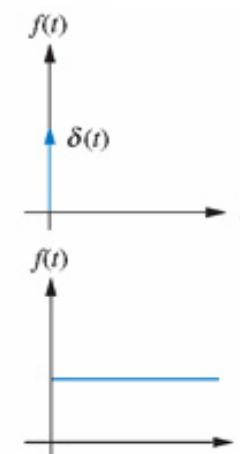
$tu(t)$

$$\begin{aligned}tu(t) &= t \text{ for } t \geq 0 \\ &= 0 \text{ elsewhere}\end{aligned}$$

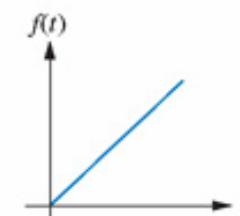
$\frac{1}{2}t^2u(t)$

$$\begin{aligned}\frac{1}{2}t^2u(t) &= \frac{1}{2}t^2 \text{ for } t \geq 0 \\ &= 0 \text{ elsewhere}\end{aligned}$$

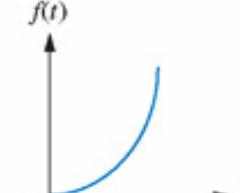
$\sin \omega t$



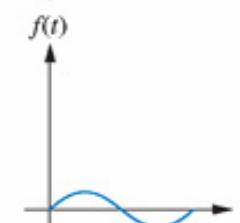
Prelazni odziv
Modeliranje



Prelazni
odziv
Greška u
st. stanju



Greška u st.
stanju



Prelazni odziv
Greška u st.
stanju
Modeliranje

Odziv senzora nultog reda

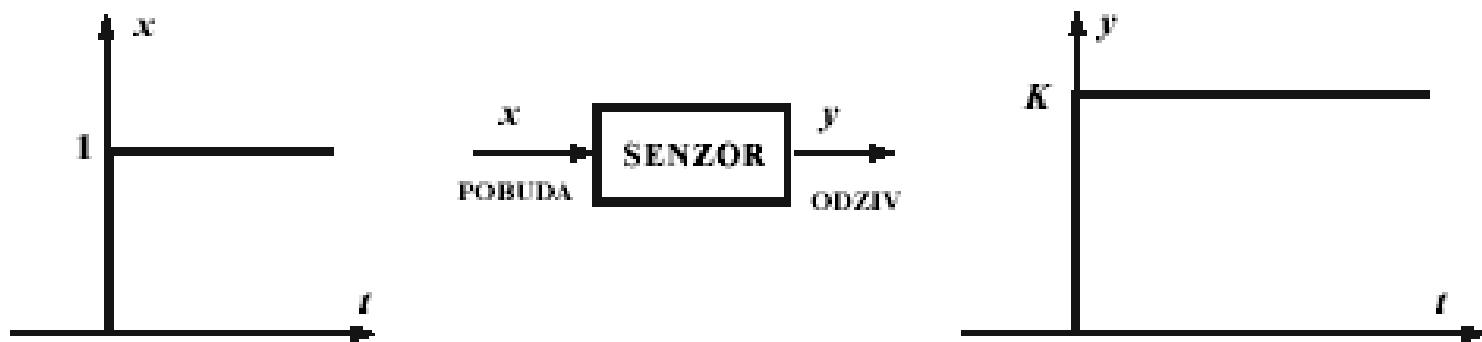
- Senzor nultog reda je okarakterisan odnosom koji, za linearnu prenosnu funkciju, gde su ulaz i izlaz u funkciji od vremena t dat kao:

$$y(t) = kx(t)$$

$$k = \frac{b_0}{a_0}$$

- Koeficijent pojačanja sistema nultog reda i jednak je osetljivosti

- Sistem nultog reda je bezinercioni sistem, jer izlaz prati ulaz bez ikakvog kašnjenja.
- primer: potenciometarski detektor pomaka



Odziv senzora kao sistema nultog reda na skokovitu promenu merene veličine

Odziv senzora kao sistema prvog reda

- Realni senzor uvek ima neku inerciju

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t)$$

$$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t)$$

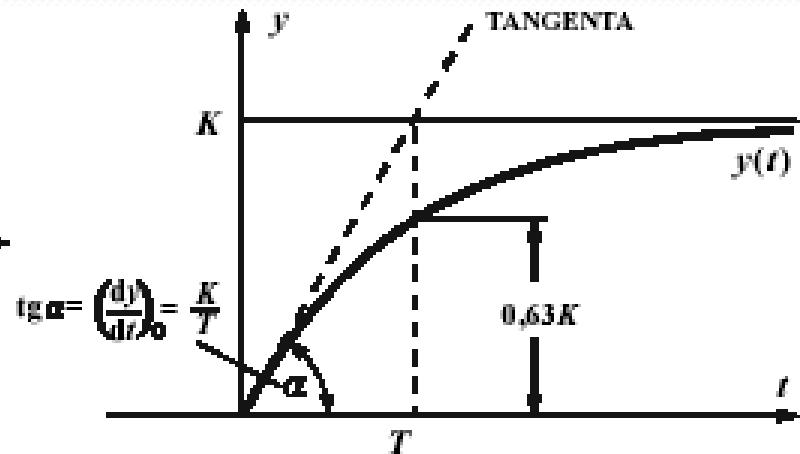
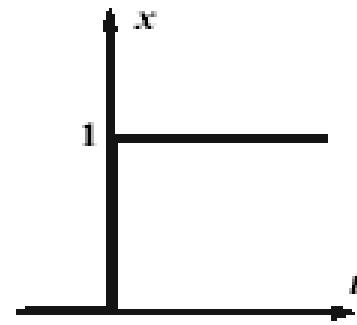
$$T = \frac{a_1}{a_0}$$

-Vremenska konstanta

$$k = \frac{b_0}{a_0}$$

-Koeficijent pojačanja ili statičkog prenosa (osetljivost)

- Uobičajeno je da se koristi senzor koji ima vremensku konstantu bar za jedan red manju od vremenske konstante objekta upravljanja.



Odziv senzora kao sistema prvog reda na skokovitu promenu merene veličine

Odziv senzora kao sistema drugog reda

$$a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t)$$

$$T^2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2\xi T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t)$$

$$T = \frac{a_1}{a_0}$$

-Vremenska konstanta

$$k = \frac{b_0}{a_0}$$

-Koeficijent pojačanja ili statičkog prenosa (osetljivost)

$$\xi = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 a_2}}$$

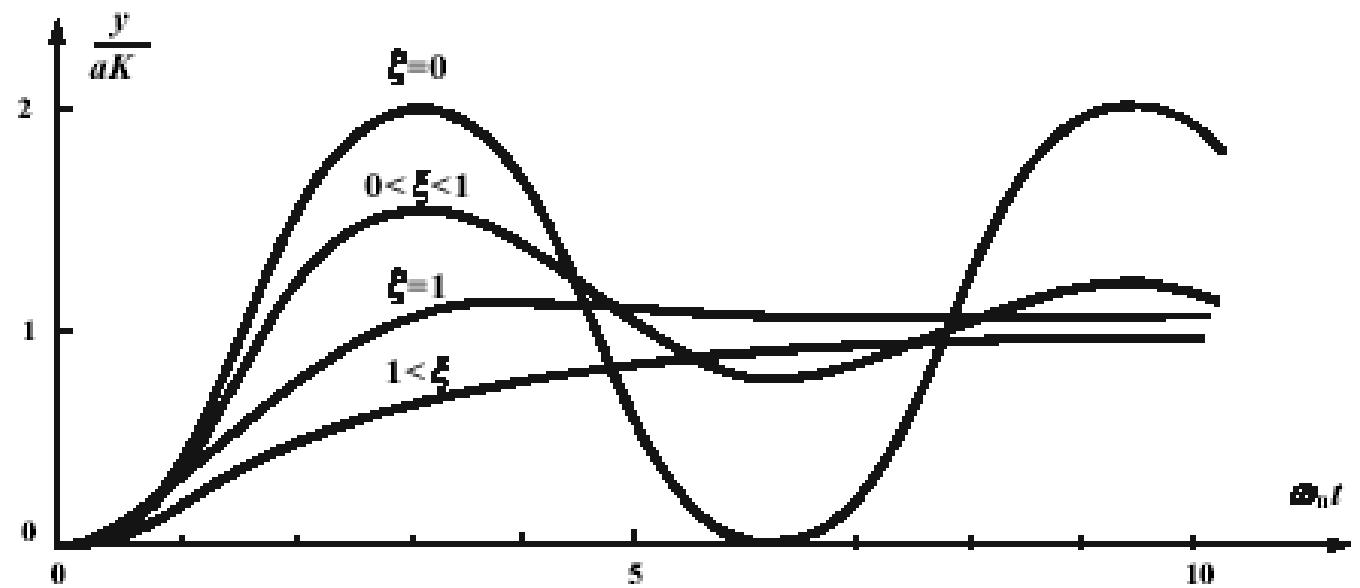
-Koeficijent prigušenja

$\xi = 0$ Oscilatorno neprigušeni ili harmonijski odziv

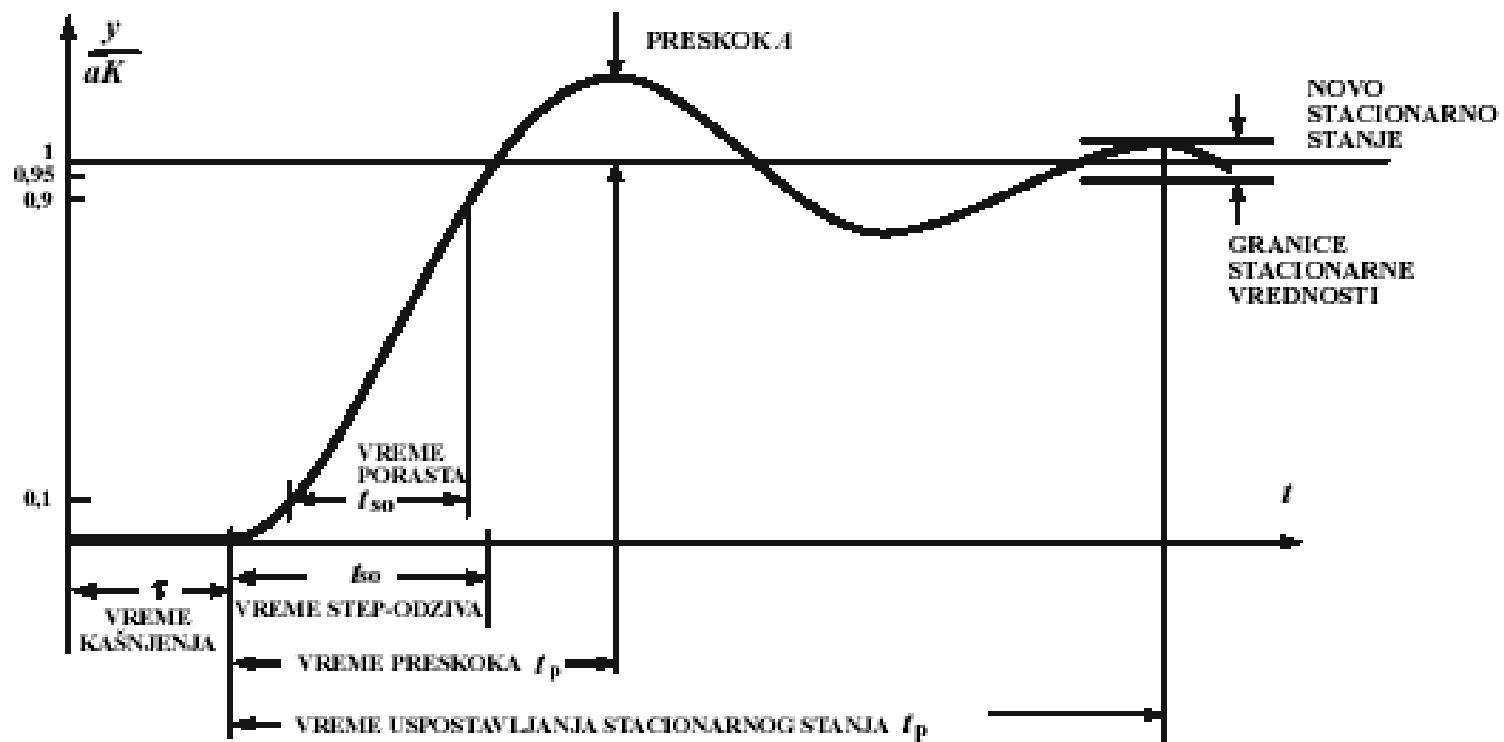
$0 < \xi < 1$ Oscilatorno prigušeni ili potprigušeni odziv

$\xi = 1$ Kritički prigušeni odziv

$1 < \xi$ Natratički prigušeni ili aperiodski odziv



Odziv senzora kao sistema drugog reda na skokovitu promenu ulaza $x(t) = 1(t)$



Parametri dinamičkog odziva senzora kao sistema drugog reda

Vreme kašnjenja τ ili mrtvo vreme je vreme koje protekne od trenutka kada se desi skokovita promena na ulazu pa do trenutka kada se indicira izlaz.

Vreme uspona (porasta) t_u definiše se kao vreme potrebno da se izlaz promeni od 10% do 90% novog stacionarnog stanja, i to pre pojave prvog preskoka.

Vreme uspostavljanja stacionarnog stanja t_s ili vreme smirivanja određuje se kao vreme od trenutka kada se izlaz indicira pa do trenutka kada izlaz dospe unutar definisanih granica do $\pm 5\%$ konačne stacionarne vrednosti.

Vreme step-odziva t_{s_0} određuje se iz odziva senzora na skokovitu promenu ulaza kao vreme potrebno da izlaz dostigne 95–99% novog stacionarnog stanja, i to pre pojave prvog preskoka.

Dominantna vremenska konstanta T definiše se kao vreme potrebno da ovojnica amplituda prelaznog procesa opadne na 37% svoje početne vrednosti.

Koeficijent statičkog pojačanja K određuje se nakon jedinične skokovite promene ulaza kao razlika između novog i starog stacionarnog stanja.

Preskok A je maksimalno nadvišenje konačnog stacionarnog stanja, kada je na ulazu bila skokovita promena u iznosu punog ulaznog opsega. Zato se preskok, bilo prvi ili drugi, daje u procentima izlaznog opsega.

Vreme preskoka t_p je vreme potrebno da odziv dostigne prvi preskok.

Period oscilacija T_p je vremenski razmak između dva susedna maksimuma.

Prenosne funkcije (funkcije prenosa)

$$G(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = k$$

Prenosna funkcija senzora kao sistema **nullog reda**

$$G(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{k}{Ts + 1}$$

Prenosna funkcija senzora kao sistema **prvog reda**

$$G(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{k}{T^2 s^2 + 2\xi T s + 1}$$

Prenosna funkcija senzora kao sistema **drugog reda**

Dinamičke karakteristike u frekventnoj oblasti

Dinamička svojstva senzora često se prikazuju u frekventnoj oblasti pomoću funkcija frekventnog odziva. Ove funkcije opisuju zavisnost amplitude i faze sinusne prenosne funkcije od frekvencije ulaznog harmonijskog signala. Sinusna prenosna funkcija $G(j\omega)$ dobija se iz prenosne funkcije $G(s)$ zamenom operatora s operatorom $j\omega$. Osnova za istraživanje frekventnog odziva je sinusno promenljivi signal:

$$x(t) = A \sin \omega t,$$

koji se dovodi na ulaz senzora, zbog čega realni deo kompleksne promenljive s i jeste jednak nuli, tj. $s = j\omega$.

Izlaz će takođe biti sinusni signal iste frekvencije, ali neke druge amplitude B i sa faznim kašnjenjem ϕ u odnosu na ulaz:

$$y(t) = B \sin (\omega t + \phi).$$

Odnos ova dva harmonijska signala predstavljena u kompleksnom obliku je frekventni odziv ili sinusna prenosna funkcija:

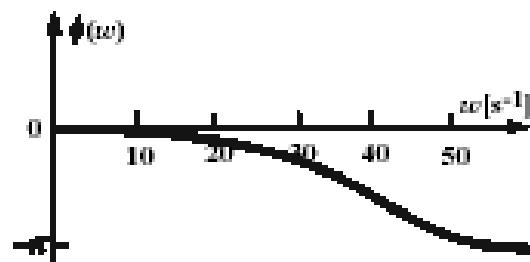
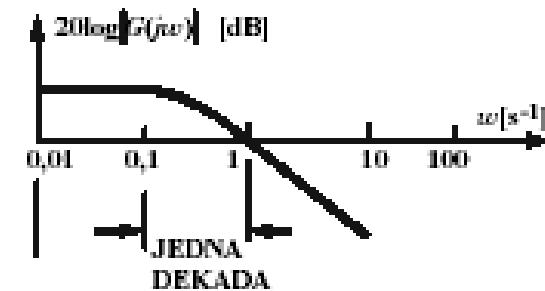
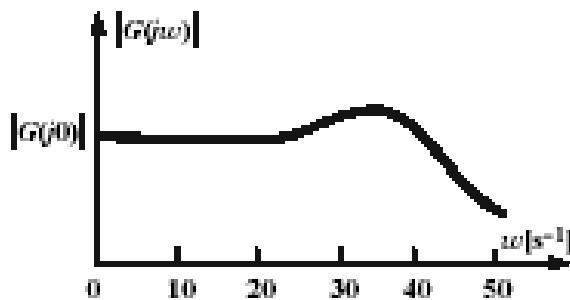
$$\frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = G(j\omega) = |G(j\omega)| e^{j\phi(\omega)} .$$

Funkcije frekventnog odziva su amplitudno-frekventna karakteristika, koja predstavlja zavisnost amplitude $|G(j\omega)|$ od frekvencije, i fazno-frekventna karakteristika, tj. zavisnost faze $\phi(\omega)$ od frekvencije ω ulaznog signala. Ove karakteristike mogu se iskazati pomoću realnog i imaginarnog dela funkcije frekventnog odziva:

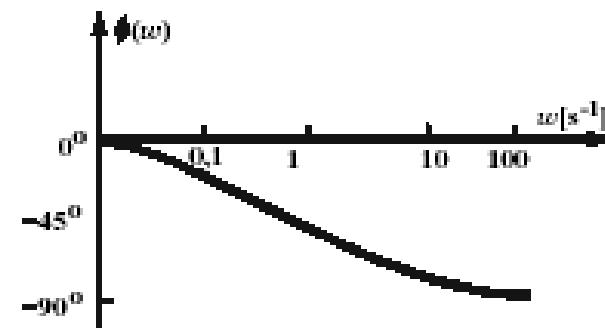
$$|G(j\omega)| = \sqrt{\operatorname{Re} G(j\omega)^2 + \operatorname{Im} G(j\omega)^2} ,$$

$$\phi(\omega) = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\operatorname{Im} G(j\omega)}{\operatorname{Re} G(j\omega)} .$$

Grafički prikaz frekventnih karakteristika



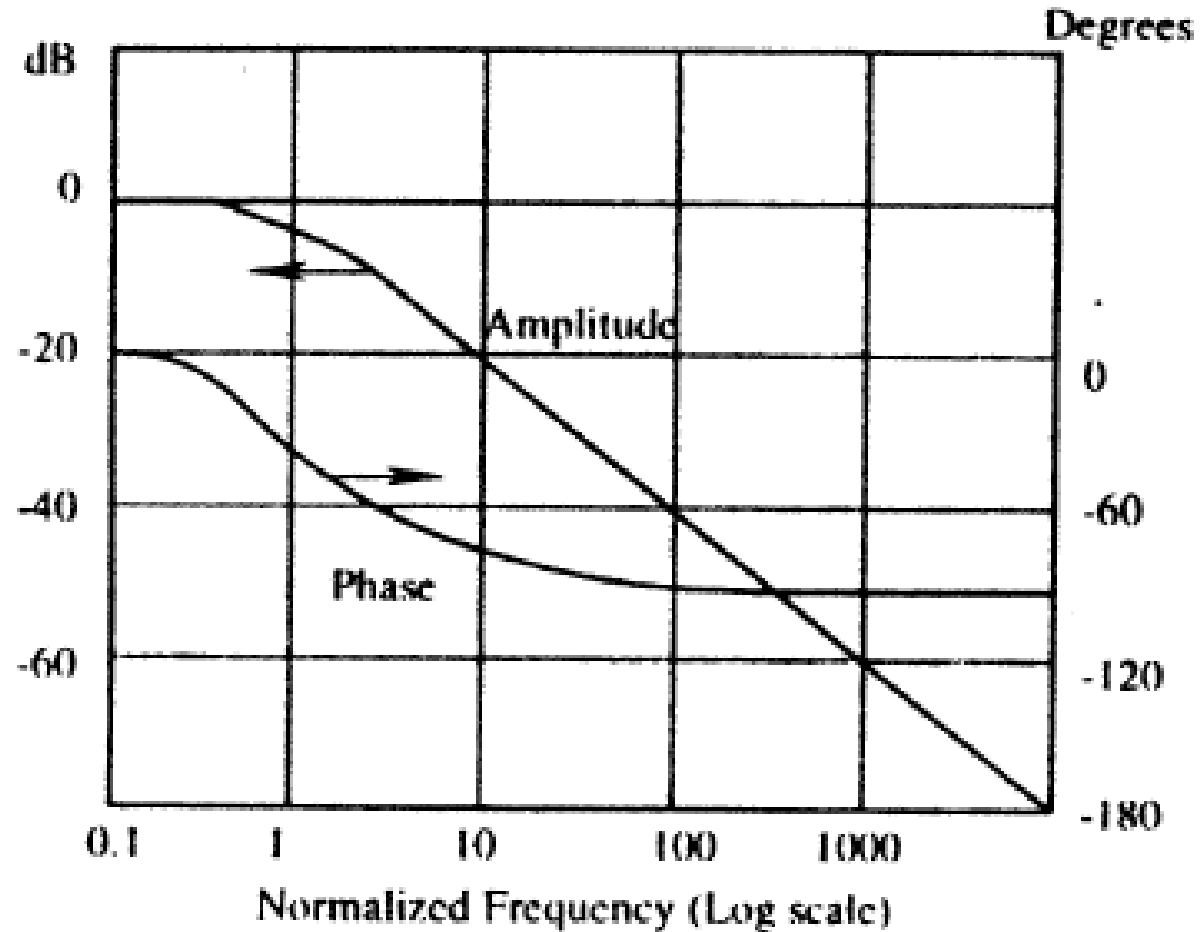
a)



b)

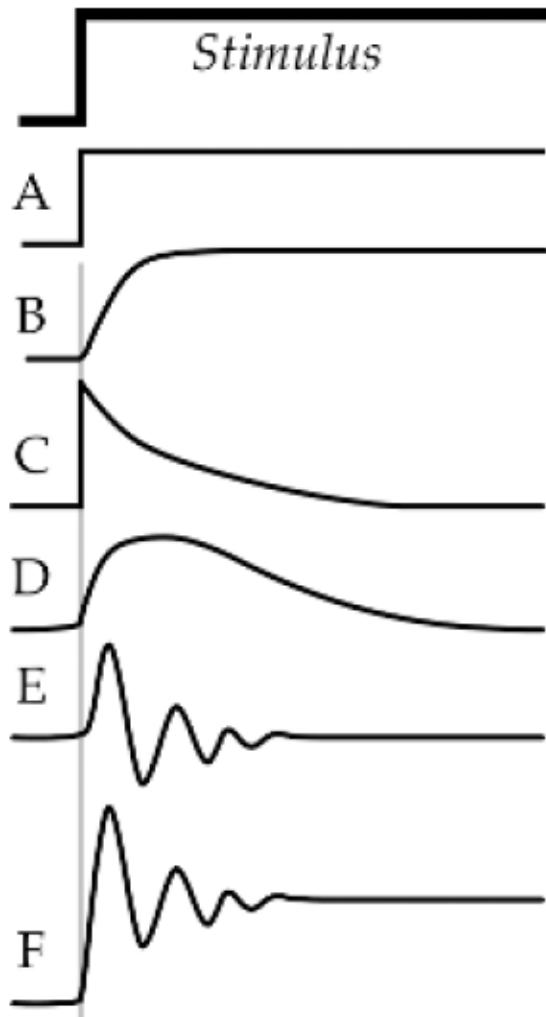
*Frekventne karakteristike senzora: a) sa linearном razmerom na apscisi,
b) Bodeov prikaz*

Frekvenčijski odziv (Frequency response) pokazuje brzinu odziva mernog elementa na promenu merene veličine. Izražava se u jedinicama Hz ili rad/sec.



Gornja granična frekvencija (upper cutoff frequency) definisana je kao frekvencija na kojoj normirana amplitudna frekvenčijska karakteristika mernog elementa poprimi vrednost -3 dB.

Tipični odzivi senzora na odskočnu promjenu merene veličine:

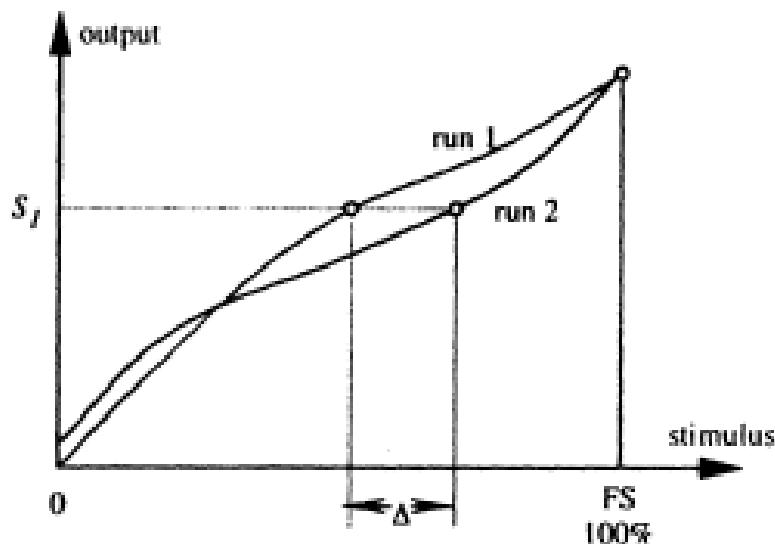


- Tipovi odziva: (A) neograničena gornja i donja frekvencija;
(B) odziv prvog reda ograničen sa gornjom graničnom frekvencijom;
(C) odziv prvog reda ograničen sa donjom graničnom frekvencijom;
(D) odziv prvog reda ograničen i sa donjom i sa gornjom graničnom frekvencijom;
(E) odziv ograničenog opsega (rezonanca);
(F) odziv šireg opseg sa rezonancom.*

Statističke karakteristike

Ponovljivost mjerenja – preciznost senzora

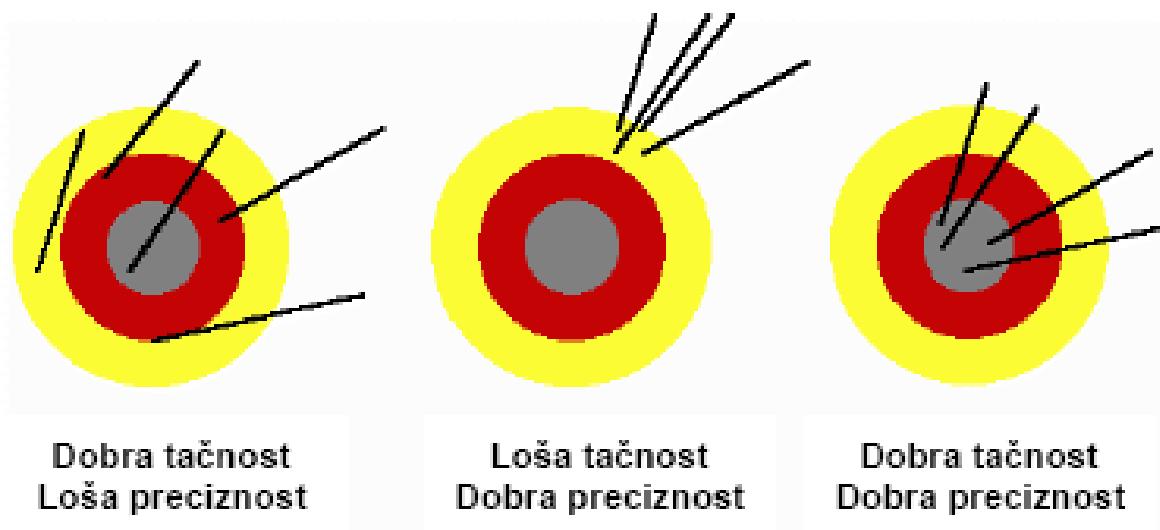
Statističke promene na izlazu mernoga elementa sa vremenom – ponovljivost (repeatability).



- Uz konstantni ulaz mjernoga člana izlaz s vremenom varira. Nije ostvarena ponovljivost.
- Greška ponovljivosti definiše se kao:

$$\delta_r = \frac{\Delta}{FS} 100\%$$

- Izostanak ponovljivosti uzrokovani je slučajnim efektima u mjernom članu (npr. topotni šum, plastičnost materijala) i u okolini mjernoga člana.
- Ako ambijentalni ulazi I_M i I_I slučajno variraju, tada će slučajno varirati i izlaz O (temperatura, vlažnost; napon napajanja).
- Ponovljivošću mjerjenja definše se **preciznost senzora**. Važno je uočiti razliku između tačnosti i preciznosti, koja je ilustrovana na sljedećoj slici:



- Najvjerojatnija funkcija gustine vjerojatnoce za I , I_M , I_I je normalna (Gaussova) funkcija raspodjele:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}$$

gdje je:

\bar{x} - očekivana vrijednost (centar raspodjele)

σ - standardno rasipanje (devijacija)

- Iz prethodnih je izlaganja uočljivo da je O funkcija od I , I_M , I_I . Za male promjene O oko srednje vrijednosti \bar{O} , uslovljene promjenama ΔI , ΔI_M , ΔI_I oko odgovarajućih srednjih vrijednosti \bar{I} , \bar{I}_M i \bar{I}_I , slijedi:

$$\Delta O = \left(\frac{\partial O}{\partial I} \right) \Delta I + \left(\frac{\partial O}{\partial I_M} \right) \Delta I_M + \left(\frac{\partial O}{\partial I_I} \right) \Delta I_I, \quad (\text{A-1})$$

tj. ΔO je linearna kombinacija varijabli ΔI , ΔI_M i ΔI_I .

- Pokazuje se, ako je zavisna varijabla (funkcija) y linearna kombinacija nezavisnih varijabli x_1, x_2 i x_3 , tj.:

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3$$

i ako x_1, x_2 i x_3 podliježu Gaussovoj raspodjeli sa standardnim rasipanjima σ_1, σ_2 i σ_3 , tada je vjerojatnost raspodjele od y također Gaussova raspodjela sa standardnim rasipanjem:

$$\sigma = \sqrt{a_1^2\sigma_1^2 + a_2^2\sigma_2^2 + a_3^2\sigma_3^2} \quad (\text{A-2})$$

- Iz izraza (A-1) i (A-2) dobije se da je standardno rasipanje od $\Delta O = (O - \bar{O})$:

$$\sigma_o = \sqrt{\left(\frac{\partial O}{\partial I}\right)^2 \sigma_I^2 + \left(\frac{\partial O}{\partial I_M}\right)^2 \sigma_{I_M}^2 + \left(\frac{\partial O}{\partial I_L}\right)^2 \sigma_{I_L}^2}$$

Dakle, σ_o se može odrediti ako je poznato σ_I, σ_{I_M} i σ_{I_L} .

σ_o se može odrediti i eksperimentalno pomoću testa umjeravanja, tj.:

$$p(O) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_o^2}} e^{-\frac{(O-\bar{O})^2}{2\sigma_o^2}}$$

gdje je $\bar{O} = K\bar{I} + a + N(\bar{I}) + K_M\bar{I}_M\bar{I} + K_L\bar{I}_L$ – očekivana vrijednost izlaza.

Merna nesigurnost

- Kako je već rečeno, merna je vrednost samo aproksimacija stvarne vrednosti merene veličine, bez obzira kolika je tačnost merenja.
- Dakle, rezultat merenja može se smatrati celovitim tek ako mu je pridružena vrednost merne nesigurnosti.
- Prema propisima međunarodnog komiteta CIPM (Committee for Weights and Measures), mernoj nesigurnosti doprinose mnogobrojni činioci, ali se mogu grupisati u dva skupa:
 - A: činioci koji se procenjuju statističkim metodama;
 - B: činioci koji se procenjuju drugim metodama.

- Granica između ove dve grupe nije potpuno jasna. Uopšteno, komponente A merne nesigurnosti proizlaze iz slučajnih efekata, a komponente B merne nesigurnosti iz sistemskih efekata.
- Nesigurnost tipa A specificira se standardnim rasipanjem - σ . Za i-tu komponentu mjerne nesigurnosti tipa A merna nesigurnost $u_i = \sigma_i$.
- Procena nesigurnosti tipa B obično se zasniva na naučnim procenama na temelju svih dostupnih relevantnih informacija, npr. na temelju:
 - ◆ prošlih mernih vrijednosti,
 - ◆ iskustva s odgovarajućim senzorom ili opšteg poznavanja svojstava i ponašja senzora, materijala, instrumentacije;
 - ◆ specifikacija proizvođača,
 - ◆ podataka dobijenim umeravanjem senzora te
 - ◆ nesigurnosti pridruženih referentnim podacima iz priručnika.

- Kada se načini procena oba tipa nesigurnosti, one se trebaju združiti u **kombinovanu standardnu nesigurnost** (engl. combined standard unceartinity), što se čini prema tzv. zakonu propagacije nesigurnosti (engl. law of propagation of uncertainty):

$$u_C = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_i^2 + \dots + u_n^2}$$

gdje je n broj komponenata merne nesigurnosti.

Primjer: Mjerna nesigurnost elektronskog termometra s termistorom:

Izvor mjerne nesigurnosti	Standardna nesigurnost °C	Tip
Umjeravanje senzora	0.03	B
Mjerne greške		
Ponovljivost mjerena	0.02	A
Mjerni šum senzora	0.01	A
Šum pojačala	0.005	A
Starenje senzora	0.025	B
Toplotni gubici kroz spojne žice	0.01	A
Dinamičkagreška zbog tromosti senzora	0.005	B
Temperaturna nestabilnost objekta mjerena	0.04	A
Prenosni šum	0.01	A
Odstupanje od linearne statičke karakteristike	0.02	B
Ambijentalni uticaji		
Napon napajanja	0.01	A
Otpornici u mosnom spoju	0.01	A
Dielektrični gubici u kondenzatoru A/D pretvornik	0.00	B
Digitalna rezolucija	0.01	A
Kombinovana standardna nesigurnost	0.068	



SENZORI

Podela senzora

U literaturi se mogu naći razne podele senzora, od vrlo jednostavnih do složenih. Najčešće se dele po:

mernoj veličini

specifikacijama karakteristika

načinu detekcije

tipu pretvaranja

materijalu izrade

području primene

Tablica 1. *Klasifikacija senzora po mjernoj veličini.*

Mjerne veličine		Mjerne veličine	
Akustičke	Amplituda, faza i brzina vala, spektar	Optičke	Amplituda, faza i brzina vala, indeks refrakcije, emisija, refleksija
Biološke	Tip i koncentracija biomase	Mehaničke	Pozicija (linearna i kutna), ubrzanje, sila, naprezanje, tlak, masa, gustoća, moment trenosti, moment, brzina protoka, protok, čvrstoća, oblik, viskoznost
Kemijske	Koncentracije komponenata	Radijacijske	Tip, energija, intenzitet zračenja
Električke	Naboj, struja, potencijal, napon, amplituda i faza električkog polja, vodljivost i dr.	Toplinske	Temperatura, toplinski tok, specifična toplina, toplinska vodljivost
Magnetske	Amplituda i faza magnetskog polja, vodljivost i dr.		

Tablica 2. Klasifikacija senzora po specifikacijama karakteristika.

Karakteristika	
Osjetljivost	Mjerno područje
Stabilnost (kratkoročna i dugoročna)	Rezolucija
Točnost	Selektivnost
Brzina odziva	Okolišni uvjeti
Opterećenje	Linearnost
Histereza	Zona neosjetljivosti
Životni vijek	Preciznost
Cijena, veličina, težina	itd.

Tablica 3. *Klasifikacija senzora po načinu detekcije.*

Način detekcije	
Biološki	Toplina, temperatura
Kemijski	Mehanički pomak ili val
Električki, magnetski ili elektromagnetski val	Radioaktivnost, zračenje

Tablica 4. Klasifikacija senzora po tipu pretvorbe.

Tip pretvorbe			
Fizikalni	Termoelektrički	Kemijski	Kemijska pretvorba
	Fotoelektrički		Fizikalna pretvorba
	Fotomagnetski		Elektrokemijska pretvorba
	Magnetoelektrički		Spektroskopija
	Elektromagnetski		
	Termoelastični	Biološki	Biokemijska pretvorba
	Elektroelastični		Fizikalna pretvorba
	Termomagnetski		Pojave na ispitnim organizmima
	Termooptički		Spektroskopija
	Fotoelastični		

Tablica 5. *Klasifikacija senzora po materijalu izradbe.*

Materijal izradbe senzora	
Neorganski	Organski
Vodič	Izolator
Poluvodič	Tekući plin
Biološki supstrat	Plasma itd.

Automobilska industrija	Elektronika	Biomedicina	Komunikacije	Vojna primena
Senzori za internu navigaciju	Glave u drajvovima diskova	Senzori pritiska krvi	Komponente fiber-optičkih mreža	Navodjenje projektila
Senzori stanja vazduha u kabini	Glave inkjet printera	Stimulatori mišića i sistemi za uvođenje lekova	RF releji, prekidači i filteri	Sistemi za osmatranje
Senzori kočionih sila	Televizijski projekциони екрани	Implantirani senzori pritiska	Projekциони дисплеји у мобилним комуник. компонентама и инструментима	Ručни системи
Senzori nivoa goriva i pritiska pare	Senzori za detekciju zemljotresa	Protetika	Spliteri i kapleri	Ugradivi senzori
Senzori za vazdušne jastuke	Senzori pritiska u avionima	Minijaturni analitičки инструменти	Oscilatori kontrolisani naponom (VCO)	Memorisanje podataka
“Inteligentne gume”	Sistemi za masovno memorisanje podataka	Pejsmejkeri	Podesivi laseri	Kontrola letilica

	Aktivni	Pasivni			
Domeni energija		Opornički, kapacitivni, induktivni	Diodni	Tranzistorski	Aplikacije
Optički	Volta efekat, solarna čelija	Fotoprovodnik	Fotodioda	Fototranzistor	Foto IC, CCD
Mehanički	Nepoznat	Piezootpornik	Piezospoj	Piezotranzistor	Akcelero m., Piezo IC
Termički	Seebeck-ov efekat, termopar	$R=f(T)$	Inverzno pol. PN spoj	Direktno pol. PN spoј	IC Termometri
Magnetski	Maxwell-ov difundovani namotaj	Magnetski otpornik	Magnetska dioda	Hall-ov efekat	Hall IC
Hemijski	Galvanski	Koncentracija jona	Nepoznat	ISFET	Senzori koncentracije

Pregled poznatih fizičkih efekata na silicijum i druge materijale i primeri aplikacija.

OSNOVNI SENZORI

- OTPORNIČKI SENZORI
- KAPACITIVNI SENZORI
- ELEKTROMAGNETNI SENZORI
- PIJEZOELEKTRIČNI SENZORI
- OPTOELEKTRONSKI SENZORI
- DIGITALNI SENZORI

OTPORNIČKI SENZORI

PRINCIP RADA

Promena otpora u zavisnosti od delovanja mehaničke sile, temperature ili zračenja odavno se primenjuje u tehnici senzora. Osnovni senzorski element u tom slučaju je otpornik ili rezistor. Agregatno stanje otpornika je **čvrsto**, **tečno** ili **gasovito**.

Otpornički senzori od čvrstih materijala primenjuju se za merenje fizikalnih veličina koje su u vezi sa delovanjem mehaničke sile ili temperature.

Prave se od:

- metala ili
- poluprovodnika.

Otpor metalnih senzora računa se na osnovu poznate formule

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

gde su:

ρ - specifični otpor koji zavisi od osobina materijala od kojeg je otpomik napravljen [Ωm],

l - dužina otpornika [m] i

S - poprečni presek otpornika [m^2].

Delovanje mehaničke sile odražava se na otpornički senzor od metala kao promena njegovih geometrijskih parametara dužine l i preseka S .

Osetljivost na promenu dužine l je konstantna, a na lineamu promenu poprečnog preseka S je nelinearna:

$$\frac{\Delta R}{\Delta l} = \frac{\rho}{S}$$

$$\frac{\Delta R}{\Delta S} = -\rho \frac{l}{S^2}$$

Osnovno svojstvo svih čvrstih otpomika je da im otpor u manjoj ili većoj meri zavisi od **temperature**. Na toj osnovi grade se **temperaturni senzori**, koji su vrlo raspostranjeni i cenjeni u tehničkoj praksi. Zavisnost otpora od temperature je nepoželjan efekat kada je u pitanju merenje mehaničkih veličina. U opštem slučaju promena otpora u zavisnosti od temperature je eksponencijalna:

$$R_t = A e^{\alpha T} \quad R_t = R_0 A e^{\alpha(T - T_0)}$$

gde su: A konstanta [Ω], α temperaturni koeficijent [$1/^\circ\text{C}$], T temperatura [$^\circ\text{C}$], T_0 referentna temperatura [0°C ili 20°C] a R_0 otpor na referentnoj temperaturi T_0 .

Temperatuma osetljivost $\Delta R/\Delta T$ otporničkih senzora je nelinearna. Za metale je ova osetljivost pozitivna, a za poluprovodnike negativna.

Za tehničku praksu posebno su interesantni metali i polupro-vodnici koji u određenim temperatumim dijapazonima imaju konstantnu osetljivost. To su **termootpori** koji služe kao osnov za gradnju senzora temperature.

Tekućinski otpornički senzori su rastvori elektrolita, pa se često nazivaju elektrolitičkim senzorima.

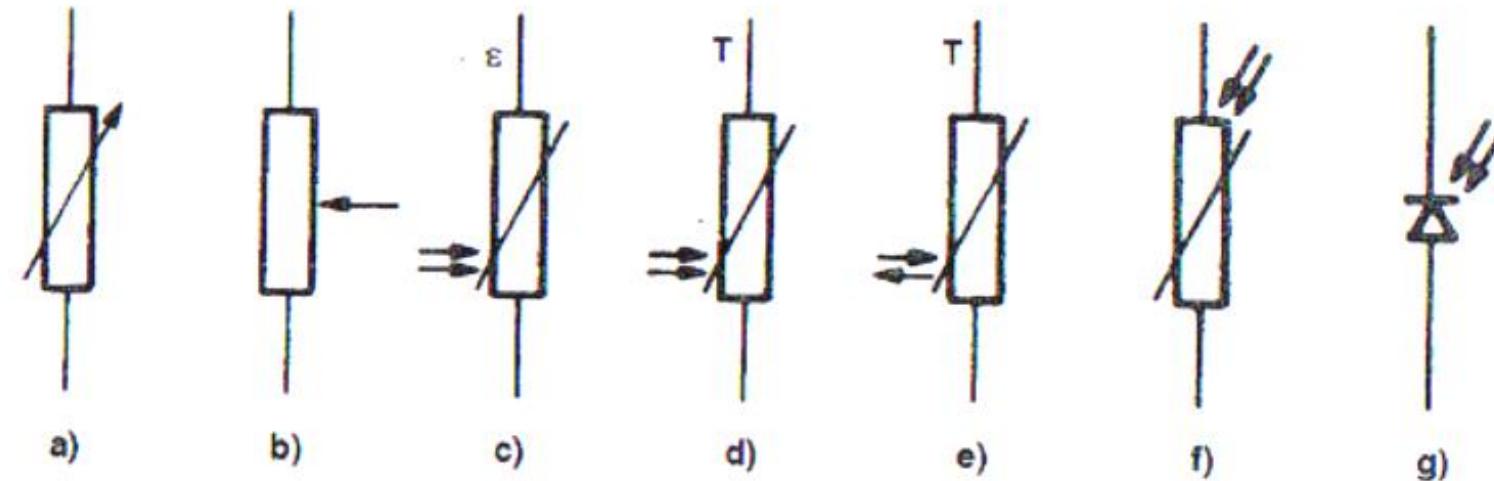
Promena otpora u zavisnosti od količine i vrste rastvorenog materijala predstavlja osnov za elektrohemijujsko merenje koncentracije tog materijala u rastvoru.

Gasni otpornički senzori prave se kao stakleni baloni (cevi) ispunjeni razređenim gasom. Rade na osnovu osobine vodljivih gasova da im otpor zavisi od pritiska i jačine svetlosti, dok zavisnost od temperature nema praktični značaj.

Princip rada gasnih otporničkih senzora primenjuje se u gradnji senzora niskog absolutnog pritiska,tj.visokog vakuma

Obeležavanje otporničkih senzora

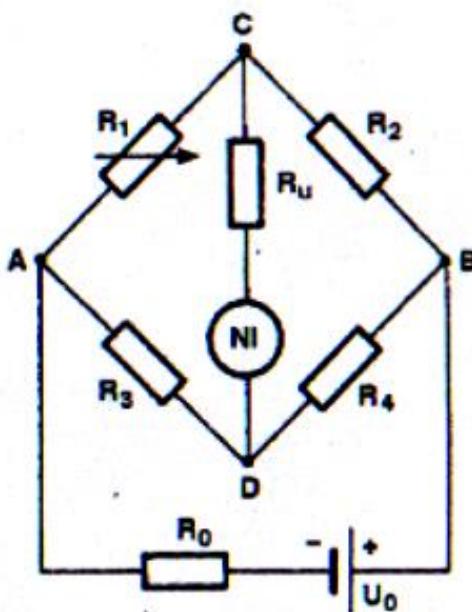
Na slici 9.1. prikazane su oznake otporničkih senzora. Vrednost otpora je od nekoliko ohma do nekoliko megaohma, što zavisi od načina rada senzora.



Slika 9.1. Oznake otporničkih senzora: a) opšta oznaka, b) potencio-metarski senzor pomaka, c) senzor mehaničkog naprezanja, d) termo-otpor sa pozitivnim temperaturnim koeficijentom, e) termootpor sa negativnim temperaturnim koeficijentom, f) fotoootpor, g) fotodioda

MERNE ŠEME SA OTPORNIČKIM SENZORIMA

Šeme sa pasivnim mernim mostom. Principi rada pasivnih mernih mostova dobro su izučeni u teoriji merenja. Zbog svojih kvaliteta imaju značajno mesto u tehnici senzora, odnosno kod merenja otpora, kapaciteta ili induktiviteta senzora.



Ako je $R_0 \approx 0$, struja i napon u izlaznoj dijagonali mosta CD mogu se odrediti primenom Tevenenove teoreme:

$$I = U_0 \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 R_4 (R_2 + R_3) + R_2 R_3 (R_1 + R_4)}$$

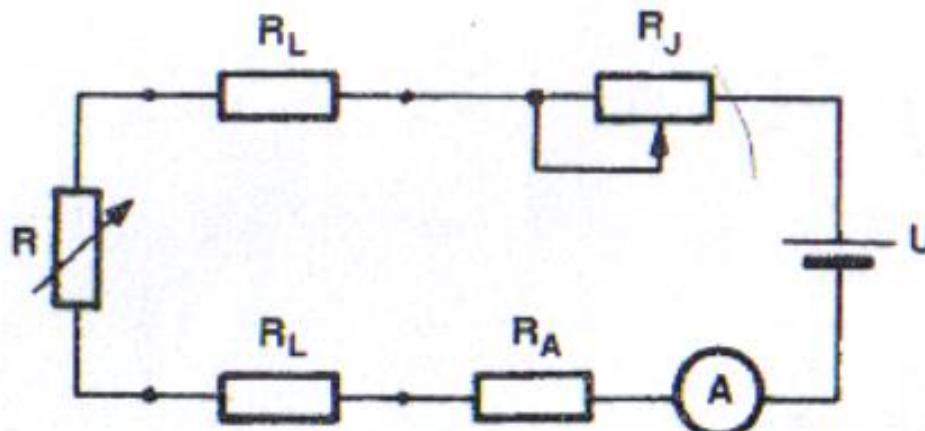
$$U = U_0 \left[\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right] = U_0 \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

Merna šema za distanciono merenje otpora (I-metod)

Često je potrebno otpornički senzor postaviti na veću udaljenost od centralne mjerne aparature, ali tada otpor priključnih vodova od senzora do mosta umanjuje tačnost mernog mosta. Zato se za distanciono merenje otporničkog senzora primeњuje metod merenja struje (slika 9.3).

Struja u mernom kolu je:

$$I = \frac{U}{R + R_A + R_J + 2R_L}$$

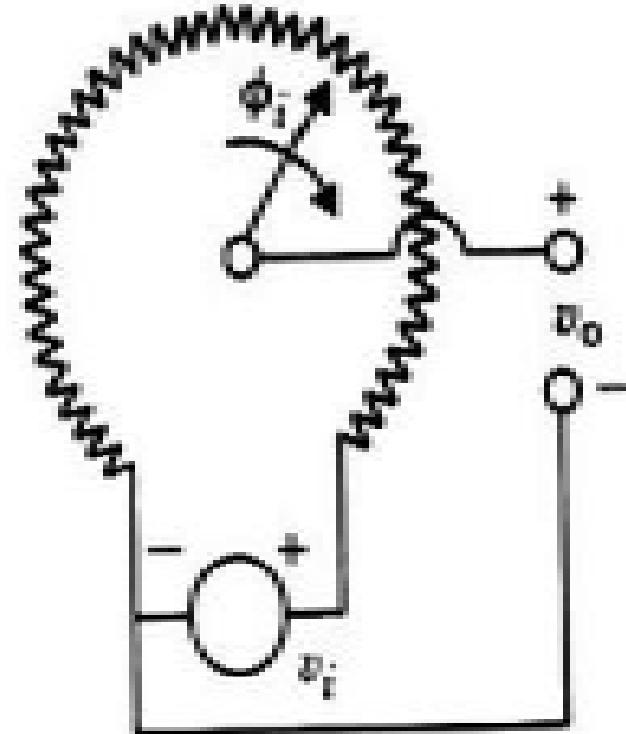
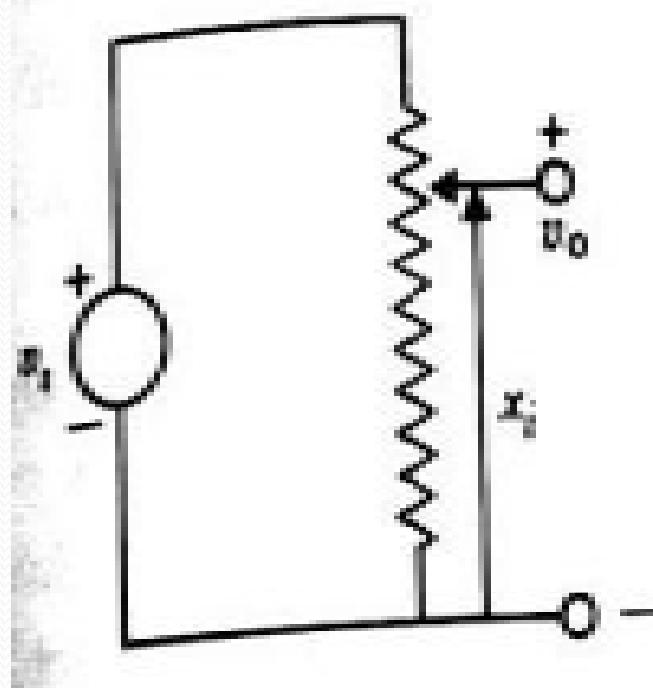


Nadomesni otpor R , podešava se tako da ukupna suma bude $R_J + R_A + 2R_L = 50 \Omega$

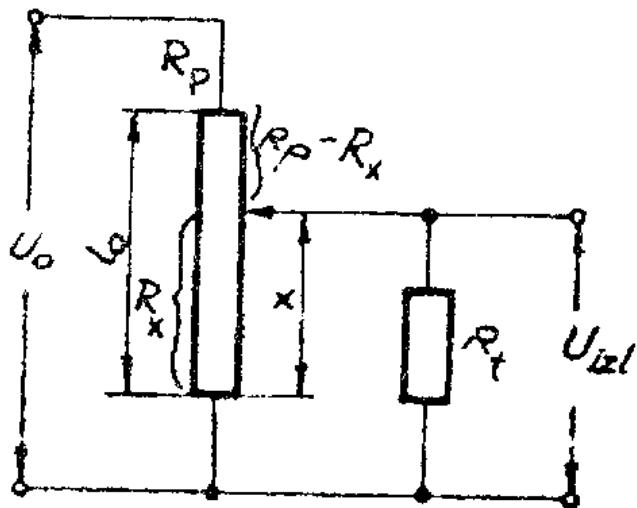
Slika 9.3. Distanciono merenje otpora I-metodom

Potenciometarska šema (U-metod) primenjuje se za merenje otpora senzora na bliskim rastojanjima. Senzor u ovom slučaju ima oblik potenciometra, tj. otpomika sa klizačem i pogodan je za merenje mehaničkih veličina.

Struja u mernom kolu je:



OTPORNIČKI SENZORI

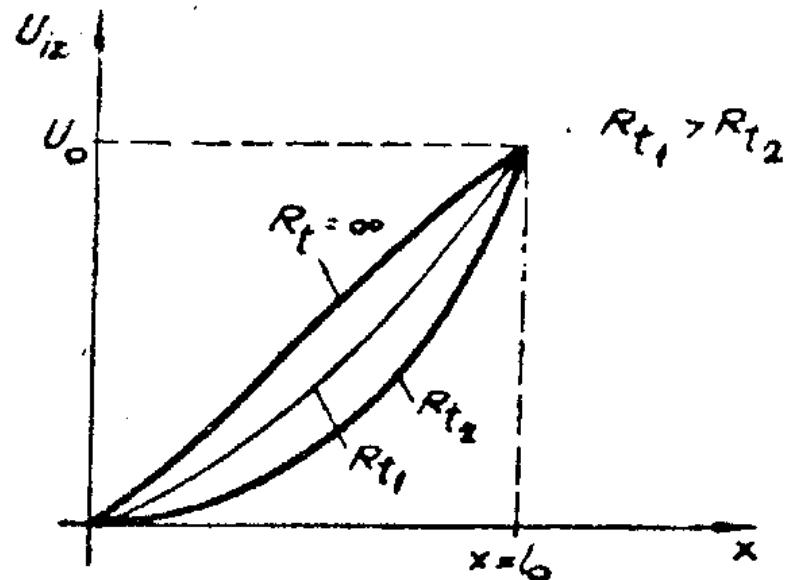


$$R_t = \infty$$

$$U_{iz0} = I \cdot R_x = \frac{U_0}{R_p} \cdot R_x = \frac{U_0}{l_0} \cdot x$$

$$R_t \neq \infty$$

$$U_{iz} = \frac{U_0}{(R_p - R_x) + \frac{R_x R_t}{R_x + R_t}} \cdot \frac{R_x R_t}{R_x + R_t}$$



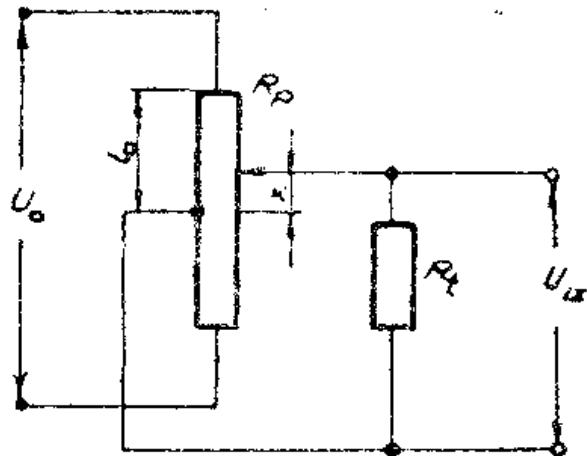
a)

b)

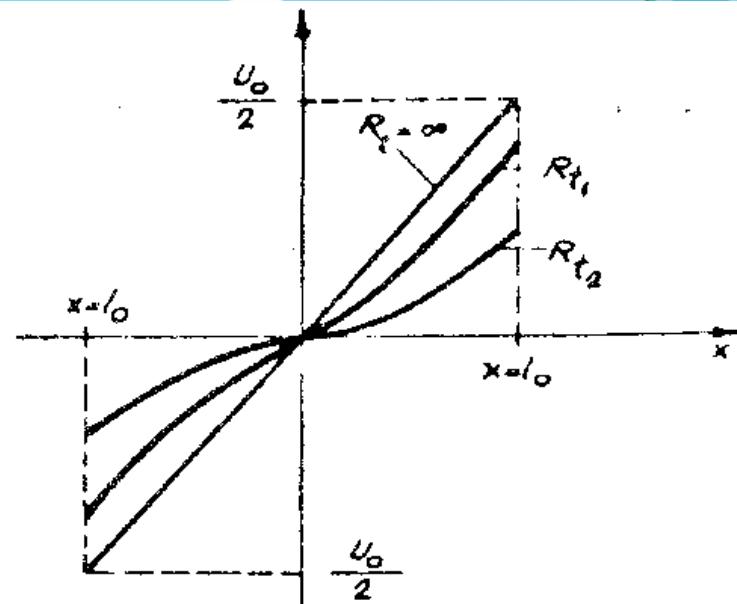
$$\xi = R_p / R_t$$

$$U_{iz} = \frac{U_0}{l_0 + \xi \cdot x(1 - x/l_0)} \cdot x$$

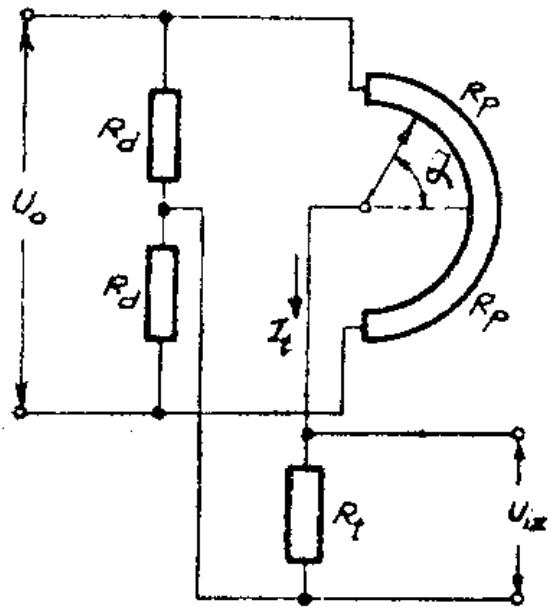
$$U_{iz} = \frac{U_0}{\alpha_0 + \xi \cdot \alpha(1 - \alpha/\alpha_0)} \cdot \alpha$$



a)



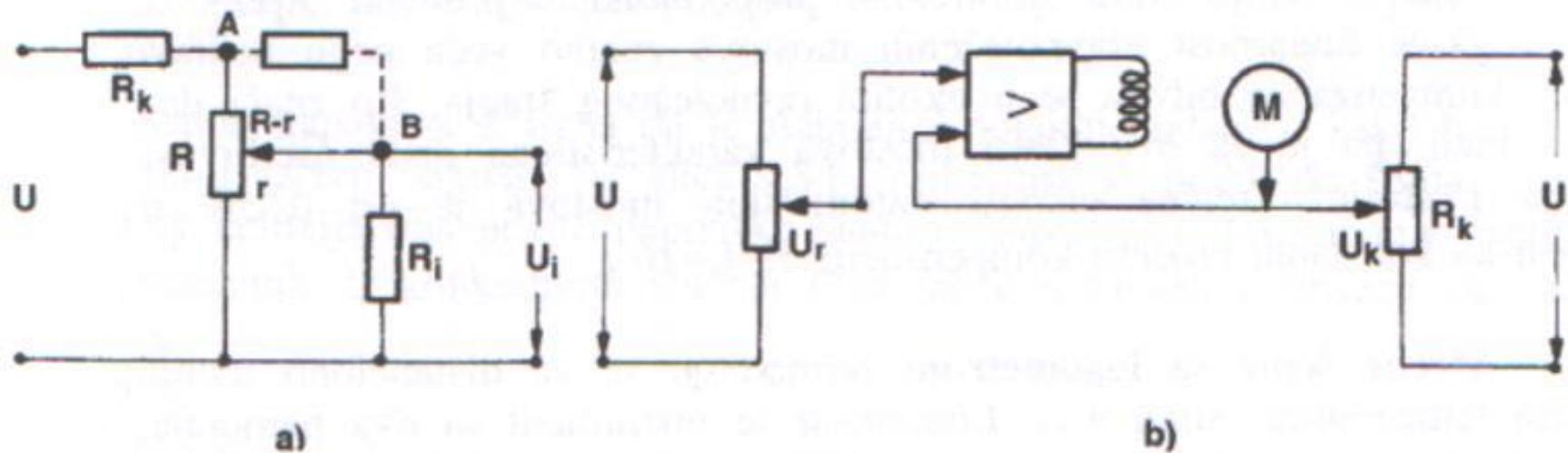
b)



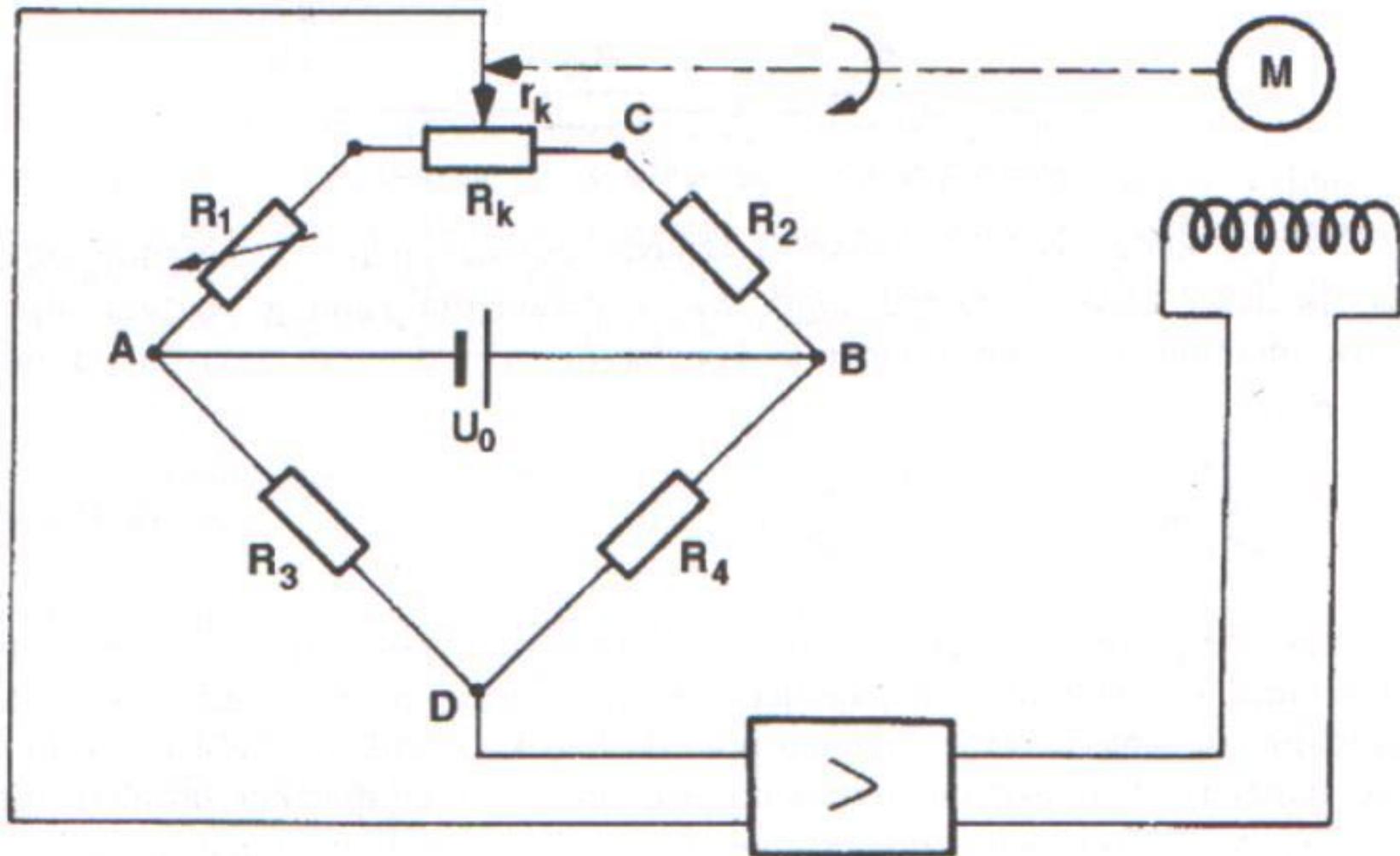
$$U_{iz} = \frac{U_0}{\alpha_0 \left[2 + \frac{R_d}{R_t} + \xi \left(1 - \frac{\alpha^2}{\alpha_0^2} \right) \right]} \cdot \alpha$$

U praksi se primenjuje više načina za smanjenje nelinearnosti, tj. otklanjanje uticaja otpora opterećenja na izlazni napon potenciometarskog senzora:

- 1) Dodavanje kompenzacionog otpornika R_k u seriju sa potenciometarskim senzorom (slika 9.5.a).
- 2) Automatska kompenzacija na principu servomehanizma (slika 9.5.b).
- 3) Postavljanje impedantnog rastavljača (naponskog sledila) između potenciometarskog senzora i opterećenja.



Slika 9.5. Otklanjanje uticaja otpora opterećenja

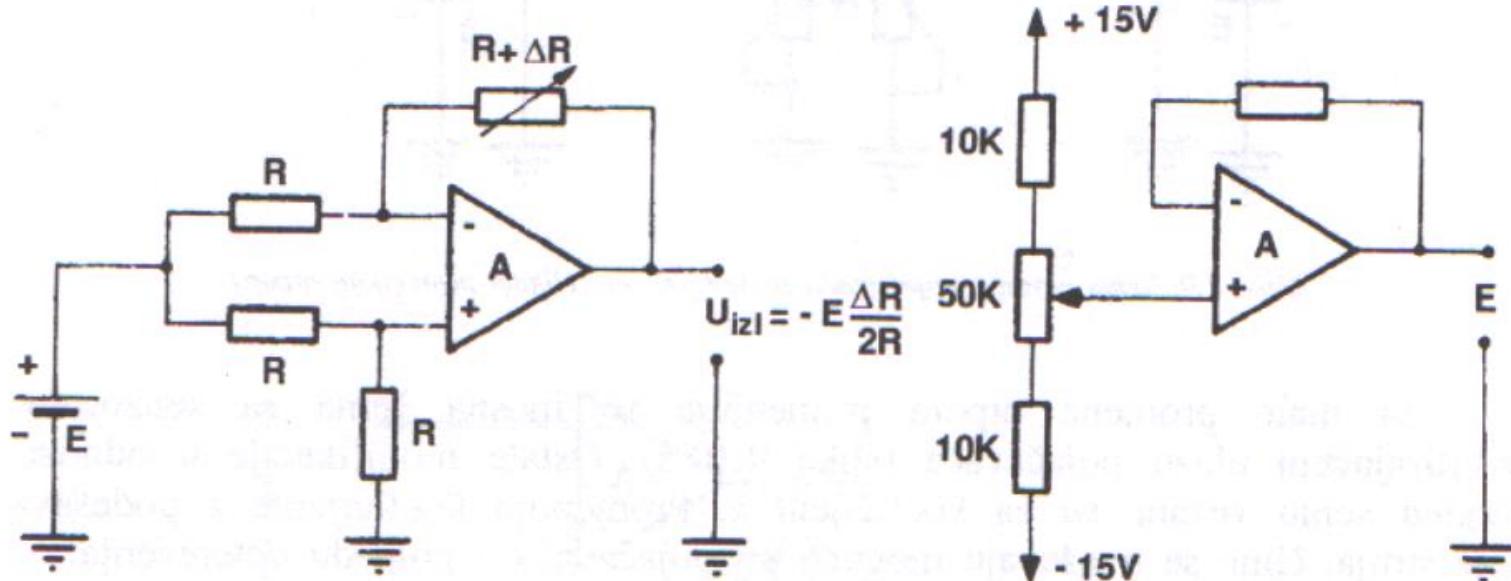


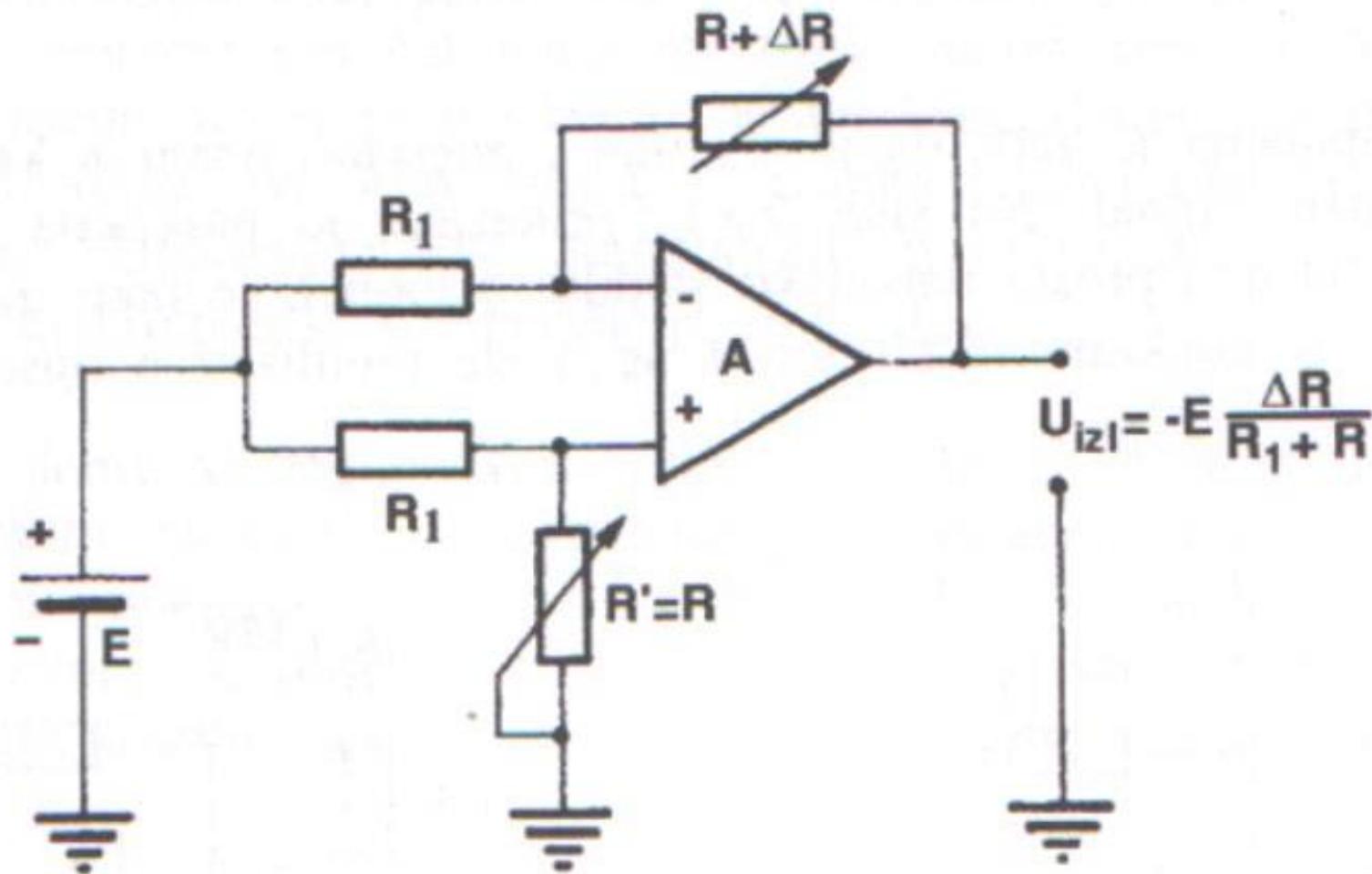
Slika 9.6. Merenje otpora senzora metodom automatske kompenzacije

Metod mosnih pojačavača. Najveće ograničenje metode merenja otpora pomoću Vitstonovog mosta je osetljivost izlaznog napona na nestabilnost napona napajanja i nelinearnost statičke karakteristike.

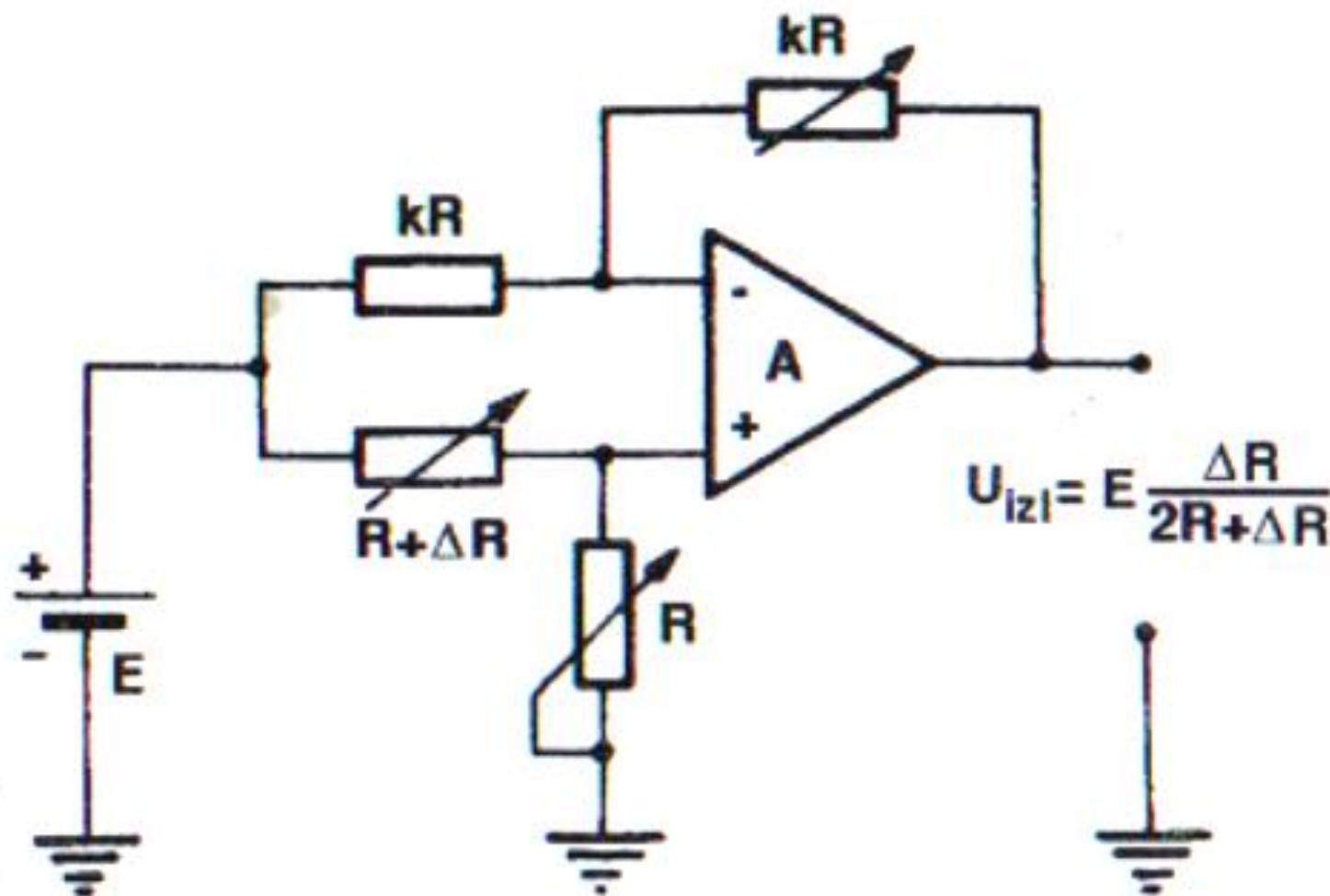
Radi poboljšanja merenja često se upotrebljavaju **mosni pojačavači**. Operacioni pojačavač, tri otpornika jednake otpomosti i otpomički senzor, kao na slici 9.8.a, obrazuju osnovnu šemu mosnog pojačavača.

U praktičnoj primeni je teško ostvariti da sva tri otpomika R imaju otpor jednak otporu senzora za početne uslove. Zato se posebno realizuju šeme za **velike**, a posebno za **male promene otpora** senzora.





Slika 9.9. Šema mosnog pojačavača za senzore sa velikom promenom otpora



Slika 9.10. Šema mosnog pojačavača za senzore sa malom promenom otpora

KAPACITIVNI SENZORI

PRINCIP RADA

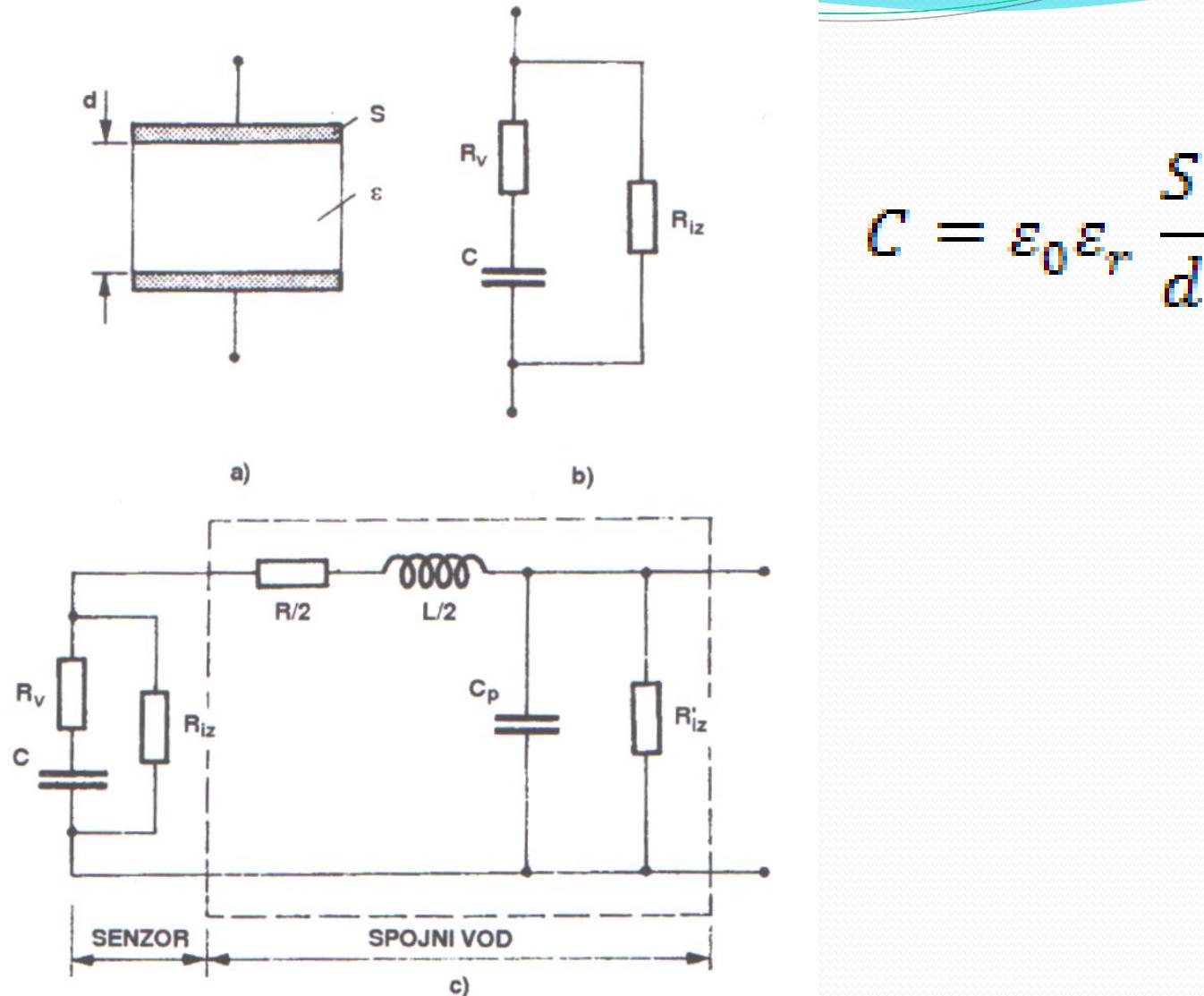
Dve metalne ploče između kojih se nalazi dielektrični (izolacioni) materijal grade kondenzator (slika 10.1.a).

Dobre osobine kapacitivnih senzora su:

- ✓ jednostavnost,
- ✓ preglednost,
- ✓ visoka osetljivost,
- ✓ svestrana upotrebljivost (kako za praćenje stacionarnih tako i za praćenje brzo promenljivih fizikalnih veličina), te
- ✓ primena i kod viših temperatura.

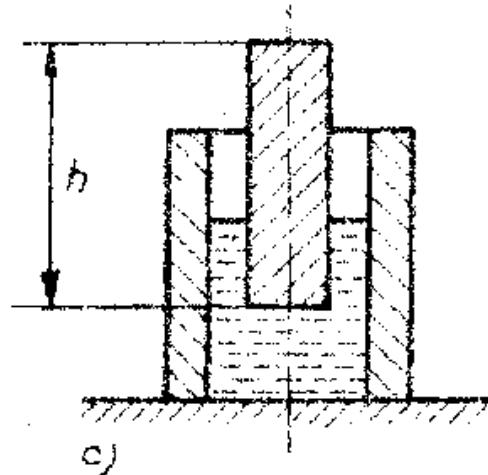
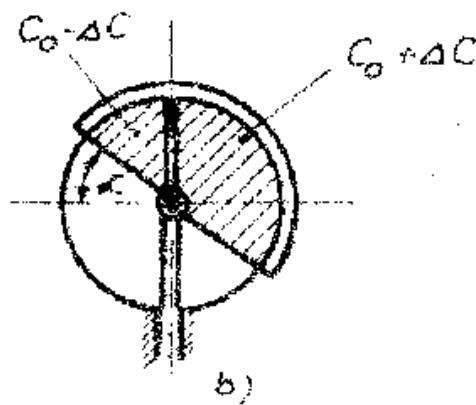
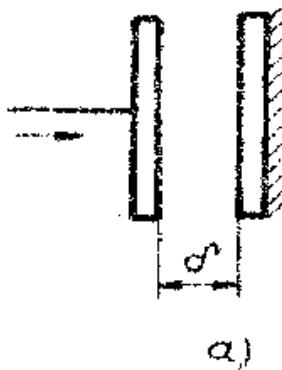
Loša osobina je njihov **veliki unutrašnji otpor**, koji zahteva još veći ulazni otpor mernog bloka. Nedostatak je takođe i **osetljivost** relativne dielektrične konstante dielektrika na **delovanje tečnosti** sa $e_r > 1$, kao što su razna ulja, a naročito voda, $e_r = 80$.

KAPACITIVNI SENZORI



$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}$$

Slika 10.1. Kapacitivni senzor: a) opšti prikaz, b) ekvivalentna šema, c) ekvivalentna šema sa priključnim vodovima



$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi d}$$

$$C = \frac{\epsilon S}{4(d - \Delta x)} = \frac{S}{4 \cdot d \left(1 - \frac{\Delta x}{d}\right)}$$

$$(1 + \Delta x / d)$$

$$d^2 \gg (\Delta x)^2$$

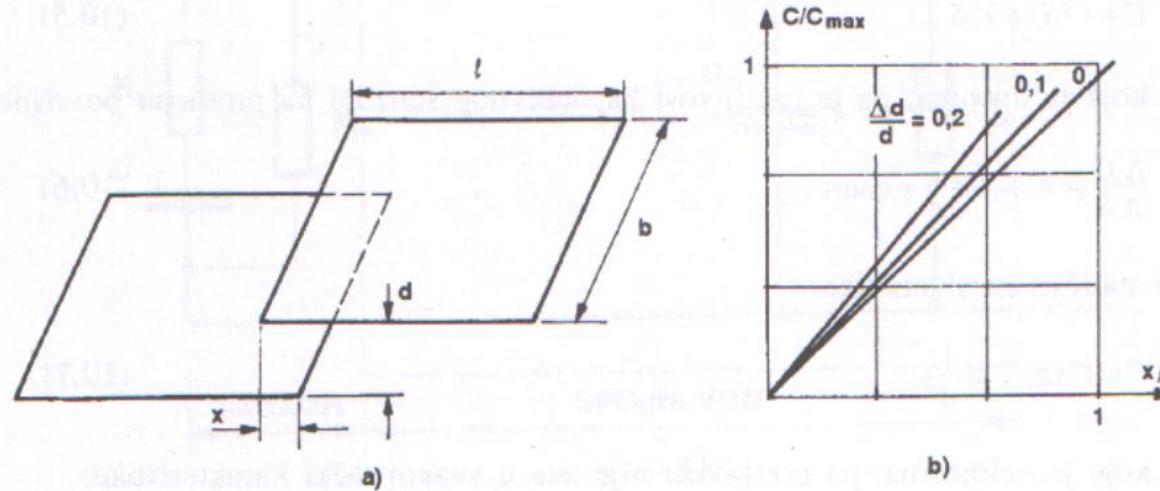
$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi d} \left(1 + \frac{\Delta x}{d}\right) = C_0 + \frac{C_0}{d} \Delta x$$

NAČINI GRADNJE KAPACITIVNIH SENZORA

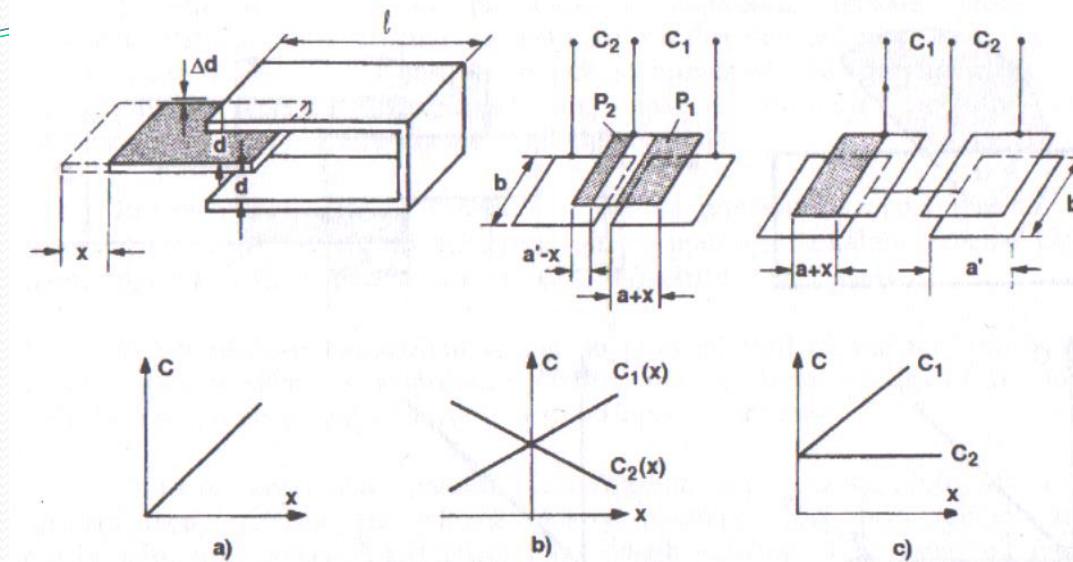
Načini gradnje kapacitivnih senzora razlikuju se prema tome da li se promena kapaciteta ostvaruje:

- menjanjem aktivne površine između ploča (elektroda),
- menjanjem zazora između elektroda ili
- promenom dielektrika.

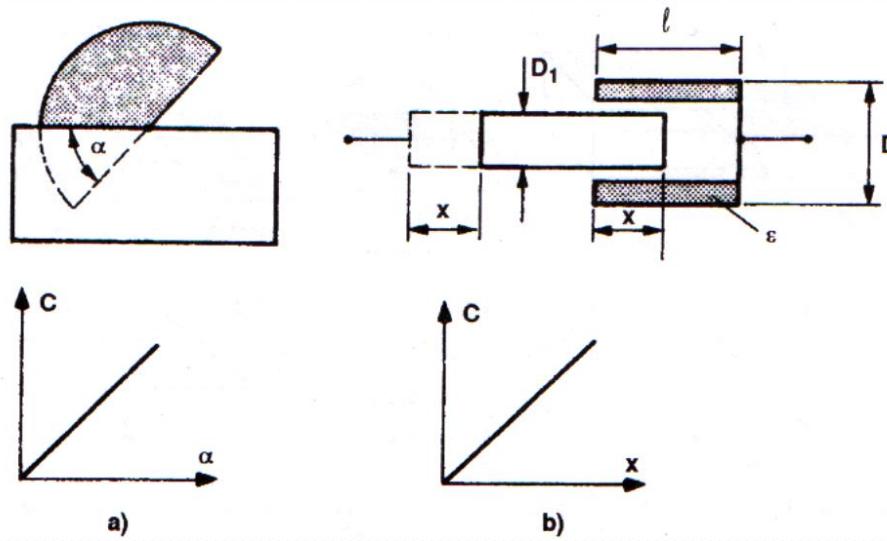
Kapacitivni senzori sa promenljivom površinom



KAPACITIVNI SENZORI



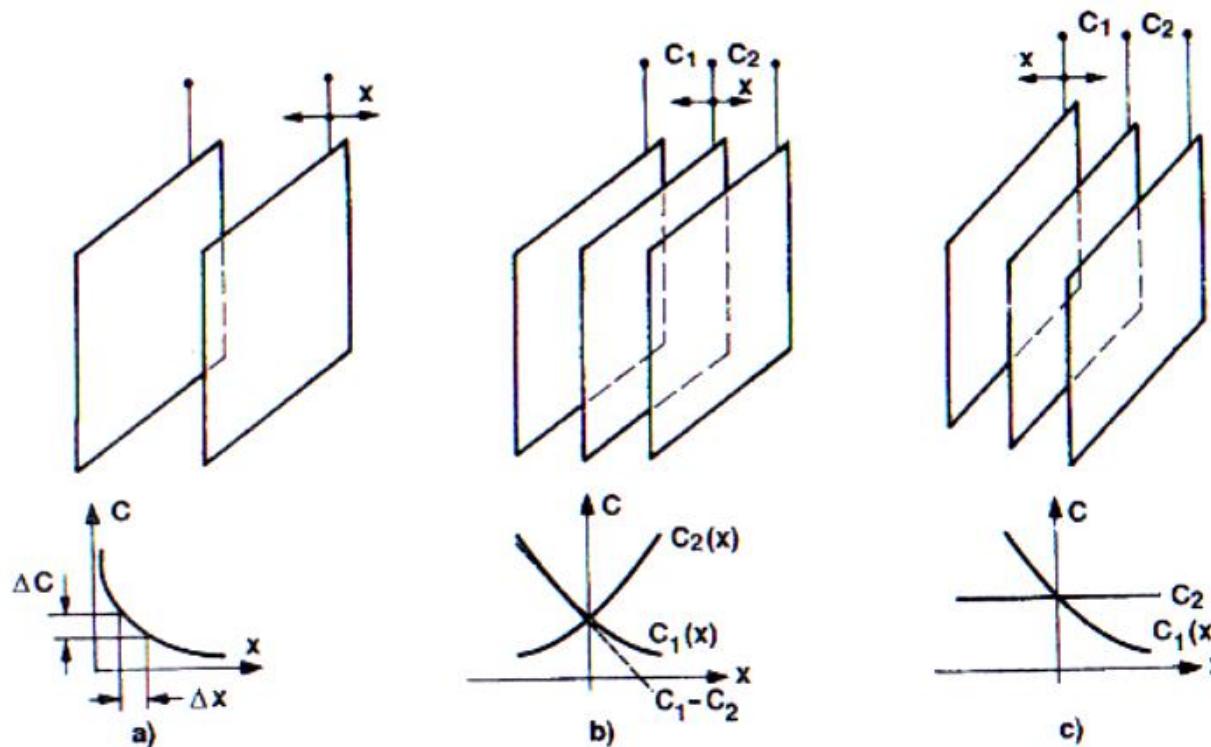
Slika 10.3. Realizacije pločastih kapacitivnih senzora i njihove statičke karakteristike:
a) poboljšana varijanta, b) diferencijalni, c) poludiferencijalni



Slika 10.4. Realizacije kapacitivnih senzora: a) ugaoni, b) cilindrični

Kapacitivni senzori sa promenljivim razmakom između ploča

Promena kapaciteta je veoma osetljiva na promenu razmaka između ploča senzora, pa se zato ovi senzori upotrebljavaju za praćenje fizikalnih veličina koje se manifestuju kao mali pomaci reda milimetra, mikrometra, pa i manje.

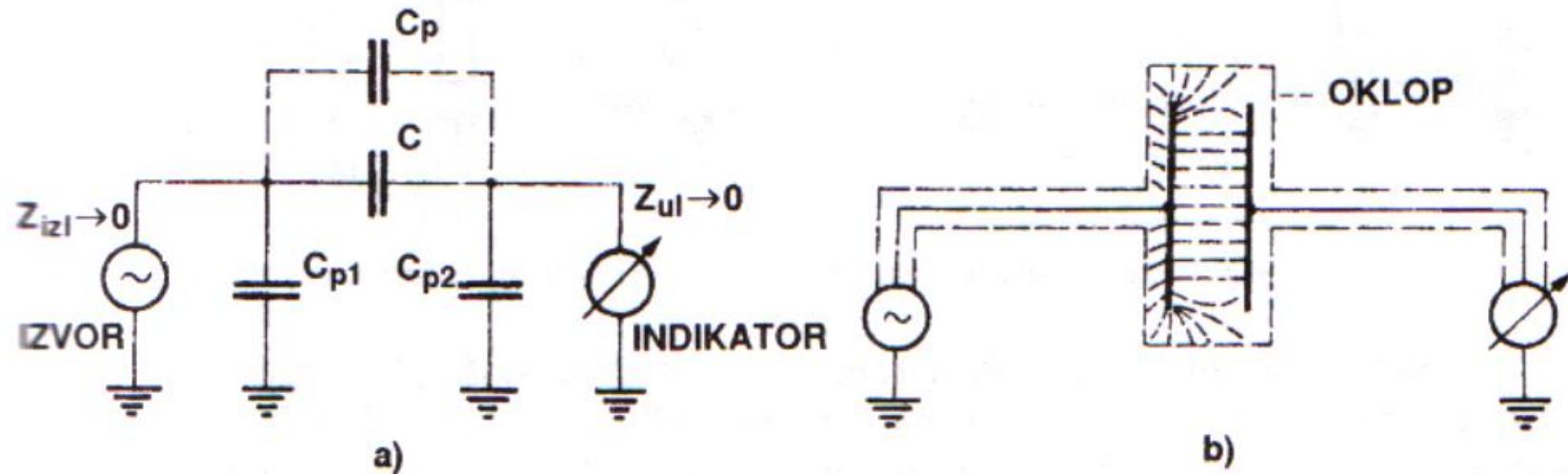


Slika 10.5. Kapacitivni senzori sa mpromenljivim zazorom i njihove staticke karakteristike:
a) prosti, b) diferencijalni, c) poludiferencijalni

MERNE ŠEME SA KAPACITIVNIM SENZORIMA

Osnovni problem koji se javlja prilikom uključivanja kapacitivnog senzora u mernu šemu je odstranjivanje parazitnih kapaciteta između obloga kondenzatora sa priključnim vodovima i mase.

Šema za eliminaciju uticaja parazitnih kapaciteta naziva se potencijalno-strujna ili trokontaktna šema. Osnovni princip ove šeme je da nijedna elektroda senzora nije direktno spojena sa masom (slika 10.7.a).



Slika 10.7. Priklučivanje kapacitivnog senzora:

a) potencijalno-strujna šema, b) elektrostatička zaštita

ELEKTROMAGNETNI SENZORI

PRINCIP RADA

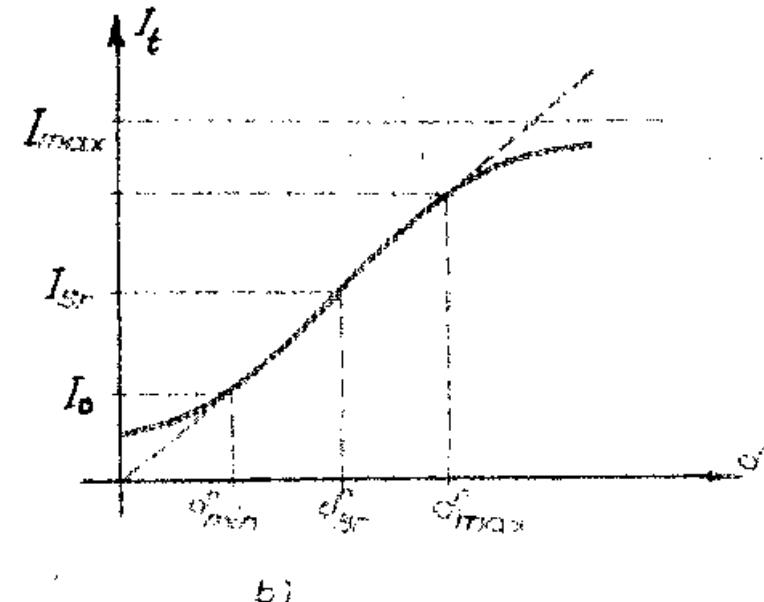
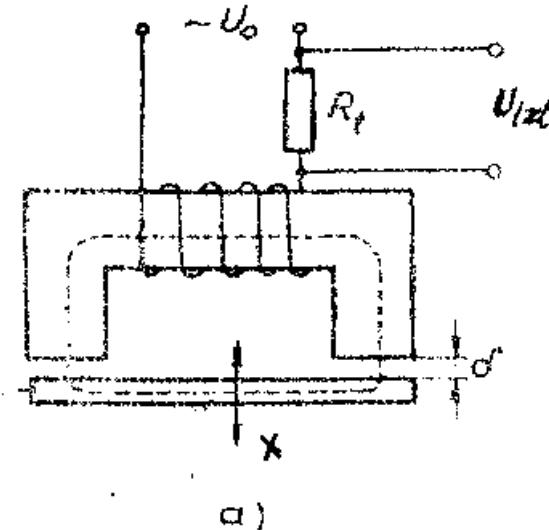
Princip rada **elektromagnetnih senzora** zasniva se na zavisnosti induktivnosti kalema od promene otpora elektromagnetskog kola ili na elektromagnetnoj indukciji.

U tom smislu razlikuju se:

- induktivni,
- međuinduktivni i
- indukcioni (elektrodinamički) senzori.

Induktivni i međuinduktivni spadaju u *pasivne*, a indukcioni u *aktivne* senzore

INDUKTIVNI SENZORI



$$G_m = \frac{1}{R_{Fe} + R_\delta} \quad R_\delta = \frac{2\delta}{\mu_0 S} \quad R_{Fe} \ll R_\delta \quad L = \mathcal{W}^2 G_m = \frac{\mathcal{W}^2 \mu_0 S}{2\delta}$$

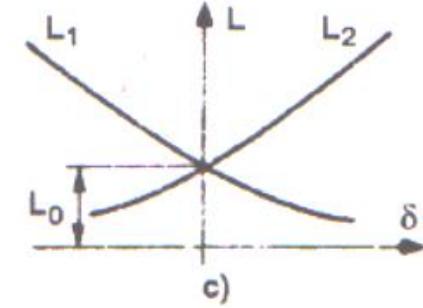
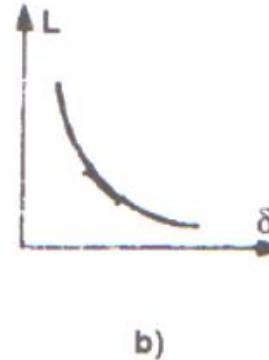
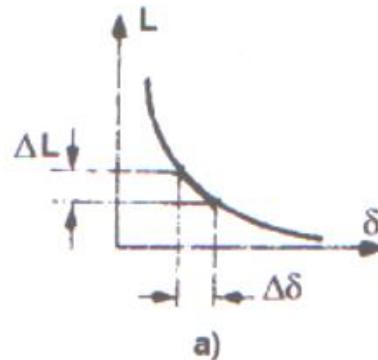
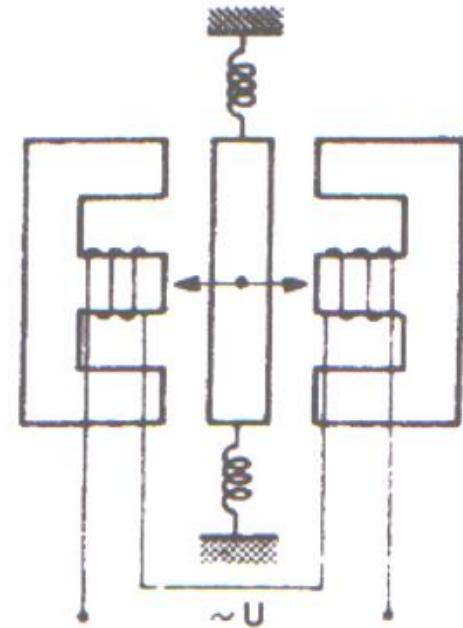
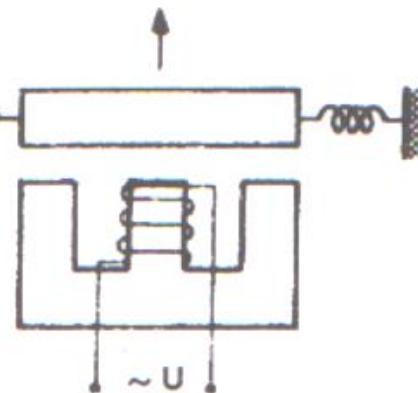
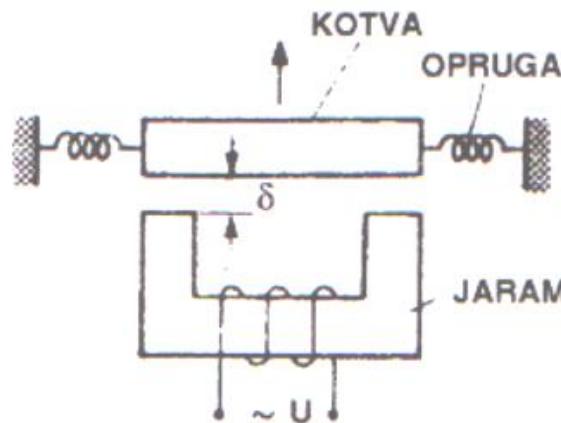
$$I_t = \frac{U_0}{\sqrt{(R_t + R_d)^2 + X_L^2}} = \frac{U_0}{\sqrt{(R_t + R_d)^2 + \left(\frac{2\pi f \mu_0 S w^2}{2\delta}\right)^2}} \quad X_L = 2 \pi f L$$

$$X_L \gg (R_t + R_d)$$

$$I_t = \frac{U_0}{X_L} = K_{ID} \cdot \delta \quad K_{ID} = \frac{I}{\delta} = \frac{U_0}{\pi f \mu_0 S w^2} \quad U_{iz} = I_t R_t = K_{ID} R_t \delta$$

Način gradnje induktivnih senzora

1) Induktivni senzori sa promenljivim zazorom



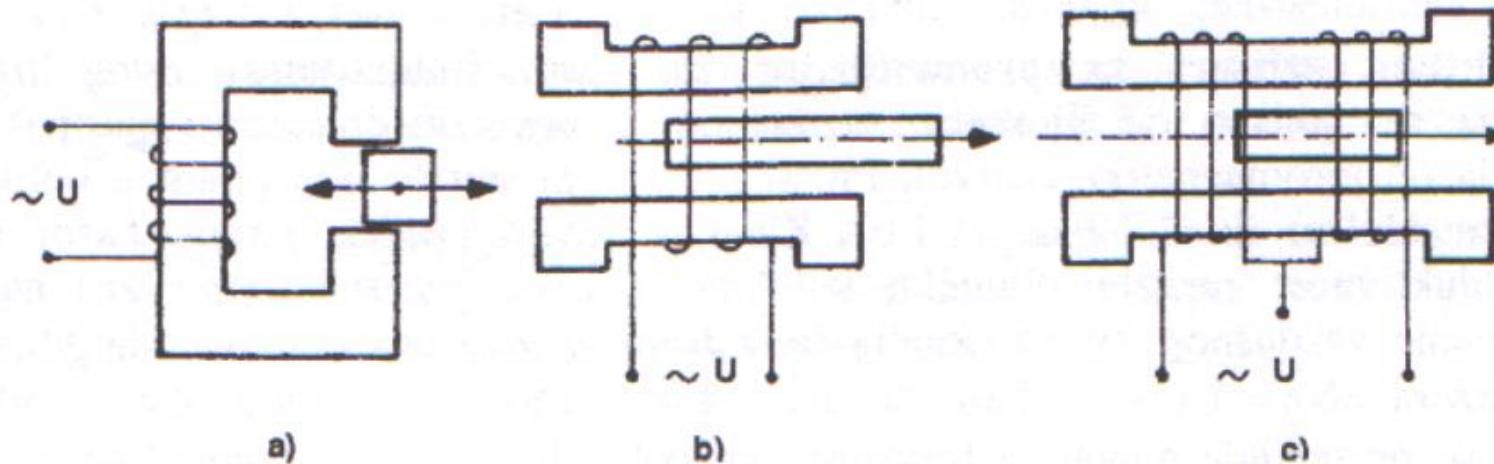
Induktivni senzori sa promenom zazora i njihove statičke karakteristike:

- a) prosti induktivni senzor sa U-presekom, b) prosti induktivni senzor sa E-presekom, c) diferencijalni induktivni senzor

Ozbiljan nedostatak prostih induktivnih senzora je nelinearnost statičke karakteristike i mali opseg promene zazora.

Osim toga, kada kroz induktivitet teče konstantna struja između jarma i kotve deluje privlačna sila, koja izaziva nepoželjno kretanje kotve. Mnogo je bolji diferencijalni induktivni senzor.

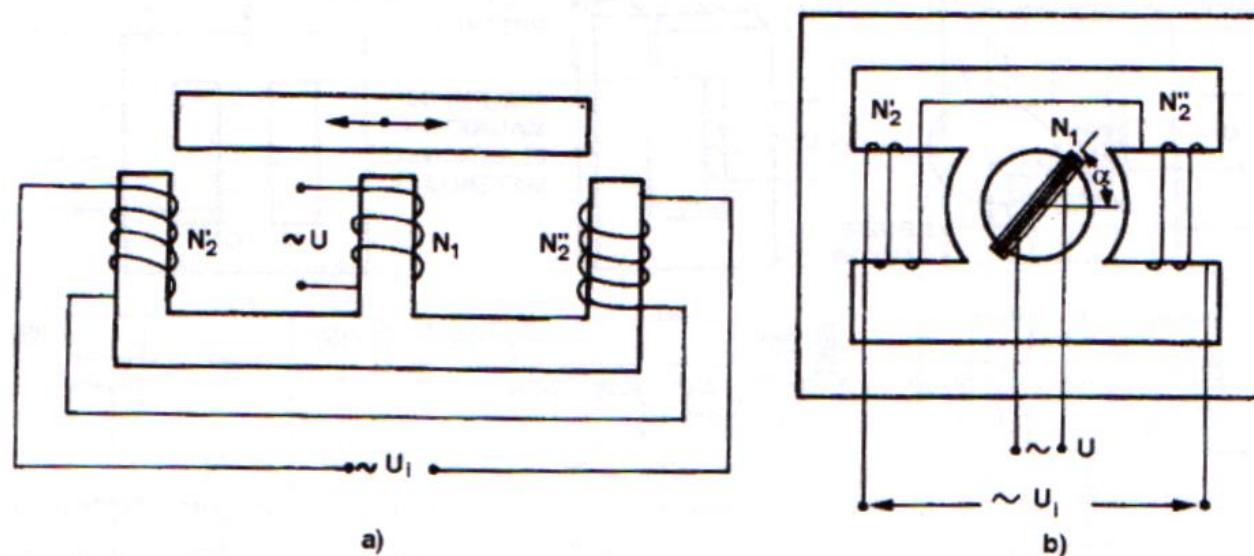
2) Induktivni senzori sa promenljivom površinom vazdušnog zazora



Induktivni senzori sa promenljivom površinom: a) prosti, b) prosti s pomičnim jezgrom, c) diferencijalni

MEĐUINDUKTIVNI SENZORI

Princip rada. Ovo je posebna klasa induktivnih senzora jer imaju po dva navoja magnetno povezana. Zahvaljujući tome, između izvora napajanja i izlaz postoji transformatorska veza, pa se ovi senzori nazivaju i transformatorski. Grade se tako da imaju promenljivu širinu zazora ili promenljivu površinu preseka. Pogodni su za merenje malih mehaničkih pomeraja.



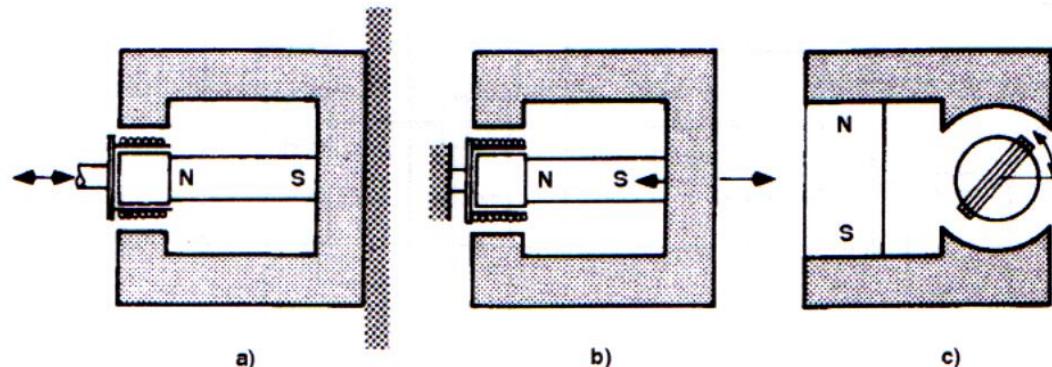
Transformatorski induktivni senzor: a) sa linearnim pomeranjem kotve,
b) sa ugaonim zakretanjem primara

INDUKCIONI SENZORI

Princip rada ovih senzora zasniva se na elektrtidinamjčkoj indukciji. U provodniku koji se kreće i preseca silnice stalnog magnetnog polja (slika a) indukuje se napon.

Upotrebljavaju za detekciju brzine ili veličina koje su sa njom u funkcionalnoj vezi.

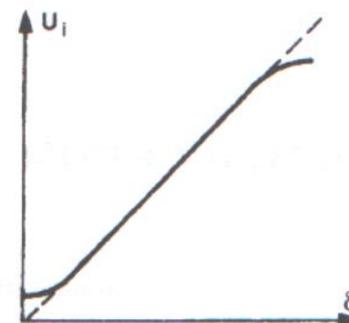
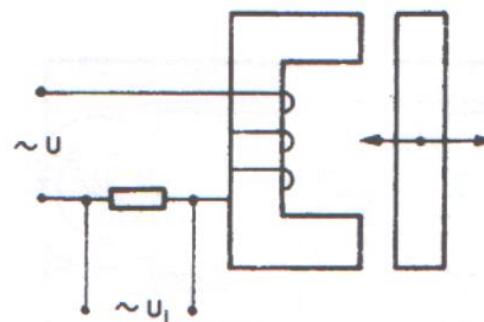
Kao izvanredni detektori vibracija primenjuju se u alarmnim sistemima pod različitim komercijalnim nazivima (geofon, vibrafon). Uobičajena tačnost je reda 0,1-1%.



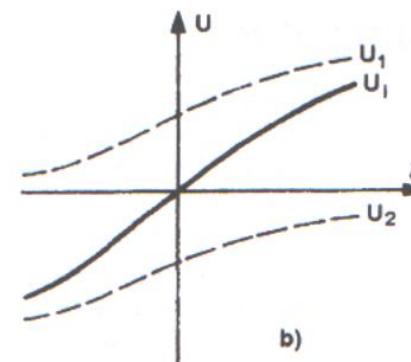
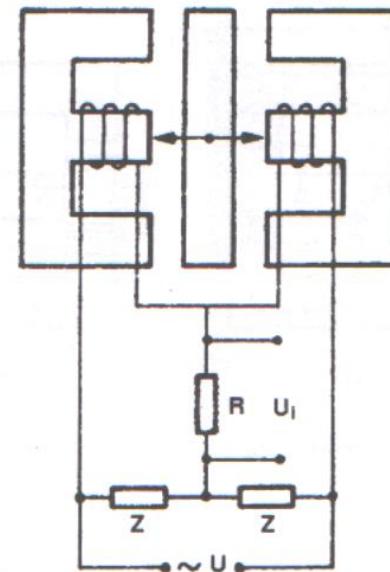
Indukcioni senzori: a) sa pokretnim kalemom, b) sa pokretnim magnetom, c) za detekciju ugaone brzine

MERNE ŠEME SA ELEKTROMAGNETNIM SENZORIMA

Dele se na one koje se primenjuju za proste i na one koje su namenje za različite varijante diferencijalnih senzora.



a)

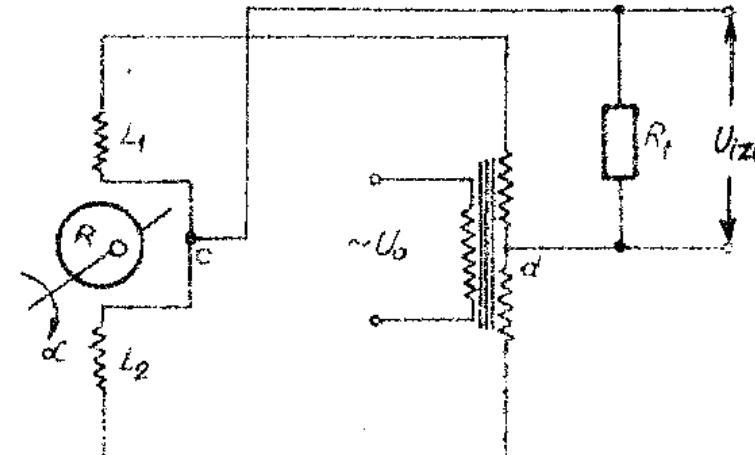
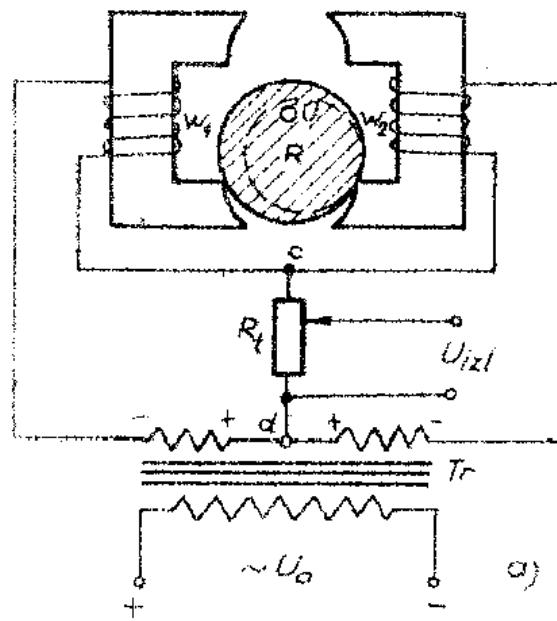


b)

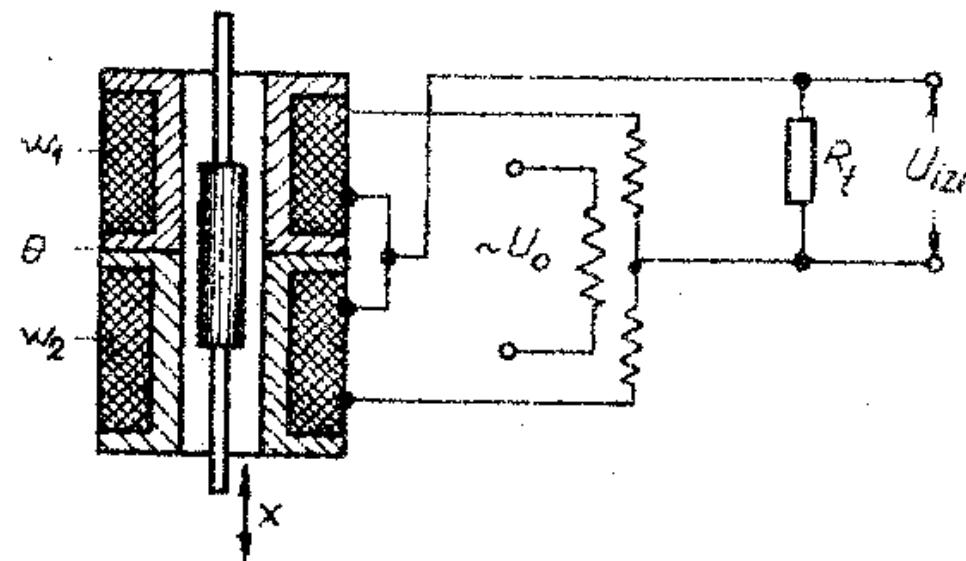
Merne šeme sa induktivnim senzorom:

- a) sa prostim senzorom,
- b) sa diferencijalnim senzor

ELEKTROMAGNETNI SENZORI



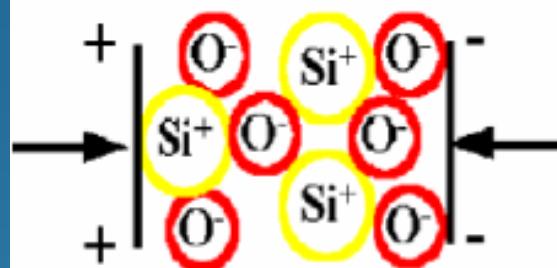
b)



Senzori

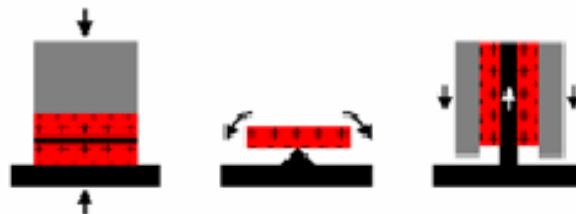
PIEZOELEKTRIČNI SENZORI
OPTOELEKTRONSKI SENZORI
DIGITALNI SENZORI

Piezoelektrički senzorski elementi



Piezoelektrični
materijal

Primjenjeni napon može da rezultuje stvaranje normalnog (levo i sredina), i napona smicanja (desno)



PRINCIP RADA

- Zasniva se na **Pijezoelektričnom efektu** koji su eksperimentalnim putem otkrili braća Pjer i Žak Kiri 1880. Oni su primetili da izvesni dielektrični materijali monokristalne strukture kada se mehanički naprežu razvijaju električni potencijal.
- Najpoznatiji prirodni pijezo-materijali su: kvarc (SiO_2), Rošelova so, Senjetova so, amonijum-dihidrogen-fosfat i turmalin.
- Razvojem tehnologije sintetizovani su mnogi veštački polarizovani materijali na bazi barijum-titanata (BaTiO_3), olovo-titanata (PbTiO_3) i olovo-cirkonata (PbZrTiO_3 , akronim PZT), koji su poznati pod zajedničkim nazivom pijezokeramika.

- Pijezoefekt tumači se nastankom ili izmenom dipolnog momenta P prilikom pomeranja električnih nanelektrisanja q pod delovanjem mehaničkog naprezanja.
- Ovo je direktni pijezoefekt, dok se promena srednjeg rastojanja l između centara dipola pod uticajem električnog polja E označava kao inverzni pijezoefekt.
- imaju izraženu osetljivost na delovanje radijacije i temperature.

Dobre osobine pijezomaterijala su:

- ✓ odlični generatori napona (i do 100 kV);
- ✓ imaju intenzitet otkaza reda 10^{-6} h^{-1} ; i
- ✓ maju dimenzije i do 100 puta manje u poređenju sa sličnim elementima od klasičnih materijala.

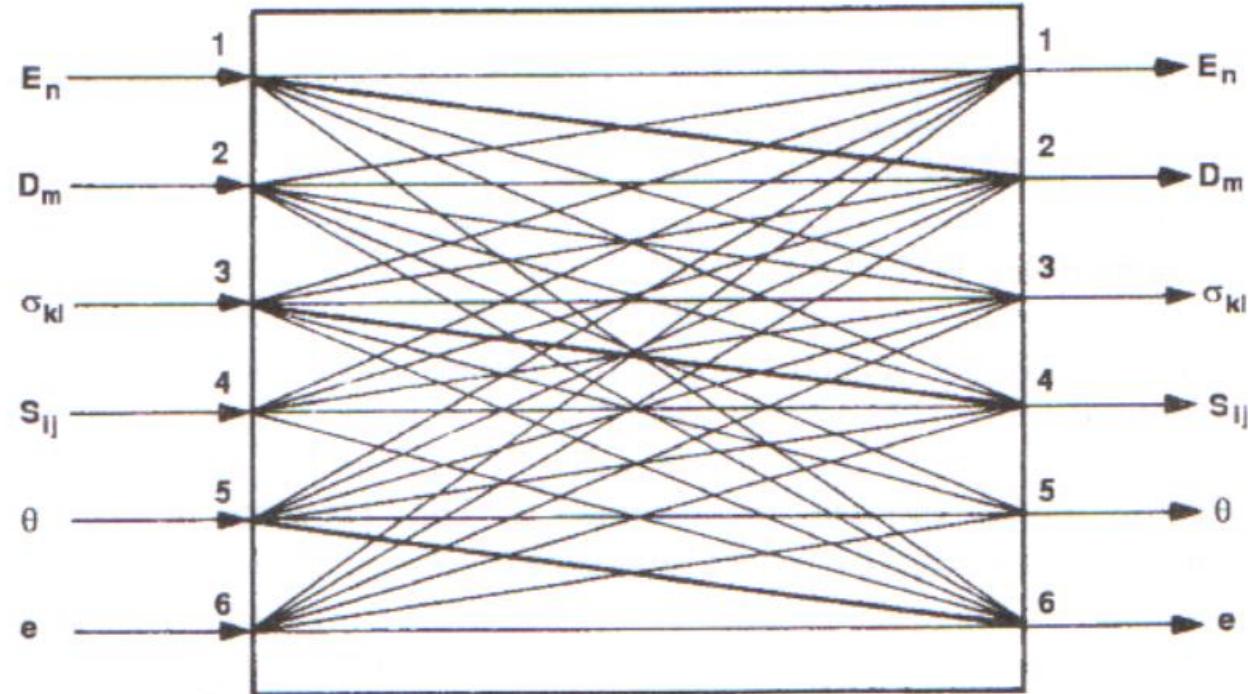
Loše osobine su osetljivost na delovanje

- **radijacije** i
- **temperature**

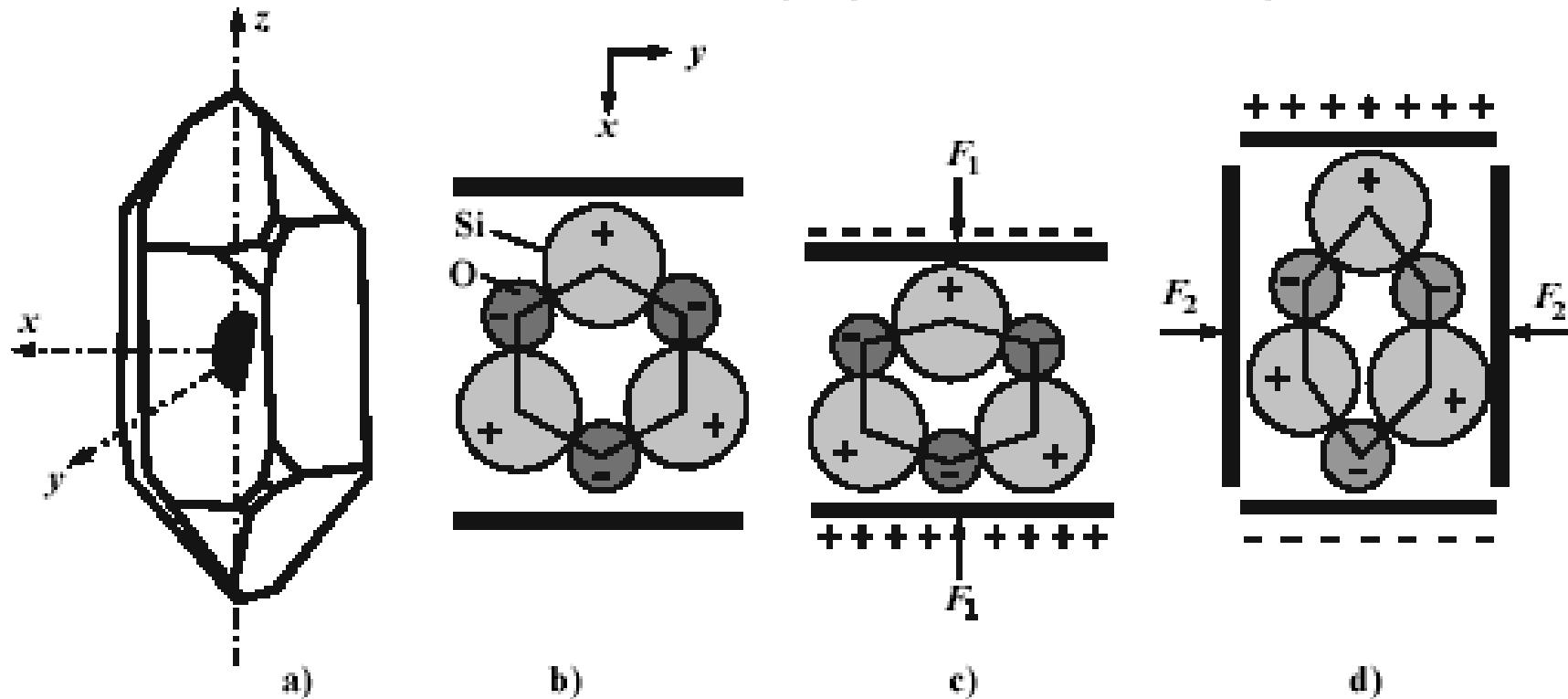
Stanje pijezoelektričnog dielektrika, u opštem slučaju, zavisi od odnosa električnih, mehaničkih i toplotnih veličina.

To stanje se predstavlja kao funkcionalna zavisnost :

- električnog polja E ,
- električne indukcije D (ili polarizacije P),
- mehaničkog naprezanja σ ,
- mehaničke deformacije S ,
- temperature θ , i
- entropije e .

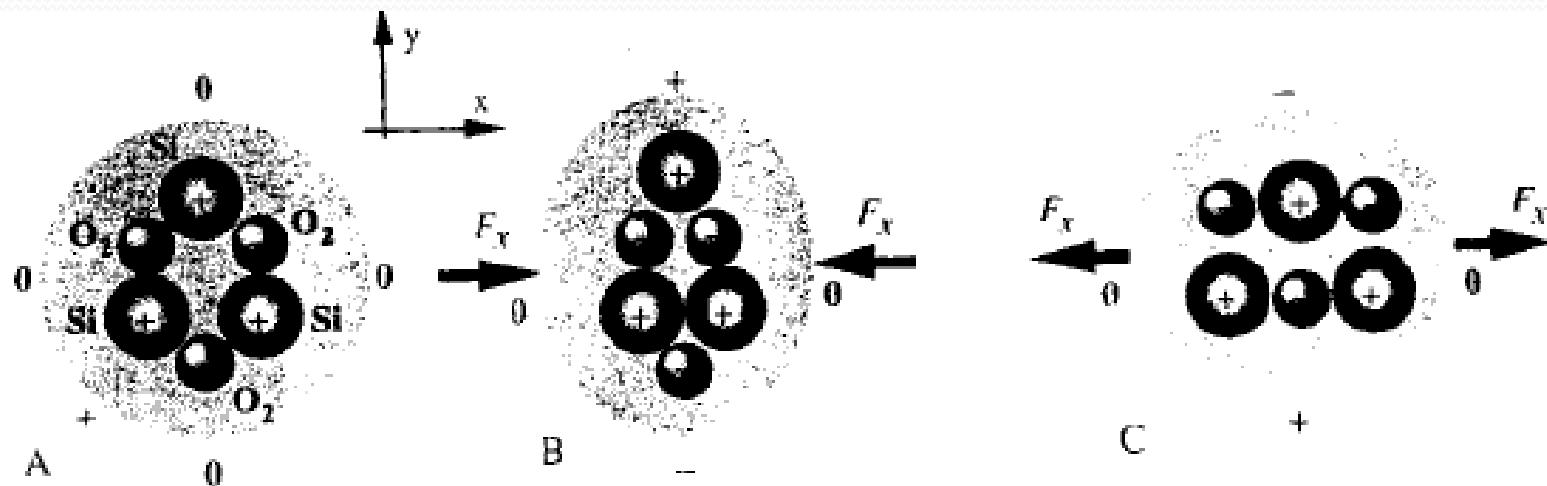


Grafička interpretacija ove zavisnosti prikazuje pijezoelement kao **složen multivarijabilni sistem**.



Fenomen pijezoelektričnog efekta: a) kristal kvarca, b) neopterećeni kristal, c) mehaničko opterećenje duž ose X, d) mehaničko opterećenje duž ose Y

- Ako se djeluje silom na neki kristal, tada dolazi do udaljavanja atoma kristala u rešetki od normalnog položaja.



- Ovaj je pomeraj proporcionalan sili delovanja i za stacionarno stanje vredi izraz:

$$x = -\frac{1}{k} F$$

gdje je k – krutost kristala [Nm⁻¹] (tipično je 2·10⁹ Nm⁻¹)

- Dinamička zavisnost između x i F izražava se pr. funkcijom 2. reda:

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1/k}{1 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + \frac{s^2}{\omega_n^2}}. \quad (\text{tipično je } \omega_n \approx 60 \text{ do } 600 \text{ s}^{-1}, \xi \approx 0.01)$$

- Deformacija rešetke piezoelektričkog kristala rezultira pojavom nanelektris. proporcionalnoga deformaciji x (direktni piezoelektrički efekt):

$$q = Kx = \frac{K}{k} F = k_p F$$

gdje je k_p - piezoelektrička konstanta (tzv. piezomodul).

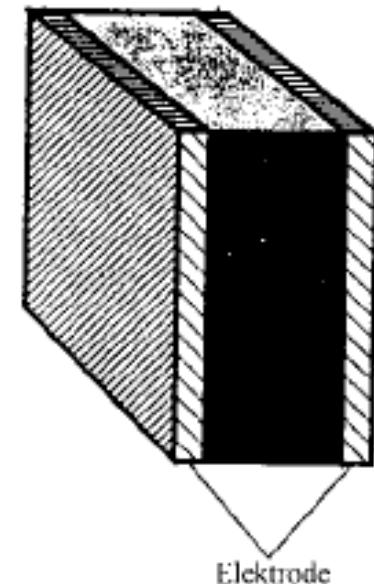
- Za kvarc (kvarcni kristal, SiO_2): $k_p = 2,3 \cdot 10^{-12}$ [As/N].
- Za bariumtitanat (piezokeramika, BaTiO_3): $k_p = 250 \cdot 10^{-12}$ [As/N].
(Nedostatak: piroelektrički efekt)
- Dakle, piezoelektrički kristal daje direktno električki izlaz i nije potreban dodatni sekundarni senzor pomjeraja.

- Postoji i obrnuti (inverzni) efekt kristala:
 - ◆ Prikloženi napon U na kristal izaziva mehaničko izduženje (deformaciju) x kristala:
$$x = k_p U \quad - \quad \text{inverzni piezoelektrički efekt}$$

\rightarrow važno za ultrazvučne pretvarace.
- Da bi se mogla mjeriti količina elek., kristal se umeće između pločastih elektroda te se na taj način formira kondenzator kapaciteta:

$$C_N = \frac{\epsilon_0 \epsilon A}{d}$$

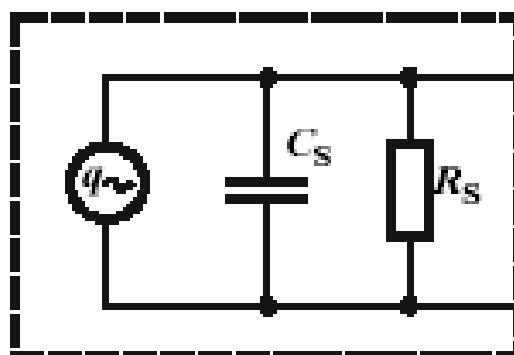
gdje je: d - debljina kristala
 A - površina ploče kristala



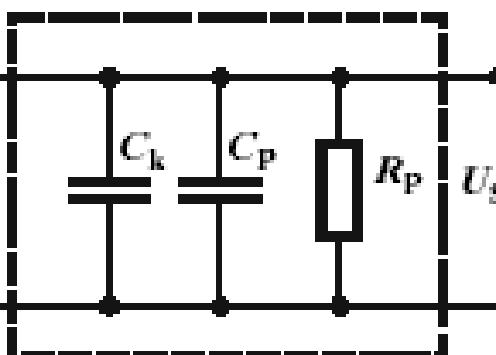
$$R = R_s R_p / (R_s + R_p) \quad \text{i} \quad C = C_s + C_k + C_p .$$

Izlazni napon senzora je:

$$U_s(s) = \frac{R/sC}{R + 1/sC} I(s) .$$

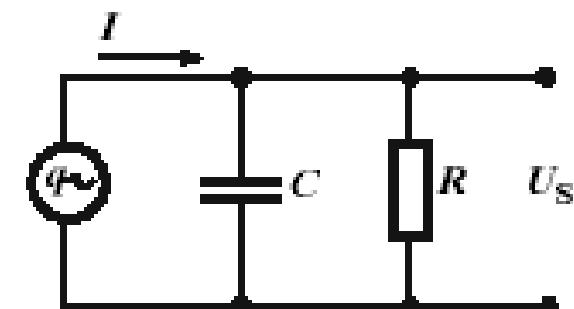


PIJEZOELEKTRIČNI SENZOR



PRIKLJUČNI VODOVI I ULAZNI
KRUG MERNOG UREĐAJA

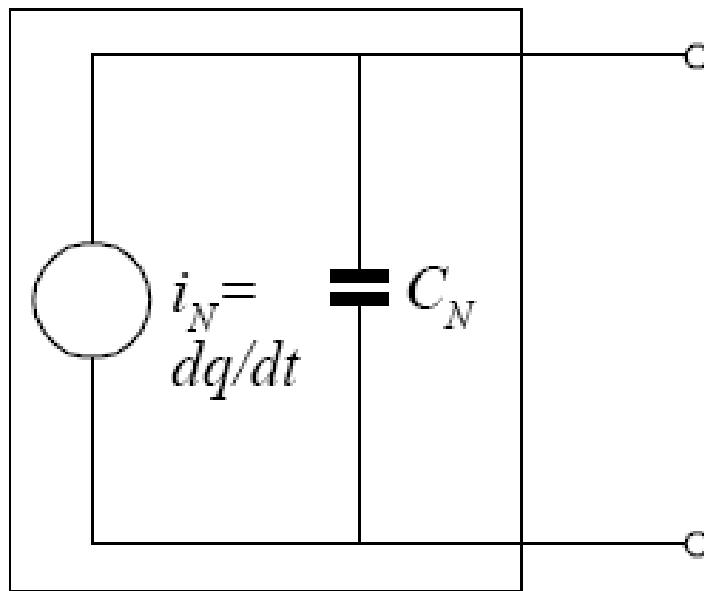
a)



b)

Ekvivalentna šema pjezoelektričnog senzora: a) potpuna šema, b) upravljeni model

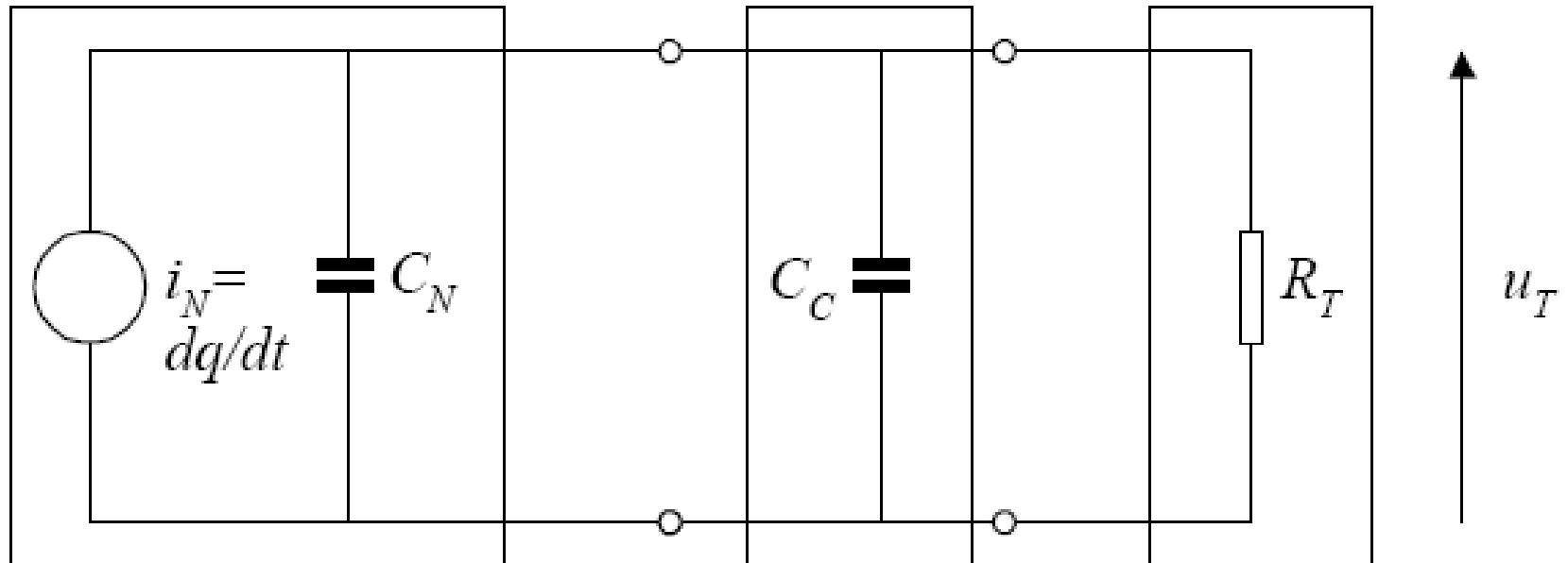
Ekvivalentna šema piezoelektričnega kristala



$$i_N = \frac{dq}{dt} K \frac{dx}{dt}; \quad \frac{I_N(s)}{X(s)} = Ks$$

- Dakle, uz konstantnu silu F struja i_N bit će jednaka nuli.

- Ako se piezoelektrični senzor direktno spoji na čisti otpor R_T preko kabla, za koji se može pretpostaviti da je čisti kondenzator kapaciteta C_c , dobije se sistem prikazan na slici:



Piezoelektrični
kristal

Kapacitivni
vod

Opterecenje

- Prenosna funkcija izlaznog napona u_T u odnosu na struju i_N je:

$$\boxed{\frac{U_T(s)}{I_N(s)} = \frac{R_T}{1 + R_T(C_N + C_C)s}},$$

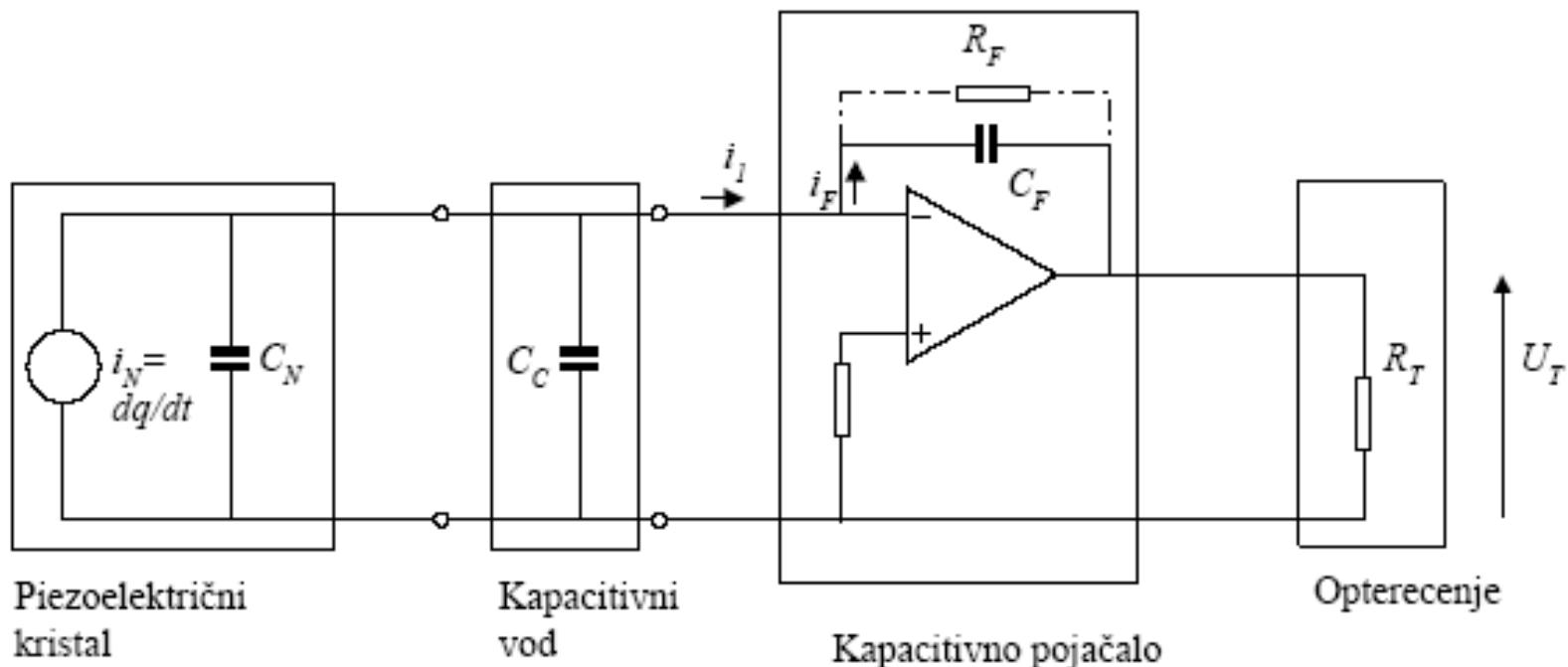
a u odnosu na mjerenu silu F :

$$\frac{U_T(s)}{F(s)} = \frac{U_T(s)}{I_N(s)} \frac{I_N(s)}{X(s)} \frac{X(s)}{F(s)}$$

$$\boxed{\frac{U_T(s)}{F(s)} = \frac{R_T}{1 + R_T(C_N + C_C)s} K s \frac{1/k}{1 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + \frac{s^2}{\omega_n^2}}} \quad (\text{A})$$

$$\frac{U_T(s)}{F(s)} = \frac{k_p}{C_N + C_C} \frac{\tau s}{1 + \tau s} \frac{1}{1 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + \frac{s^2}{\omega_n^2}}; \quad k_p = \frac{K}{k}, \quad \tau = R_T(C_N + C_C)$$

- Dva su nedostatka ovog bazičnog mjernog sistema:
 1. osjetljivost u stacionarnom stanju jednaka je: $\frac{k_p}{C_N + C_C}$, dakle, zavisna je od kapaciteta kabla, a time i o dužini i tipu kabla;
 2. zbog člana $\frac{\tau s}{1 + \tau s}$ ne mogu se mjeriti konstantne i sporopromjenljive sile.
- Ovi se nedostaci mogu znatno zaobići uvođenjem kapacitivnog pojačala. Kapacitivno pojačalo je integrator koji daje izlaz proporcionalan $\int i_N dt$
- Na taj način, za konstantnu silu sistem ne daje izlaz jednak nuli.



$$i_1 + i_F = 0$$

$$i_F = U_T S C_F$$

$$i_F = \frac{dq_F}{dt} = C_F \frac{dU_T}{dt} \quad (B)$$

$$i_1 = -i_F = -C_F \frac{dU_T}{dt}$$

- S obzirom da je pad napona kroz C_N i C_C približno jednak nuli, ne teče struja kroz C_N i C_C , pa je:

$$i_1 = i_N = \frac{dq}{dt}$$

- Odakle je:

$$\boxed{\frac{dq}{dt} = -C_F \frac{dU_T}{dt}} \quad (\text{C})$$

$\boxed{U_T = -\frac{1}{C_F}q}$ - prenosna karakteristika idealnoga kapacitivog pojačala.

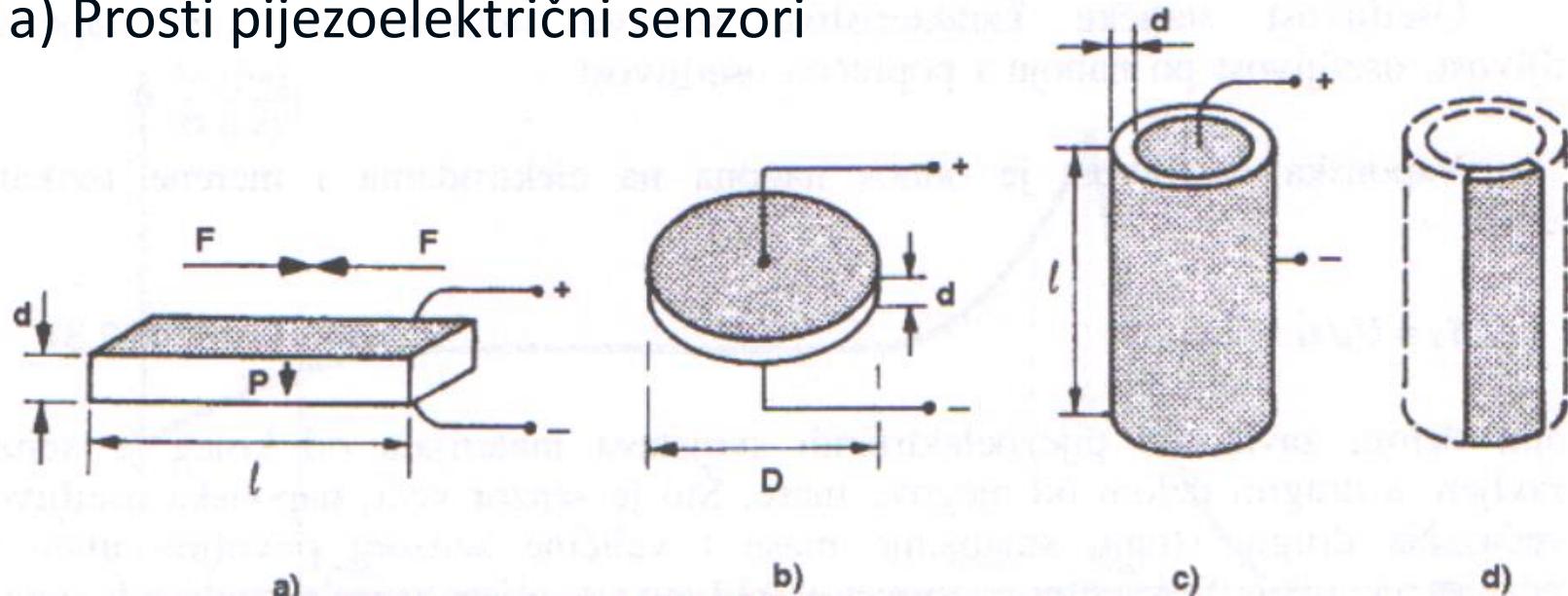
- Iz jednadžbi (A), (B), (C) slijedi:

$$\boxed{\frac{U_T(s)}{F(s)} = \frac{k_p}{C_F} \frac{1}{1 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + \frac{s^2}{\omega_n^2}}}$$

- Osjetljivost je sada: k_p/C_F - ne zavisi o kapacitetu kabla.

NAČIN GRADNJE

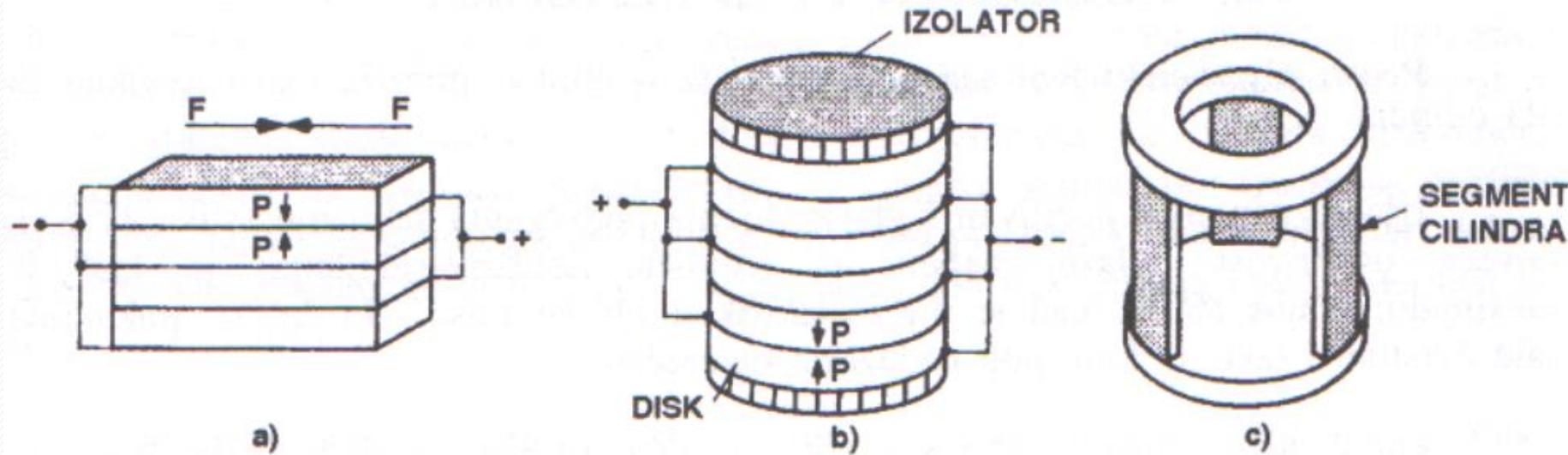
a) Prosti piezoelektrični senzori



a) traka, b) disk, c) cilindar, d) uzdužni segment cilindra

Najveća osetljivost (izlazni napon na jedinicu istezanja/sabi-janja) je kad je maksimalni odnos l/d , tj. kad je piezoelektrik u obliku trake ($l > 4d$). Traka ima malu čvrstinu i lako se lomi. Poseban tip trake je piezokabl (tribokabl), koji se polaže poprečno na kolovoz i služi kao senzor za detekciju vozila u saobraćaju.

b) Višestruki pijezoelektrični senzori



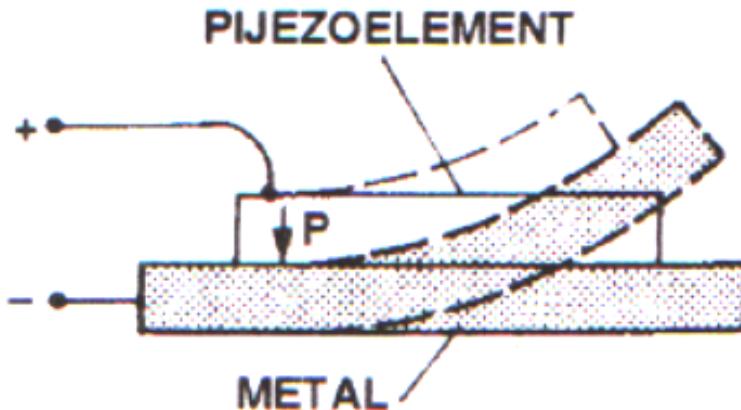
a) lamelni, b) diskoidni, c) trosegmentni

Nedostaci prostih pijezoelektričnih senzora su:

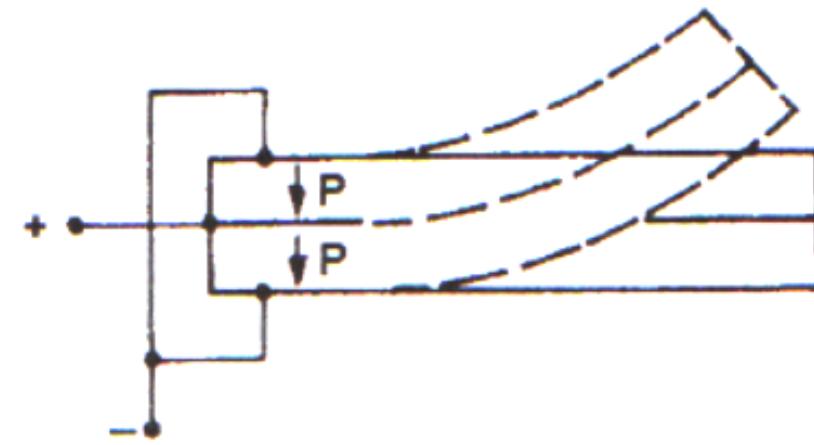
- mali izlazni napon i
- slaba mehanička čvrstina.

Tipična debljina višeslojnog senzo-ra je 5-10 mm , pojedinih slojeva 0,1-0,25 mm , a osetljivost je 2-10 V/mm

c) Jednomorfni i dvomorfni piezoelektrični senzori



jednomorfni



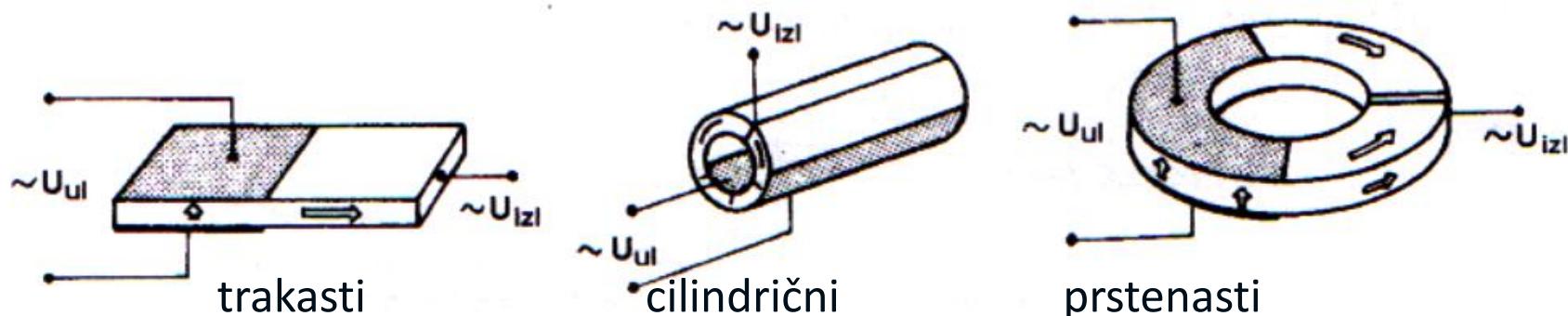
dgomorfni

Primenjuju se za detekciju većih mehaničkih pomeraja.

Jednomorfni senzor pravi se od piezoelektrične trake nalepljene na tanku metalnu traku. Na jednom kraju senzor je učvršćen, a na slobodnom kraju deluje mehaničko opterećenje.

Veće pomeranje slobodnog kraja (i do 100 mm) i veća osetljivost postižu se pomoću **dvomornog senzora**. To su dve različite piezoelektrične trake nalepljene jedna na drugu, tako da se jedna delovanjem opterećenja sabija, a druga isteže.

c) Transformatorski piezoelektrični senzori



Sastoje se iz dve piezoaktivne sekcije:

Prva sekcija radi na principu obratnog piezoefekta (ulazni naponski signal pobuđuje mehaničke oscilacije u oblasti rezonantnih frekvencija), a druga sekcija radi na principu direktnog piezoefekta.

Senzori ovog tipa upotrebljavaju se za merenje električnih veličina (struje, napona, frekvencije).

Dele se u dve velike skupine:

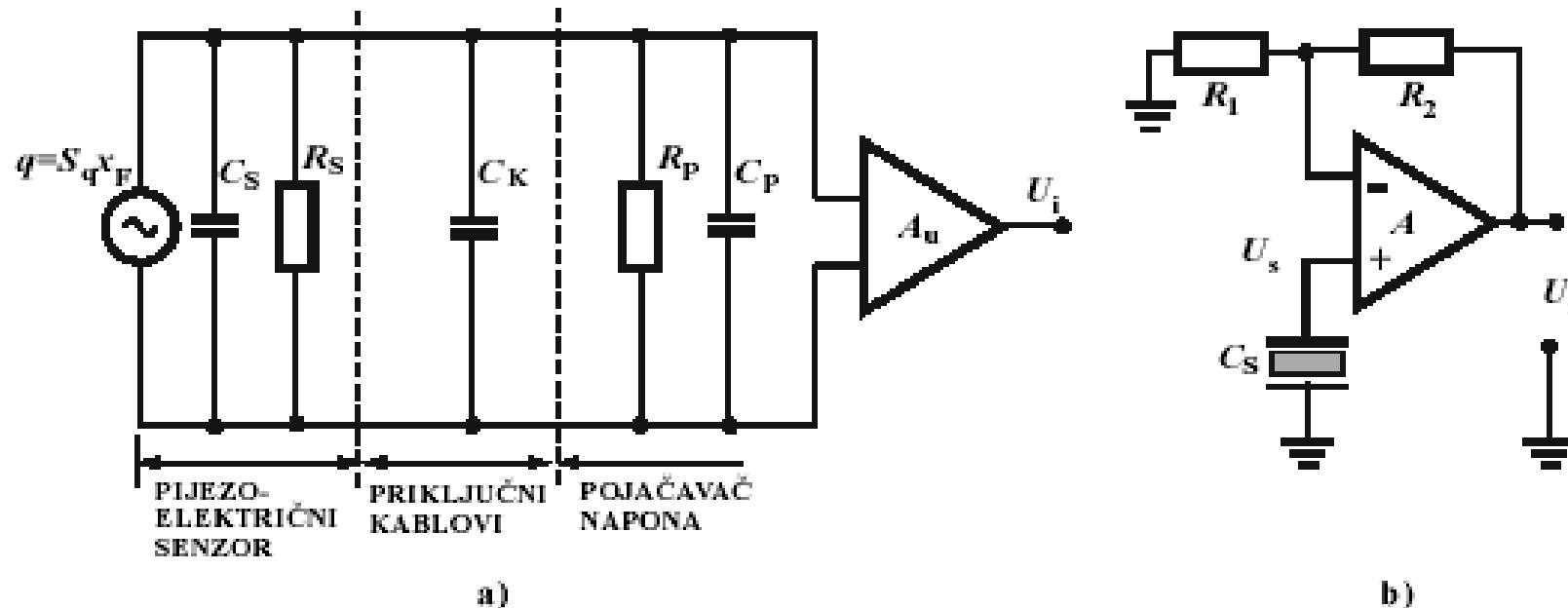
- **transformatori napona**, sa izlaznim naponom koji je veći od ulaznog pri relativno maloj izlaznoj struji (do 1 mA) i koeficijentom transformacije do 100 za opterećeni, odnosno do 1000 za neopterećeni izlaz senzora;

sa izlaznim naponom koji je manji od ulaznog, pri čemu je izlazna struja relativno velika (do 10 A).

Šeme sa pojačavačem napona. Na slici je prikazana jedna elektronska šema sa piezoelektričnim senzorom, priključnim vodovima i naponskim pojačavačem. Ovakva šema pogodna je za senzore od kvareca, koji imaju male dimenzije, mali kapacitet i visoku naponsku osetljivost. Ako se zanemare efekti otpora senzora R_s i otpora priključnih vodova R_k , izlazni napon je:

$$U_i = \frac{Q}{C_s + C_k + C_p} A_u,$$

gde je A_u naponsko pojačanje.



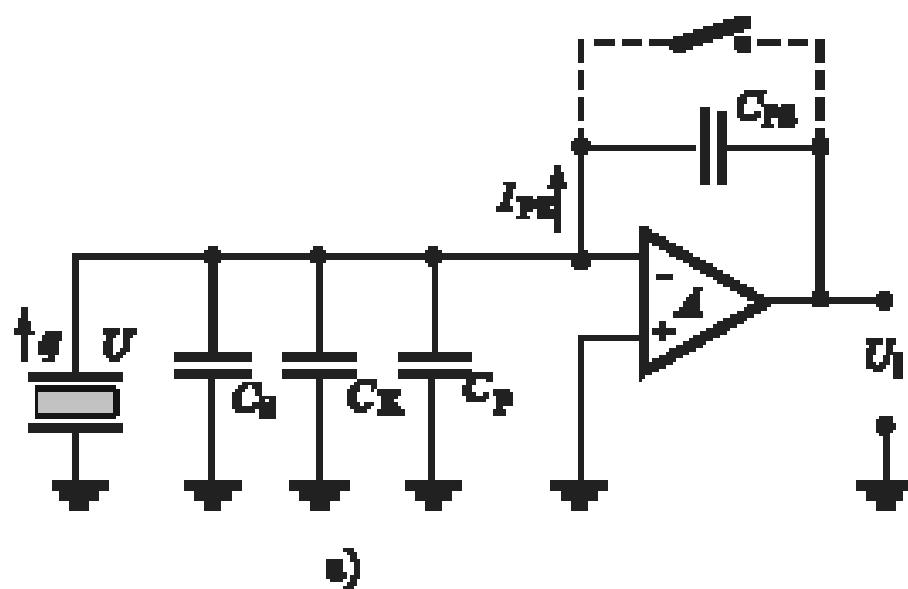
a)

b)

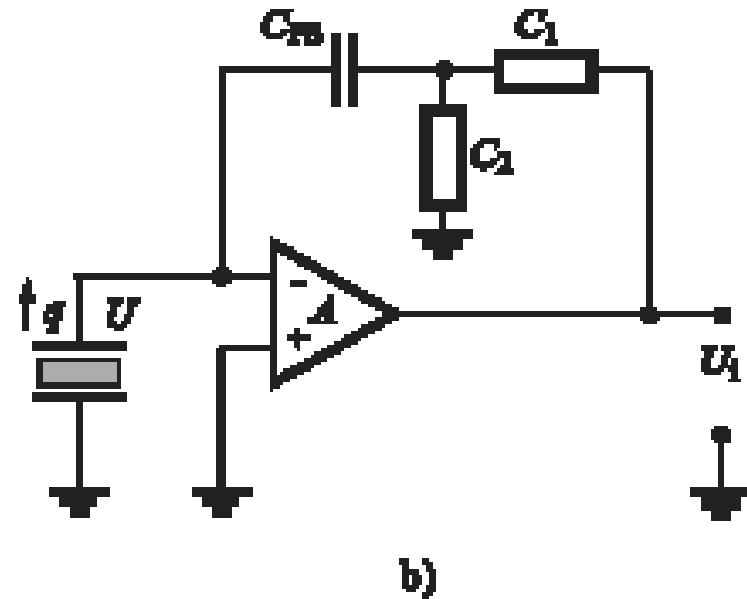
$$Q = C_q x_f = S_u C_s x_f = U_s C_s,$$

$$U_i = \frac{C_s}{C_s + C_k + C_p} U_s A_u.$$

Šema sa pojačavačem naboja. Ove šeme patentirao je W.M.Kistler 1950, a primenjuju se za senzore od keramike (PZT) ili organskih materijala (PVDF), koji imaju veće dimenzije, kapacitet i visoku osetljivost po naboju. Senzor je uvek priključen na invertujući ulaz pojačavača sa velikim pojačanjem u otvorenom A , te velikom ulaznom impedansom do $10^{14} \Omega$, koja se postiže pomoću MOSFET ulaznog stepena. U povratnoj sprezi pojačavača naboja je kondenzator C_{ps}



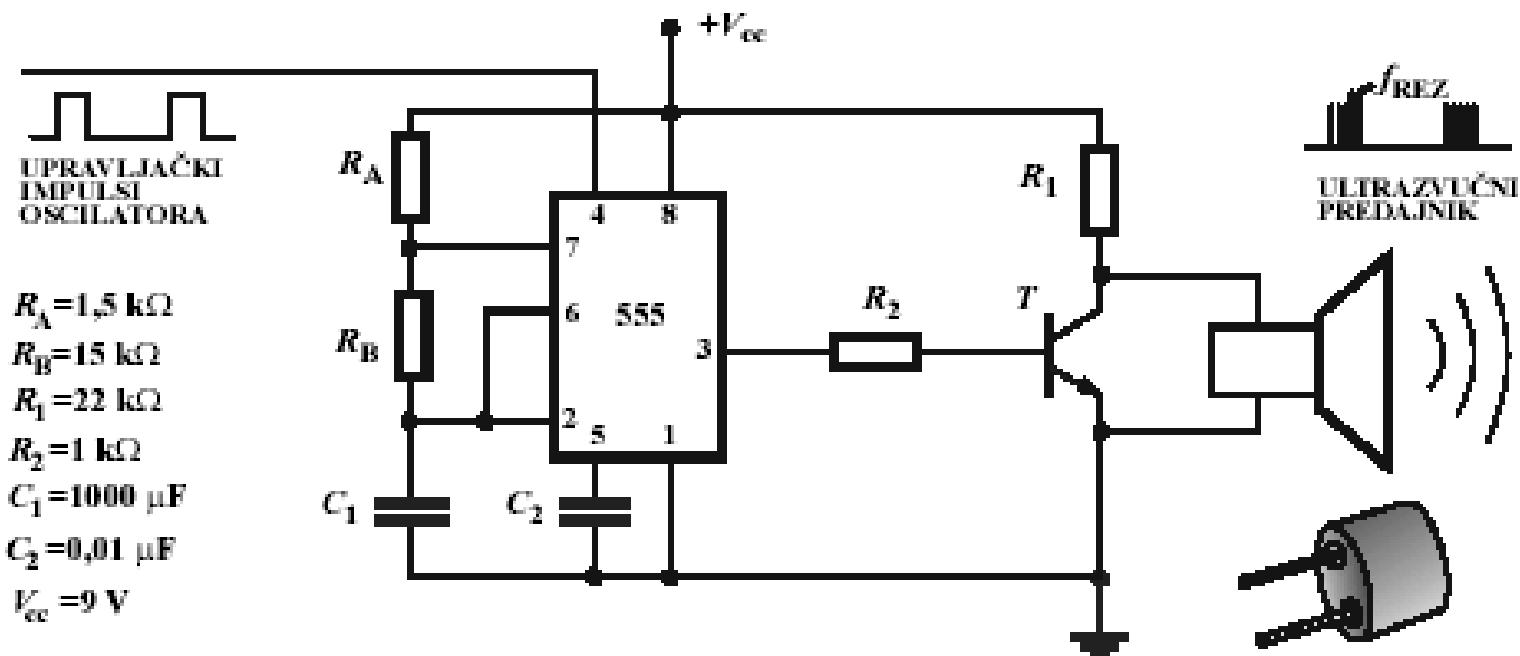
Pijezoelektrični senzor priključen na pojačavač naboja: a) prosta šema,
b) šema sa povećanom osetljivošću



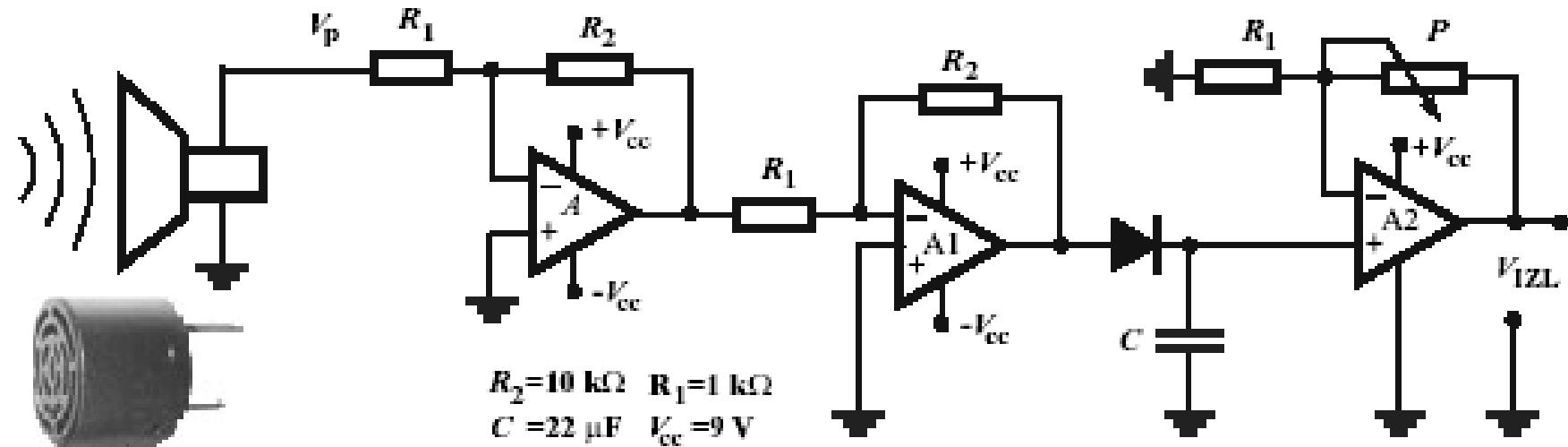
Šema za generisanje ultrazvuka

$$f = \frac{1,44}{(R_A + R_B)C_1}.$$

Da bi odnos signal/pauza bio približno 50%, potrebno je da bude $R_B > R_A$. Za odabране vrednosti komponenti ($R_A = 1,5 \text{ k}\Omega$, $R_B = 15 \text{ k}\Omega$, $C = 1000 \mu\text{F}$) dobija se $f = 46 \text{ kHz}$. Tačna vrednost može da se postigne ako se umesto otpornika R_A stavi potenciometar. Ovi impulsi pojačavaju se pomoću $n-p-n$ tranzitora opšte namene, na primer 2N2222. Zavisno od izbora tranzistora računaju se vrednosti otpornika R_1 i R_2 . Pin 4 za eksterno resetovanje može biti spojen na $+V_{cc}$, ali je bolje da se sa jednog



Šema za prijem ultrazvuka. Pijezomembrana u prijemniku je najčešće fabrički priključena na megaomski otpornik i FET-tranzistor, na isti način kao što je piroelektrični senzor na slici 13.11b. Napon prijemnika V_p je mali i potrebno ga je pojačati na nivo pogodan za priključivanje na mikrokontroler. Ultrazučni echo signal prvo se pojačava oko 100 puta, a zatim poluvalno ispravlja pomoću jedne diode 1N4005 i kondenzatora C prema masi. Završno podešavanje izlaznog napona V_{OUT} na opseg 0 – 5 V realizuje se pojačavačem A3.



Elektronsko kolo ultrazvučnog prijemnika

Optoelektronski senzori

OPTOELEKTRONSKI SENZORI

PRINCIP RADA

Fizikalni osnov rada optoelektronskih senzora zasniva na **promeni parametara optičkog signala** sa promenom merene fizikalne veličine. Zbog toga, za razliku od otporničkih, kapaci-tivnih, elektromagnetskih senzora, ovi senzori nemaju galvan-ske i magnetne veze, već samo optičke (**optički senzori**).

Prednosti su:

- ✓ galvansko razdvajanje,
- ✓ jednostavnije šeme priključivanja,
- ✓ zaštita od šumova,
- ✓ pouzdaniji od klasičnih senzora (mogu da rade u uslovima delovanja jakog magnetskog polja, visoke temperature, električnih šumova i hemijske korozije).

Nedostaci :

- složenost izrade,
- složenost obrade signala,
- osetljivost na mehaničke vibracije,
- relativno visoka cena.

Osnovni parametri optičkog signala su:

- amplituda → amplitudna modulacija,
- frekvencija → frkvencijska modulacija,
- faza → fazna modulacija,
- polarizacija → polarizaciona modulacija i
- rasejavanje svetlosnog toka → modulacija apsorpcijom.

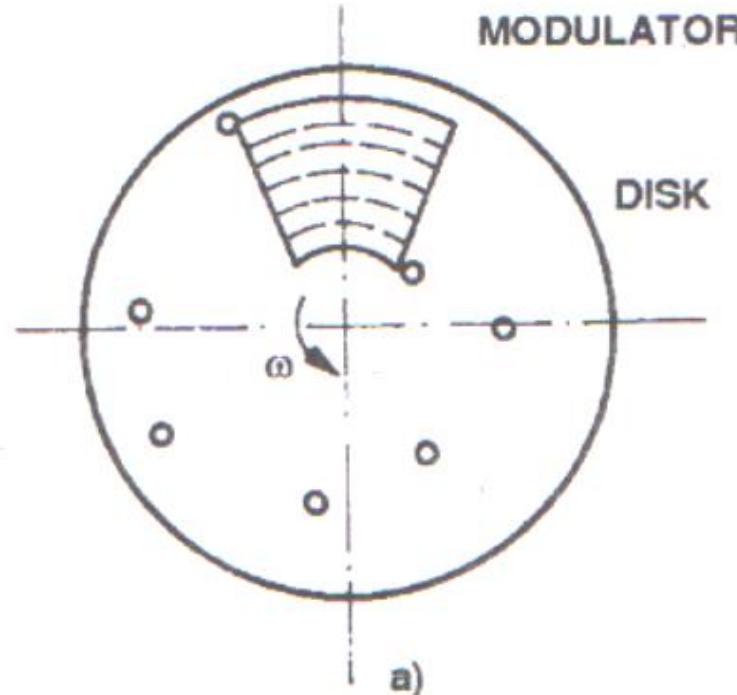
Modulatori. Upravljanje amplitudom, frekvencijom, fazom, polarizacijom i rasejavanjem realizuje se u modulatoru.

Mogu se podeliti prema:

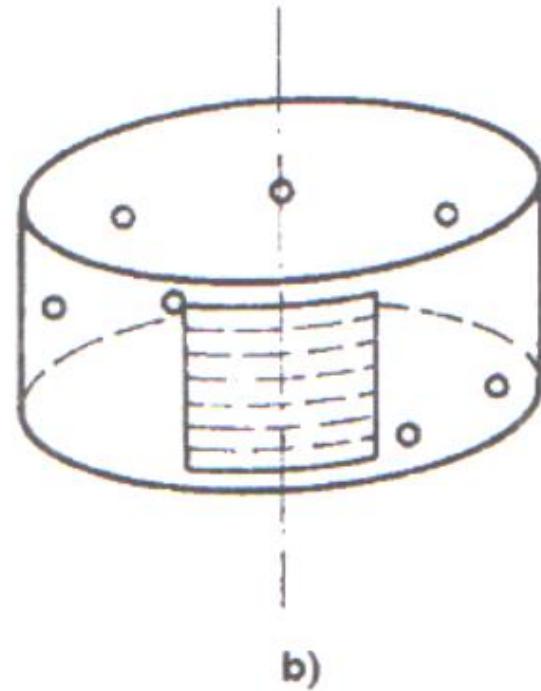
1) načinu rada

- integralni modulatori (vremensa promena ampl.)
- prostorni modulatori (raspodela ampl. u prostoru)

Optomehanički modulatori prostornog tipa



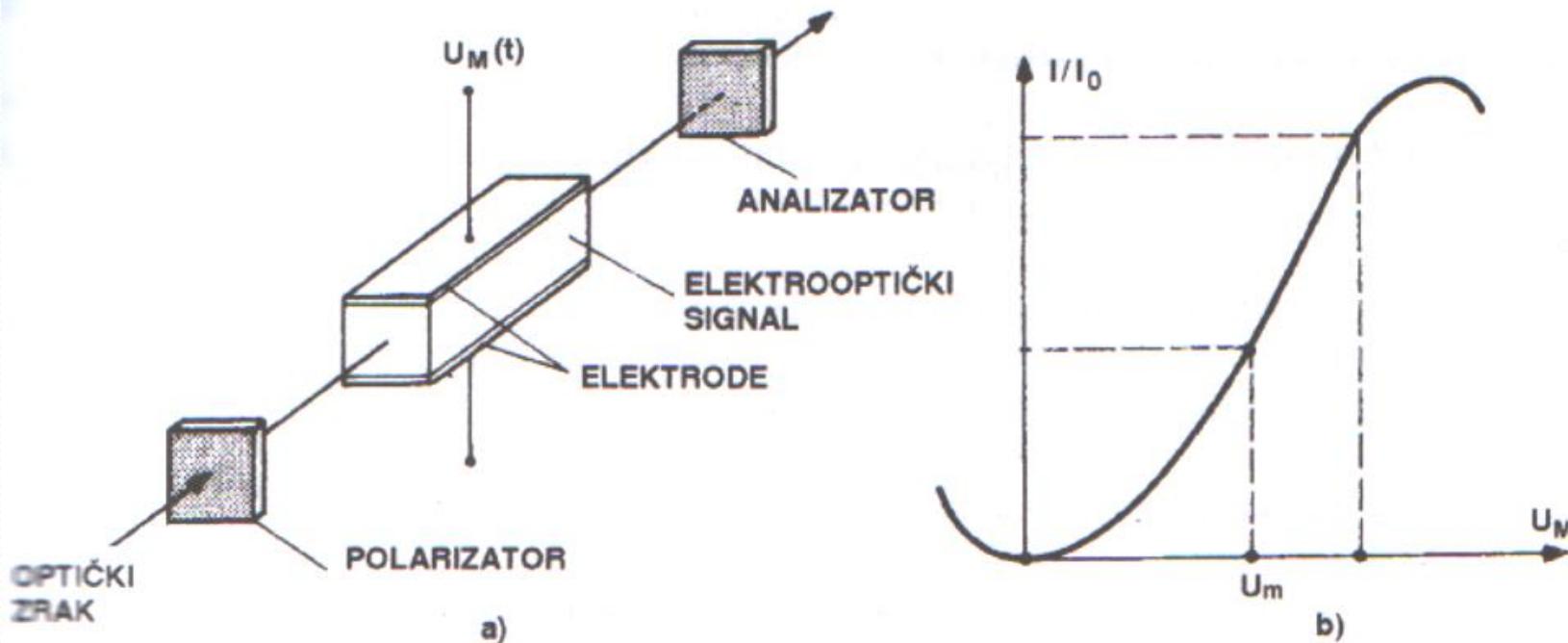
a) disk



b) beskonačna traka

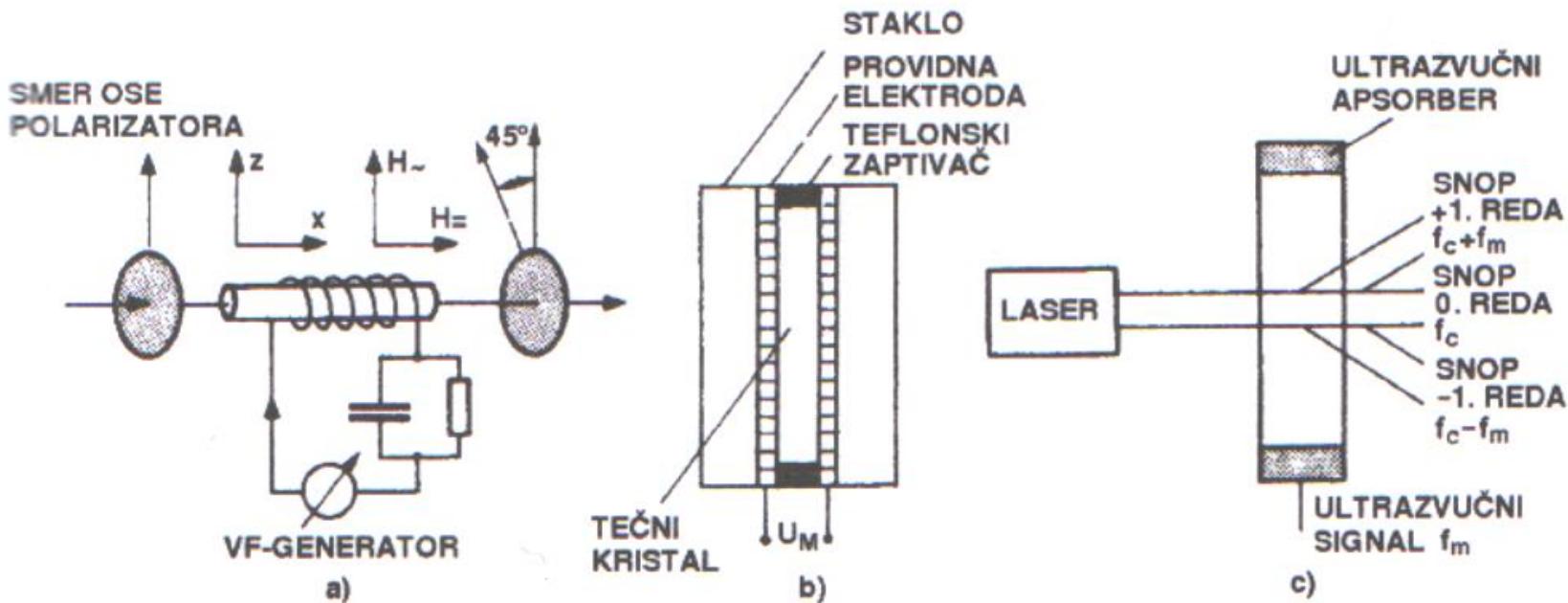
Optoelektronski modulatori grade se na osnovu principa Pokelsovog ili Kerovog elektrooptičkog efekta ili, ređe, na principu Koton-Mutonovog magnetooptičkog efekta.

Efekti se manifestuju u promeni indeksa loma pod uticajem upravljačkog električnog ili magnetnog polja.



Modulacija na bazi elektrooptičkog efekta:

a) Kerova ćelija, b)modulaciona karakteristika



Modulator: a) na bazi magnetooptičkog efekta, b) na bazi efekta rasejavanja,
c) na bazi akustičkooptičkog efekta

Efekt dinamičkog rasejavanja primenjuje se u tehnici senzora tek u novije vreme. Suština je u tome da se prozračnost nekih kristala smanjuje sa povećanjem istosmernog modulirajućeg napona na elektrodama

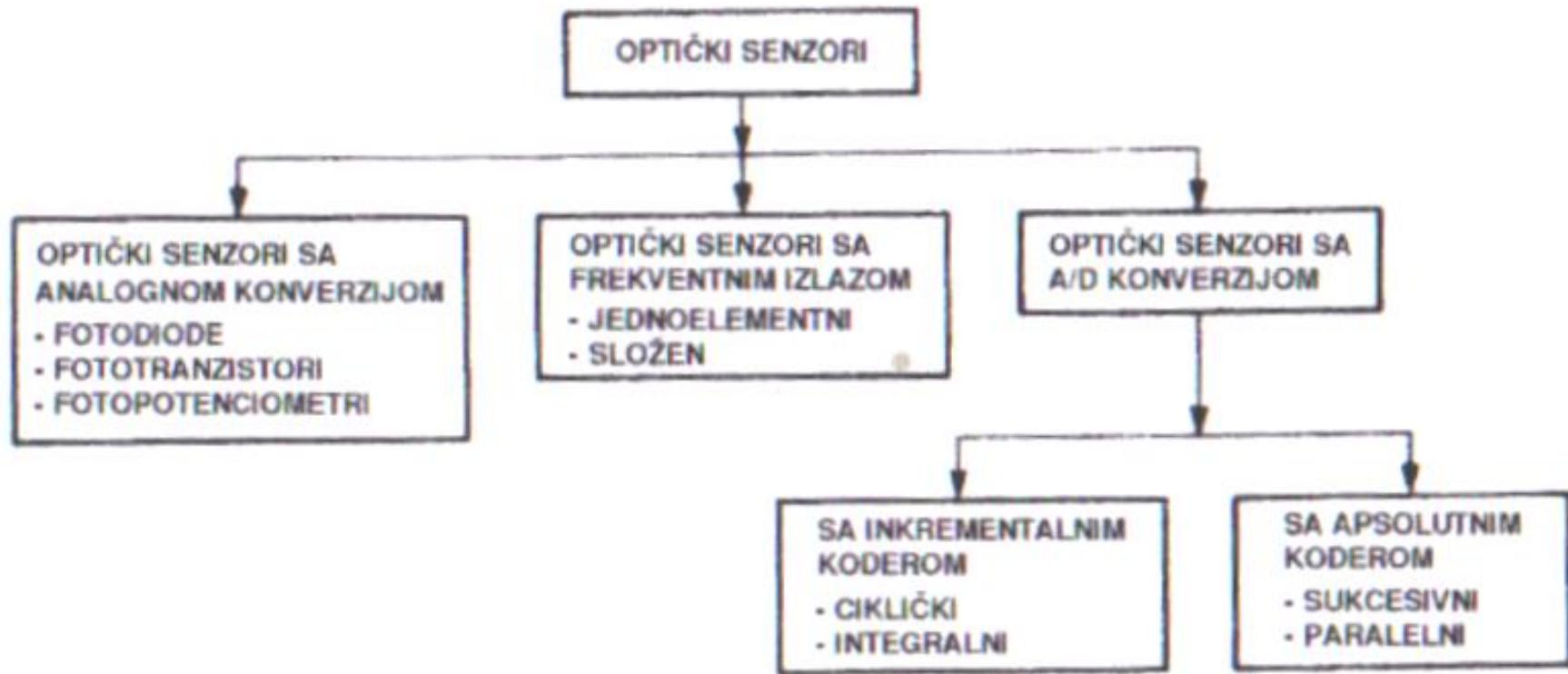
KLASIFIKACIJA OPTIČKIH SENZORA

Najpotpunija je klasifikacija na osnovu načina konverzije merene fizikalne veličine u mernu informaciju.

Na bazi ovog opšteg kriterija razlikuju se:

- senzori sa analognom konverzijom,
- senzori sa konverzijom analognog signala u signal sa promenljivim periodom ili frekvencijom i
- senzori sa analogno-digitalnom konverzijom.

KLASIFIKACIJA OPTIČKIH SENZORA

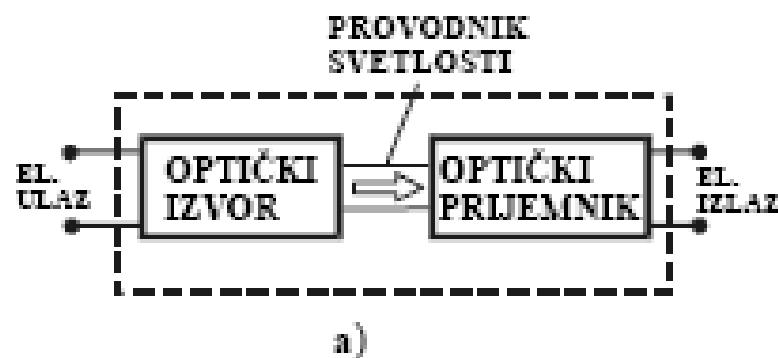


NAČIN GRADNJE OPTIČKIH SENZORA

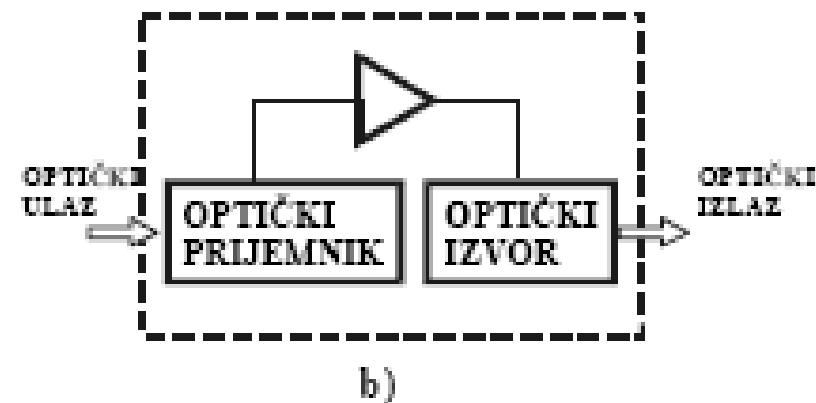
Optički senzori sastoje se od tri dela: izvora, prijemnika optičkog zračenja i prenosnog medija.

Između izvora i prijemnika veze mogu biti optičke ili električne.

Struktura optičkog para



unutrašnje veze optičke,



unutrašnje veze električne,

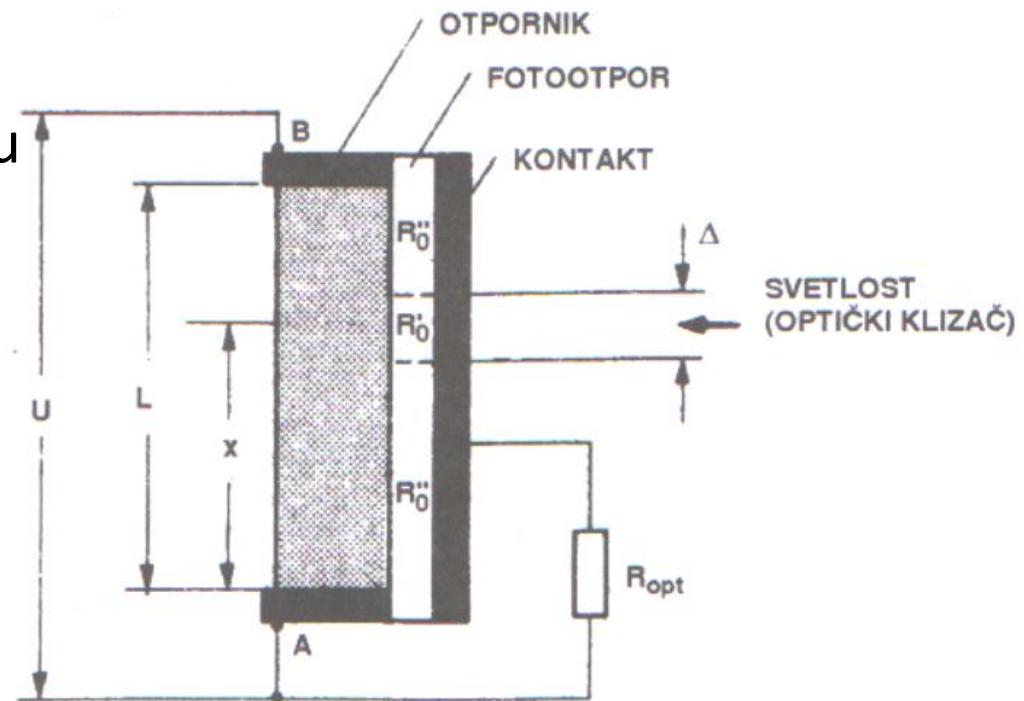
Optički izvor kao senzor. Kao izvori svetlosti najčešće se primenjuju LED-diode i laserske diode (LD).

Prijemnici svetlosti kao optički senzori. Prijemnik kao optički senzor konvertuje optičku energiju u električnu veličinu (struja, napon, otpor, kapacitet ili nanelektrisanje).

Razlikuju se dve velike grupe senzora optičkog zračenja:

Senzori prve grupe (kvantni detektori) detektuju optičku radijaciju na bazi fotoelektričnih efekata.

Primer optički fotopotenciometar



Senzori druge grupe apsorbuju fotone, pri čemu apsorbovana energija dovodi do promene temperature u materijalu od kojeg je napravljen senzor (**termički detektori**).

Najpoznatiji predstavnici ove grupe optičkih senzora su:

- termistor**, temperaturno osjetljivi poluprovodnički otpornik;
- bolometar**, dva termootpornika u diferencijalnom spoju koji mere promenu temperature proporcionalne ukupnom upadnom zračenju;
- termopar**, dva različita materijala spojena na jednom kraju (koji je izložen radijaciji) generišu *ems* na otvorenom kraju koji je u senci;
- piroelektrični senzor**, temperaturno osjetljivi kapacitivni senzor sa piro-električnim materijalom između elektroda.

Optički senzori prve grupe imaju uži frekvencijski spektar, veću osjetljivost i brže vreme odziva.

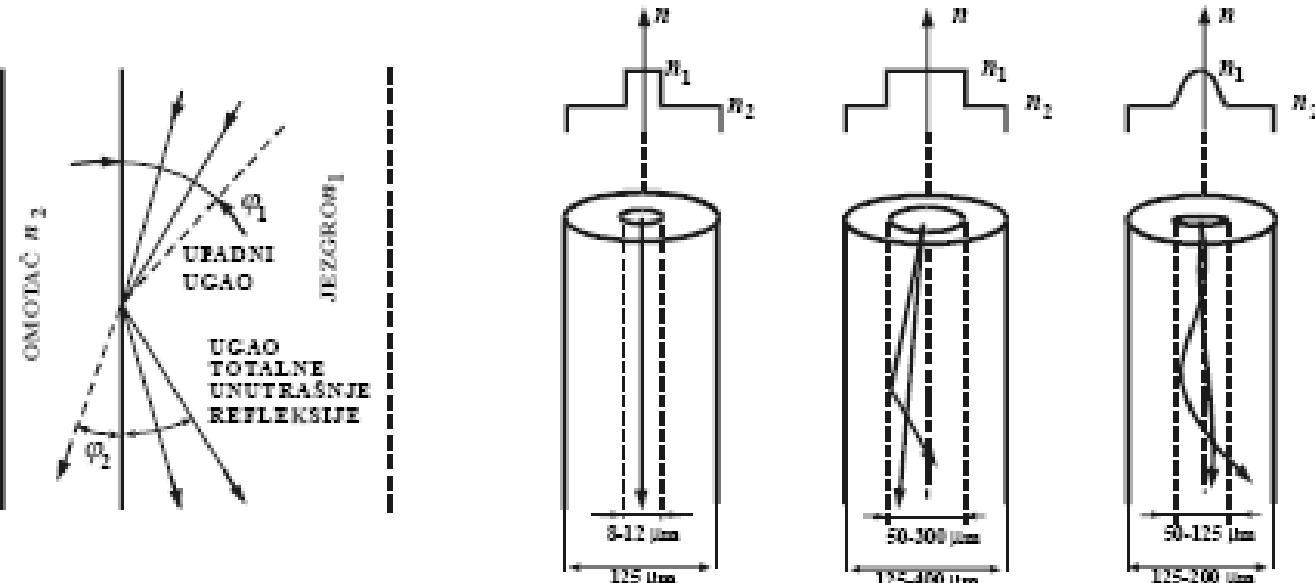
Optičko vlakno kao senzor

Optička vlakna primenjuju se za gradnju senzora od 1977. god. Zbog svojih dobrih karakteristika predstavljaju glavne elemente u specijalnim senzorima za praćenje:

- akustičkih veličina,
- magnetskih veličina,
- temperature,
- pritiska,
- brzine,
- ubrzanja itd.

Senzori na bazi optičkog vlakna su:

- interferometarski** (merena fizikalna veličina izaziva interferencijske efekte) ili
- **amplitudni** (merena veličina modulira intenzitet svetlosti).

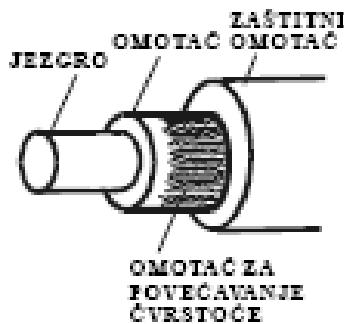


a)

b)

c)

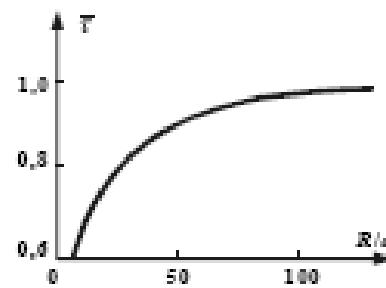
d)



e)



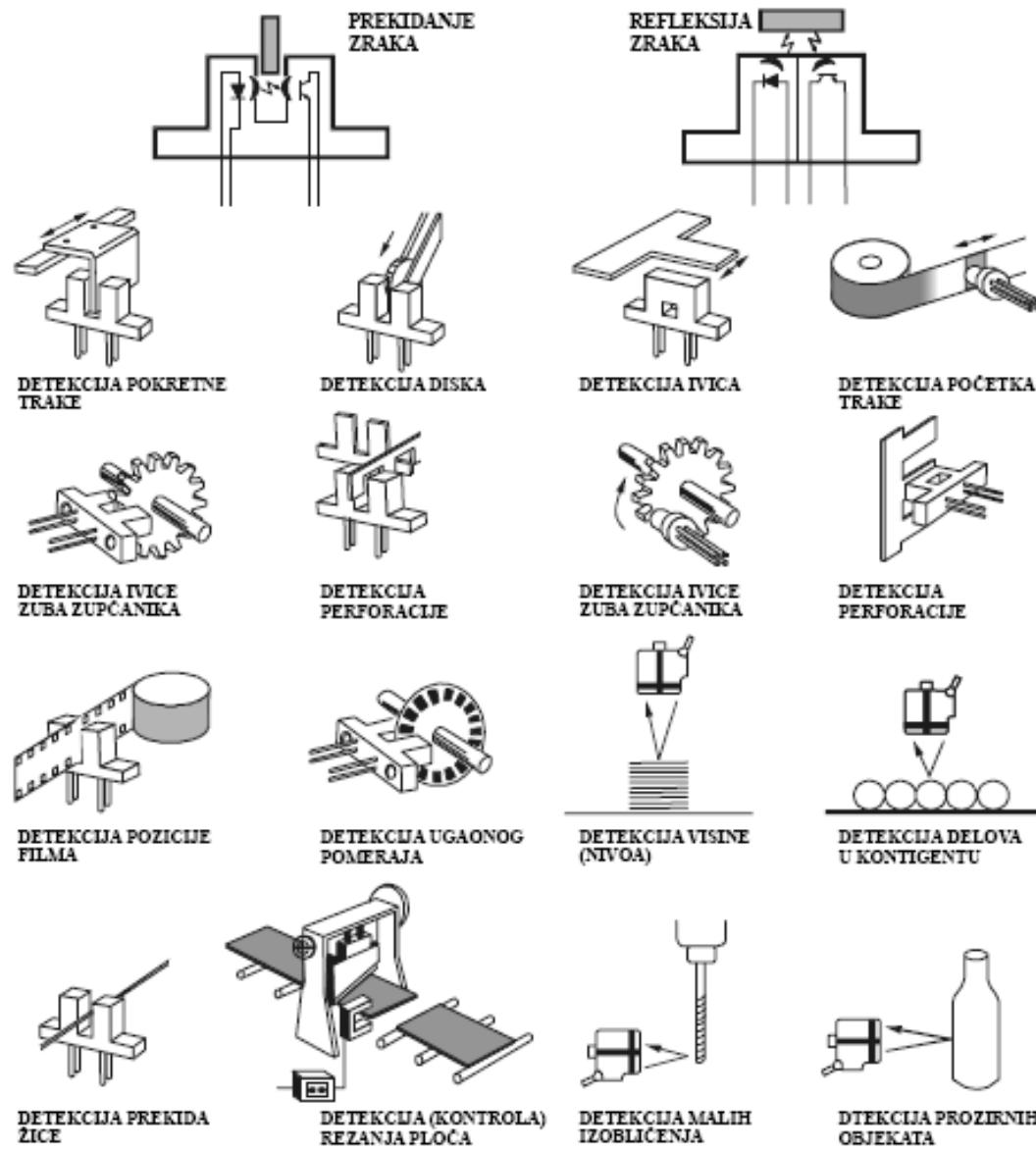
f)



g)

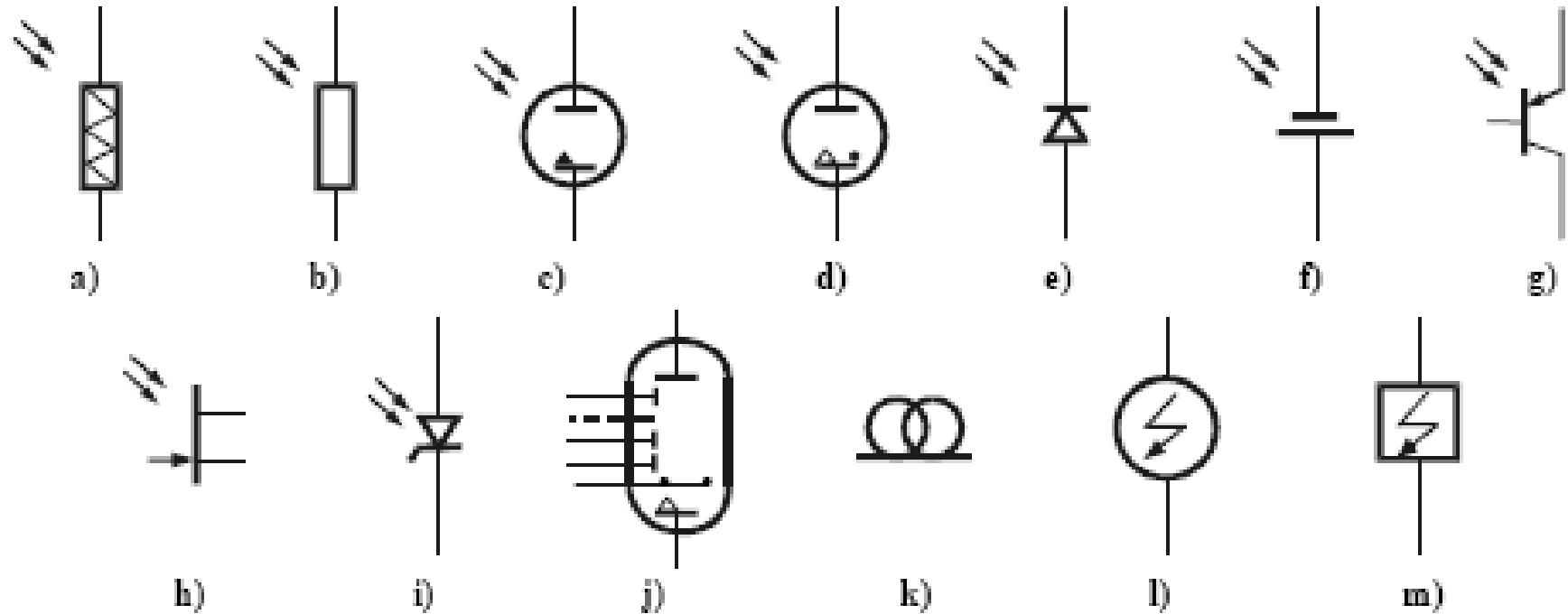
Optičko vlakno: a) totalna refleksija, b) monomodno vlakno sa stepenastom pro-menom indeksa prelamanja svetlosti, c) multimodno vlakno sa stepenastom pro-menom indeksa prelamanja, d) multimodno gradijentno vlakno, e) struktura vlakna f) simetrizacija snopa, g) provođenje svetlosti savijenog vlakna

Primeri optičkih senzora na bazi optičkog predajnika (LED) i optičkog prijemnika (fototranzistora)



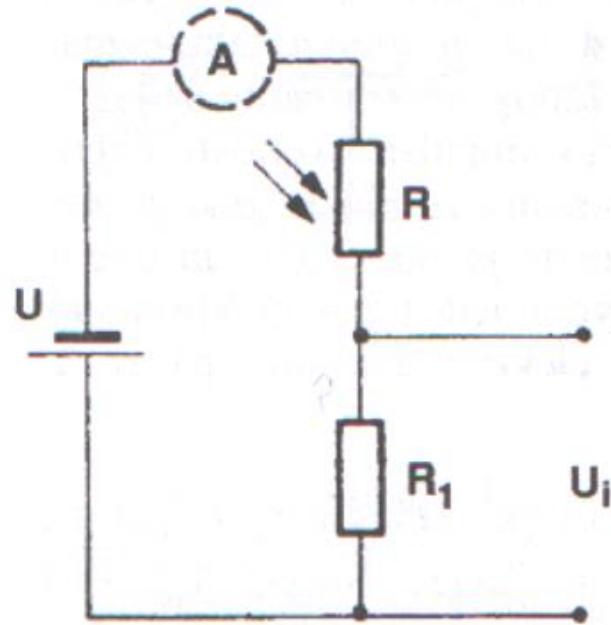
MERNE ŠEME SA OPTIČKIM SENZORIMA

Označavanje optičkih senzora

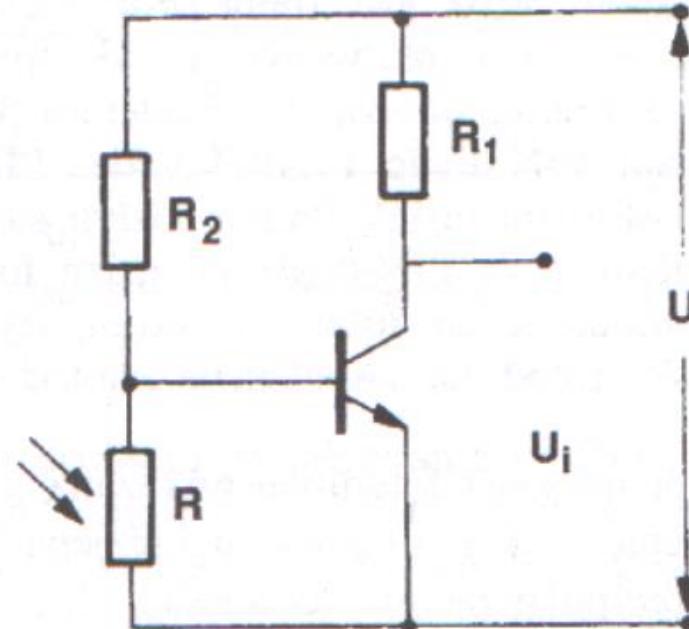


- a) opšta oznaka, b) fotootpornik, c) vakuumska fotoćelija, d) gasna fotoćelija
e) fotodioda, f) fotoelement, g) fototranzistor, h) FET-foto-tranzistor, i)
phototriistor, j) fotomultiplikator, k) optičko vlakno, l) optički predajnik, m)
optički prijemnik

Šeme sa prijemnicima na bazi unutrašnjeg fotoefekta



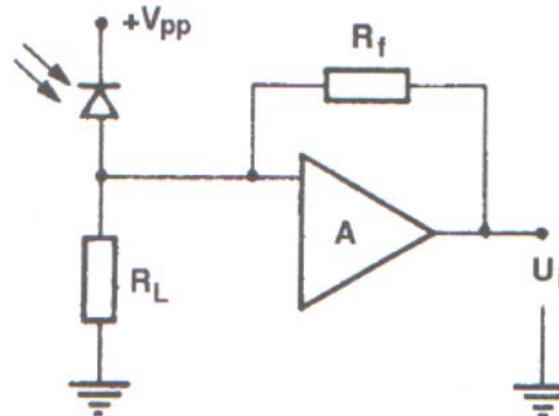
a)



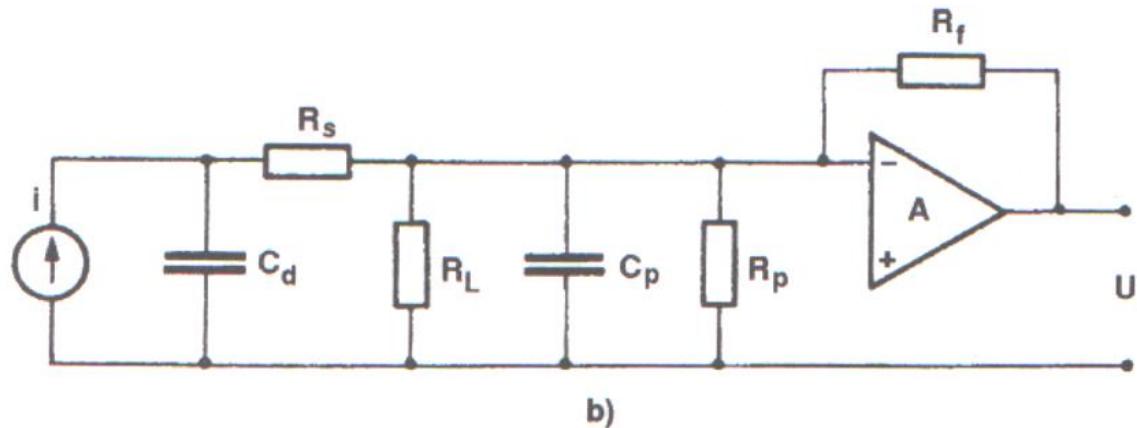
b)

Šeme sa fotootpornikom: a) sa optičkim deliteljem, b) sa tranzistorom

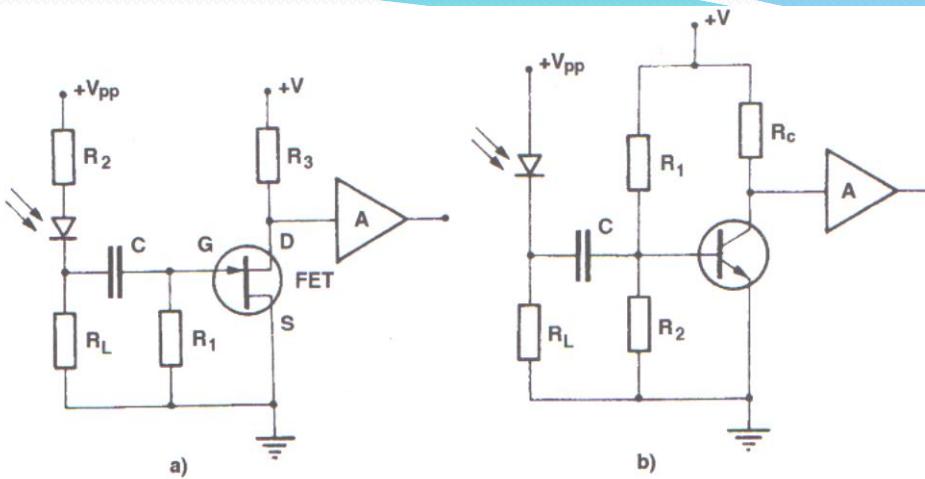
Merne šeme sa prijemnicima na bazi fotonaponskog efekta i inverznom polarizacijom



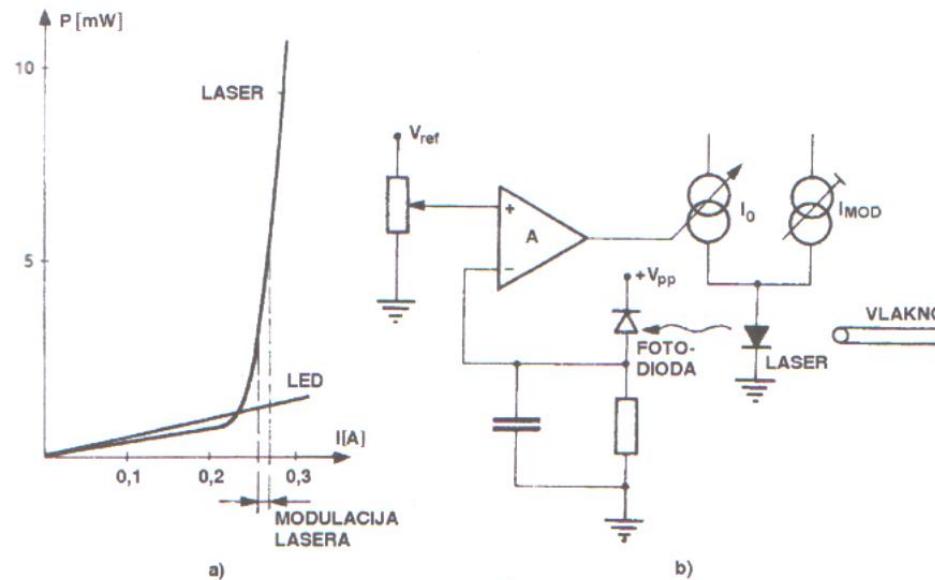
a)



b)



Fotodioda sa pojačavanjem: a) sa FET-tranzitom na ulazu, b) sa bipolar. tranzistorom na ulazu



Osnovna šema sa optičkim izvorom: a) statička karakteristika izvora,
b) princip kompenzacije srednje snage

Fiberoptički senzori



Merne trake

DIGITALNI SENZORI

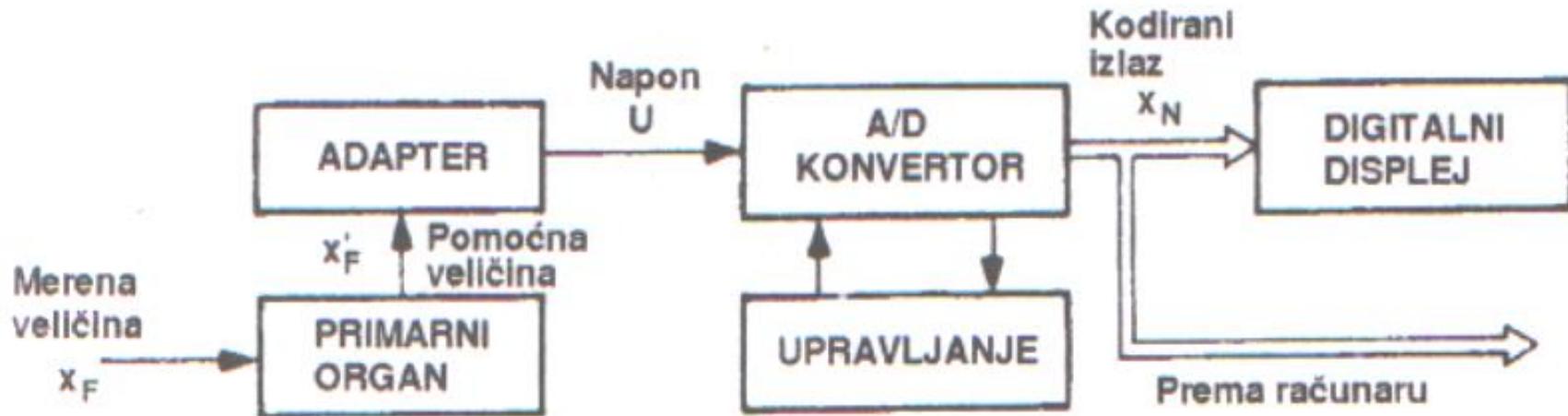
PRINCIP RADA

Pod digitalnim senzorom podrazumeva se merni uređaj koji konvertuje **merenu analognu** veličinu x_F u **digitalni izlazni** signal x_N . Gradi se na bazi mikrokontrolera, što omogućava visok metrološki kvalitet.

Između digitalnih i analognih senzora postoje suštinske razlike u pogledu izrade, karakteristika i primene.

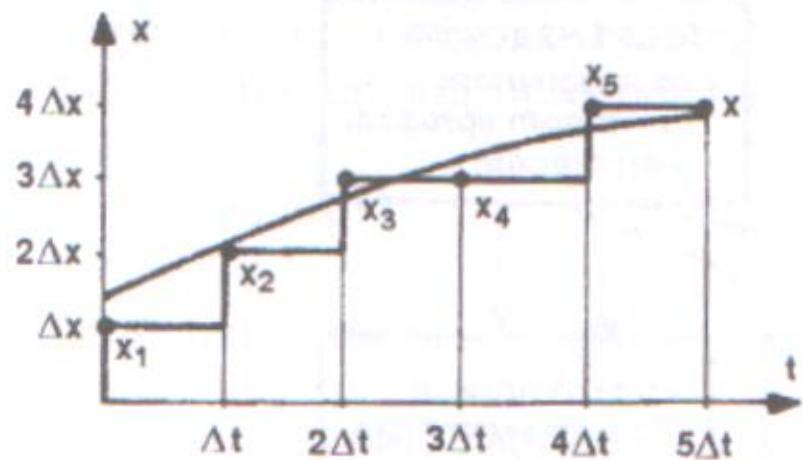
Osnovni nedostaci analognih senzora su: nemogućnost prenosa analognog izlaznog signala na veće udaljenosti, osetljivost izlaznog signala na delovanje šumova, poteškoće u pogledu priključivanja na računar, nestabilnost statičkih i dinamičkih karakteristika itd.

Digitalni senzori omogućavaju da se ovi nedostaci prevaziđu ili da su izraženi u manjoj meri.

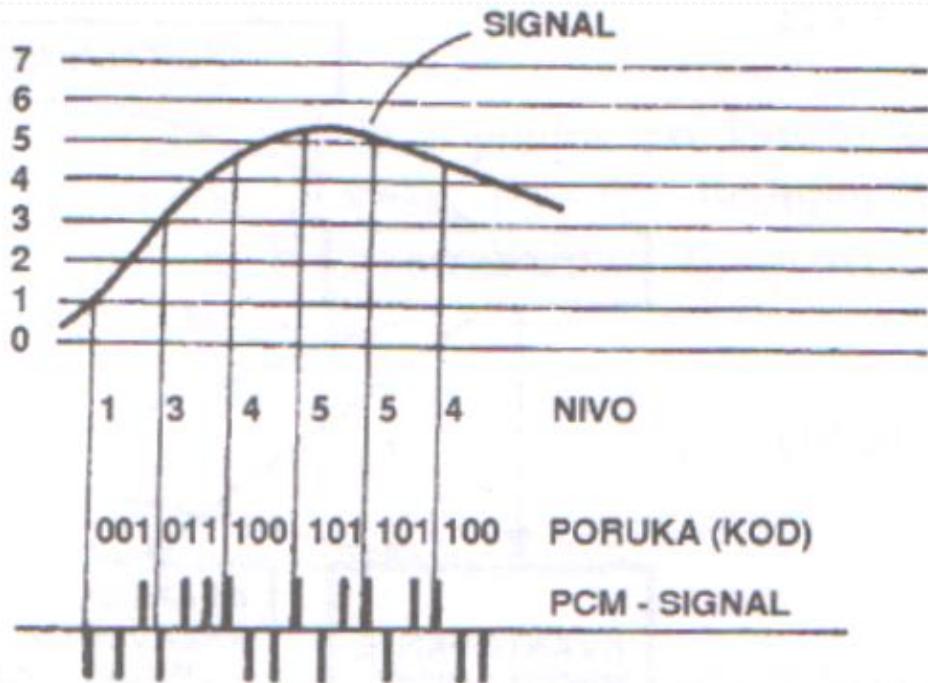


Opšta struktura blok-šema digitalnog senzora





a)



b)

Princip rada digitalnih senzora: a) uzorkovanje po vremenu i diskretizacija po amplitudi, b) PCM modulacija

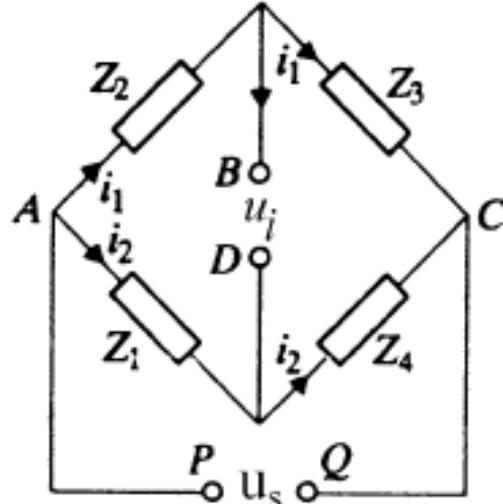
TIPIČNI ELEMENTI ZA PREDOBRADU SIGNALA

- Elementi za predobradu (kondicioniranje) signala pretvaraju izlazni signal senzora u oblik prikladan za daljnju obradu (jednosmjerni napon, jednosmjernu struju ili frekvenciju).
- Najvažniji elementi za predobradu signala su:
 - ◆ Merni mostovi (engl. Deflection bridges) i
 - ◆ Pojačala (engl. Amplifiers)

Merni mostovi

- Koriste se za pretvaranje izlaza iz otporničkih, kapacitivnih i induktivnih senzora u naponski signal.

Wheatstoneov most:



- Impedanse Z_1 do Z_4 mogu biti aktivne i reaktivne.
- Izlazni napon u_i zavisi od naponu napajanja u_s prema sljedećem izrazu:

$$u_i = \left(\frac{Z_3}{Z_2 + Z_3} - \frac{Z_4}{Z_1 + Z_4} \right) u_s = \\ = \frac{Z_1 Z_3 - Z_2 Z_4}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_4 + Z_3 Z_4} u_s$$

- Most će biti u ravnoteži ($u_i = 0$) ako je:

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4 \quad \text{odnosno} \quad \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4}$$

- Ako se promijeni iznos bilo koje impedanse, most postaje neuravnotežen (**otklanja** se iz ravnotežnog stanja) i pojavljuje se izlazni napon različit od nule.

- Osjetljivost mosta po pojedinoj impedansi određuje se prema izrazima:

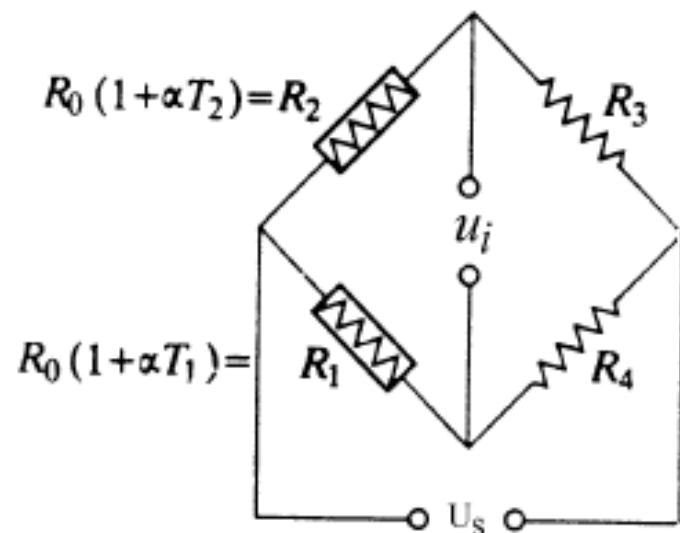
$$\begin{aligned}\frac{\partial u_i}{\partial Z_1} &= \frac{Z_4}{(Z_1 + Z_4)^2} u_s; & \frac{\partial u_i}{\partial Z_2} &= \frac{-Z_3}{(Z_2 + Z_3)^2} u_s \\ \frac{\partial u_i}{\partial Z_3} &= \frac{Z_2}{(Z_2 + Z_3)^2} u_s; & \frac{\partial u_i}{\partial Z_4} &= \frac{-Z_1}{(Z_1 + Z_4)^2} u_s\end{aligned}$$

- Iz ukupne osjetljivosti mosta dobije se zavisnost promjene izlaznog napona u_i od promjene impedansi mosta prema izrazu:

$$\boxed{\frac{\delta u_i}{u_s} = \frac{Z_4 \delta Z_1 - Z_1 \delta Z_4}{(Z_1 + Z_4)^2} - \frac{Z_3 \delta Z_2 - Z_2 \delta Z_3}{(Z_2 + Z_3)^2}}.$$

Primjeri senzora u mosnom spoju:

- Dva metalna otporna senzora (npr. PT-100) u mosnom spoju



- Most će biti u ravnoteži ako je $R_4/R_1=R_3/R_2$, odnosno ako je $T_1=T_2$, tj. mora biti $R_4/R_0=R_3/R_0$ odnosno $R_3 = R_4$, pa se može pisati:

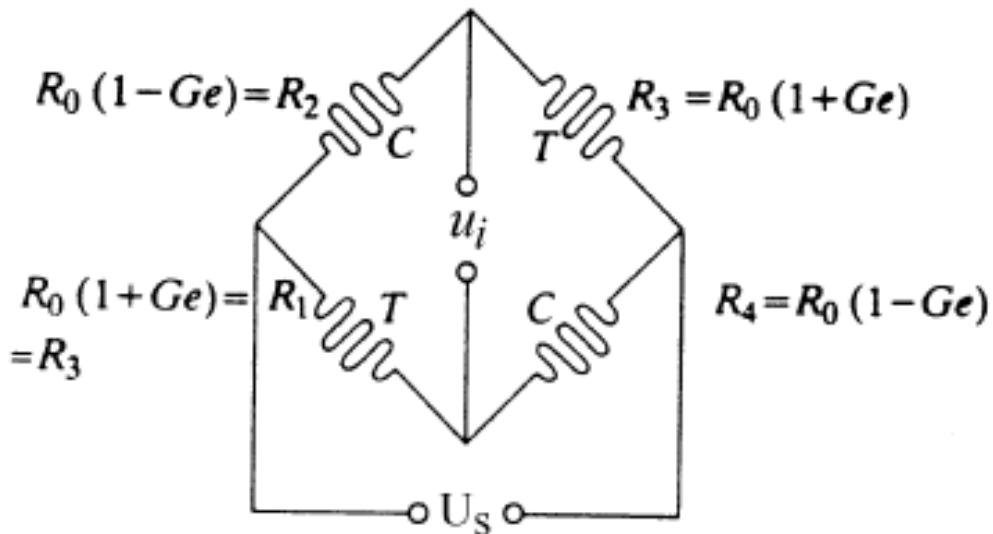
$$u_i = \left(\frac{1}{1 + \frac{R_3}{R_0} \frac{1}{1 + \alpha T_1}} - \frac{1}{1 + \frac{R_3}{R_0} \frac{1}{1 + \alpha T_2}} \right) U_s$$

- Ako se izabere $R_3 \gg R_0$ vrijedi aproksimacija:

$$u_i \approx \left(\frac{\frac{1 + \alpha T_1}{R_3} - \frac{1 + \alpha T_2}{R_3}}{\frac{R_3}{R_0}} \right) U_s = \frac{R_3}{R_0} U_s \alpha (T_1 - T_2).$$

- Dakle, izlazni napon mosta proporcionalan je razlici temperatura.

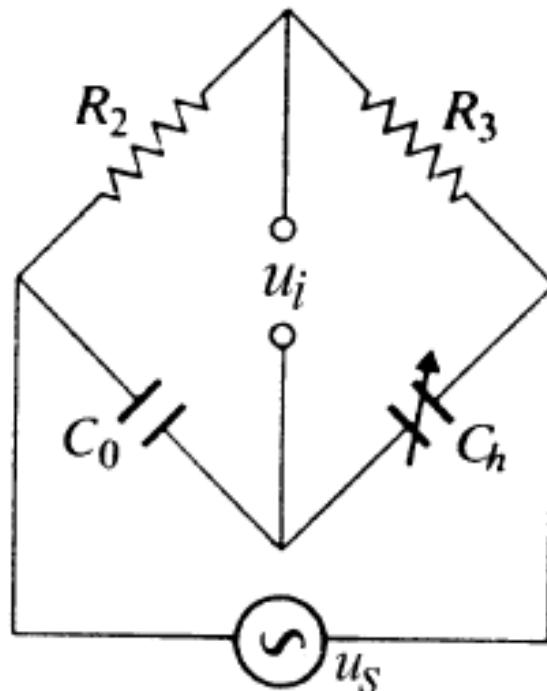
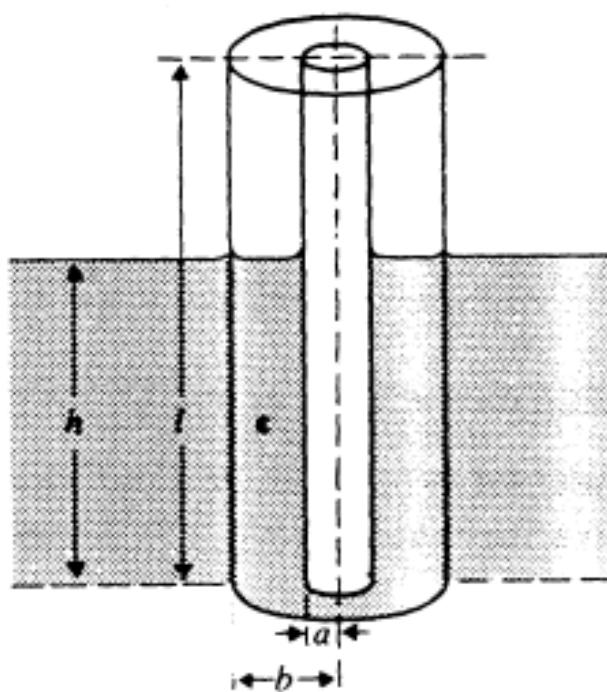
2) Četiri otpornička senzora deformacije u mosnom spoju



- Ovakav spoj otporničkih traka, montirnih na elastičnim elementima, koristi se za mjerjenje sile, momenta, ubrzanja i pritiska.
- Montiraju se tako da su dva suprotna senzora izložena opterećenju na pritisak (R_2 i R_4 na slici; engl. Compression) a druga dva opterećenju na istezanje (R_1 i R_3 na slici; - engl. Tension).

- Primjenom četiri senzorska elemenata postiže se maksimalna osjetljivost mosta na opterećenje, a kompenzira se i uticaj temperature na netačnost mjerjenja.

3) Kapacitivno senzor nivoa u mosnom spoju – primjer reaktivnog mosta



$$C_h = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} [l + (\epsilon - 1)h]$$

$$u_i = \left(\frac{1}{1 + \frac{C_0}{C_h}} - \frac{1}{1 + \frac{R_3}{R_2}} \right) u_s$$

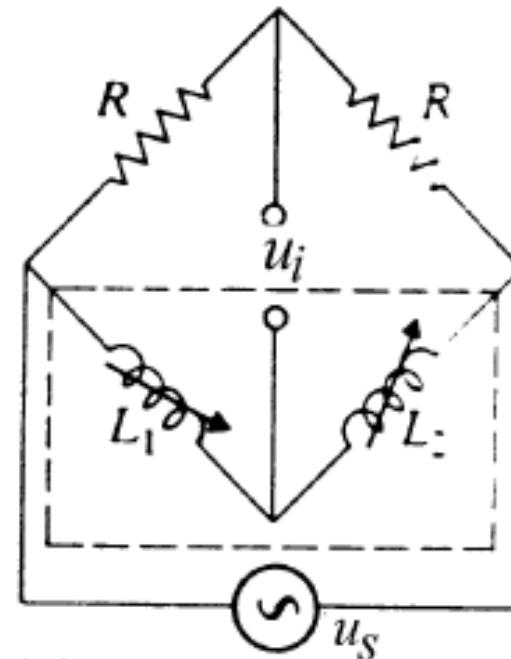
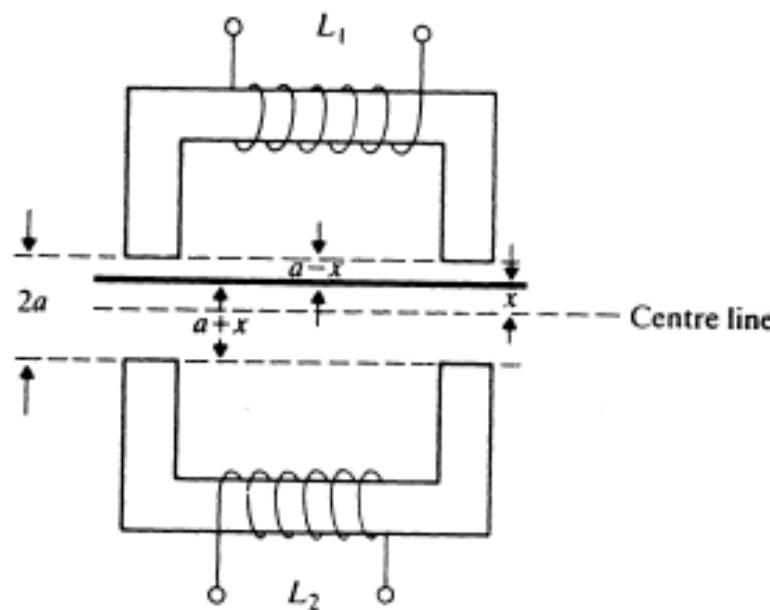
- Za h_{min} podesi se $u_i = 0$, odnosno $C_0 = C_{hmin}(R_3/R_2)$, pa se može pisati:

$$u_i = \left(\frac{1}{1 + \frac{C_{h_{\min}}}{C_h} \frac{R_3}{R_2}} - \frac{1}{1 + \frac{R_3}{R_2}} \right) u_s,$$

odnosno za $R_3 \gg R_2$

$$u_i = \frac{R_2}{R_3} \left(\frac{C_{h_{\min}}}{C_h} - 1 \right) u_s$$

4) Mosni spoj s dva induktivna senzora u “push-pull” spoju



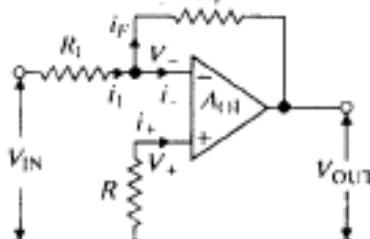
Dva induktivna senzora u “push-pull” spoju

$$L_1 = \frac{L_0}{1 + \alpha(a - x)}; \quad L_2 = \frac{L_0}{1 + \alpha(a + x)}$$

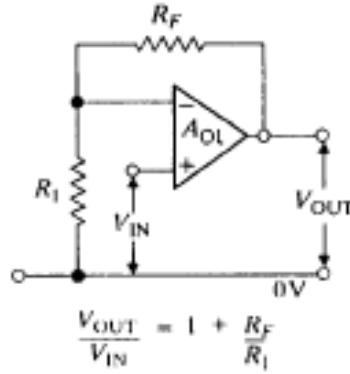
$$u_i = \left(\frac{L_1}{L_1 + L_2} - \frac{1}{2} \right) u_s = \frac{\alpha x}{2(1 + \alpha a)} u_s$$

Pojačavači

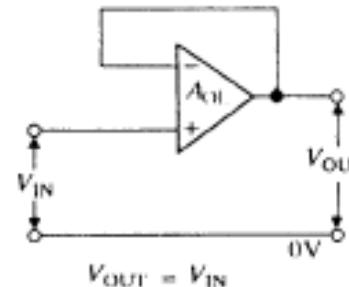
- Pojačavači su neophodna za pojačavanje signala malih vrednosti na vrednosti prikladne za dalju obradu.
- Osnovni element pojačala signala je integrисано operaciono pojačalo, koje se odlikuje visokim pojačanjem i izvodi se tako da može pojačavati signale u širokom rasponu frekvencija.
- Operacionom se pojačalu dodaje pasivna mreža koja određuje dinamička i statička svojstva pojačavača.



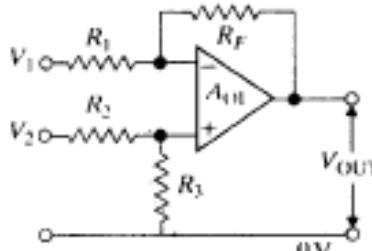
$$(a) \quad R = \frac{R_F R_1}{R_F + R_1}$$



$$\frac{V_{\text{OUT}}}{V_{\text{IN}}} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$$

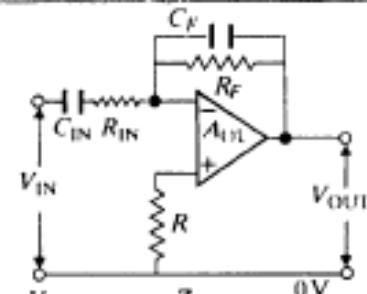


$$V_{\text{OUT}} = V_{\text{IN}}$$



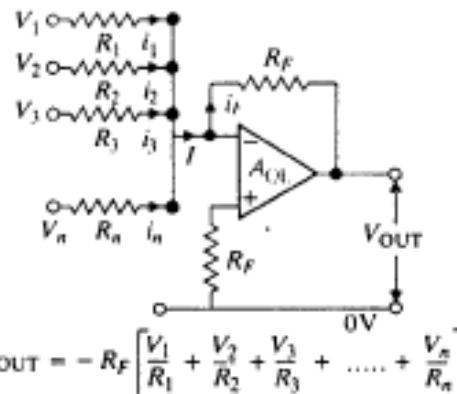
if $R_1 = R_2$ and $R_3 = R_F$,
then:- $V_{\text{OUT}} = \frac{R_F}{R_1} (V_2 - V_1)$

(d)



where $Z_{\text{IN}} = \frac{1}{C_{\text{IN}} s} + R_{\text{IN}}$ also $R = \frac{R_F R_{\text{IN}}}{R_F + R_{\text{IN}}}$
 $1/Z_F = \frac{1}{R_F} + C_F s$

(e)



$$V_{\text{OUT}} = -R_F \left[\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} + \dots + \frac{V_n}{R_n} \right]$$

(f)

- (a) invertirajuće ; (b) neinvertirajuće ; (c) naponsko (d) diferencijalno
 (e) A.C. pojacalo f) naponski sabirac

- Prenosne funkcije pojačala prikazanih na slici dobijene su uz pretpostavku idealnih karakteristika operacionih pojačala. Za postizanje zahtijevane tačnosti merenja, pri projektovanju pojačala potrebno je uzeti u obzir stvarne karakteristike operacionih pojačala.

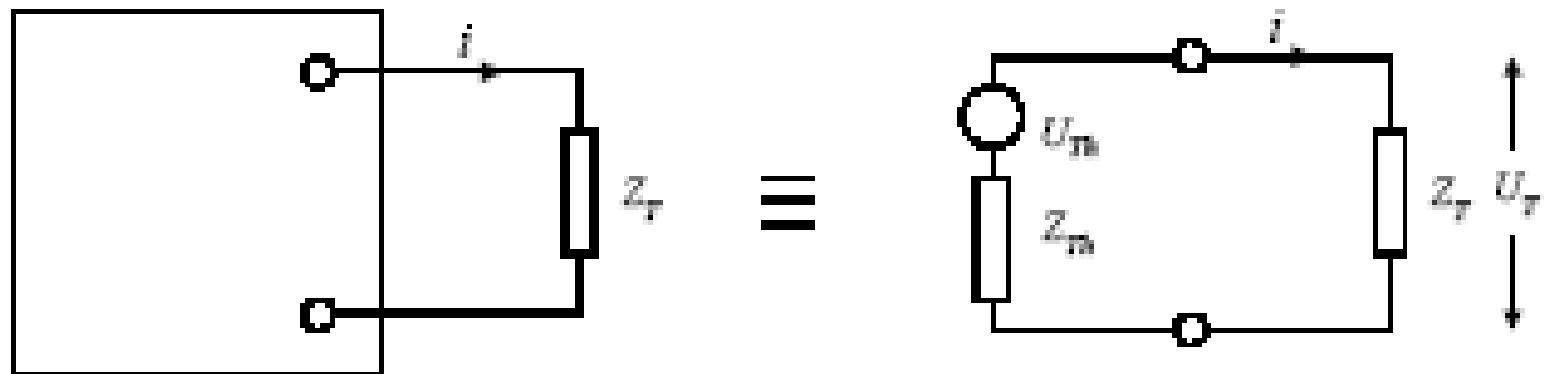
Parametar	Idealno op. pojačalo	Tipično op. pojačalo
D.C. pojačanje u otvorenoj petlji	∞	100 dB (10^5)
Ulagna impedans	∞	$2 \text{ M}\Omega$
Izlazna impedans	0	75Ω
Ulagni napon mirovanja	0	1 mV
Temperaturni koeficijent offseta	0	$5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Ulagna struja mirovanja	0	80 nA
Frekv. područje (3dB)	0 do ∞	0 - 10 MHz
Common mode rejection ratio (CMRR)	∞	90 dB

OPTEREĆENJE, ŠUM I INTERFERENCIJA U MERNIM SISTEMIMA

- Izlazni signal senzora najčešće je naponski ili strujni.
- Ulazne karakteristike elementa za predobradu moraju odgovarati izlaznim karakteristikama senzora, tj. element za predobradu signala ne smije uticati na karakteristike senzora, odnosno ne sme ga opterećivati.
- Za opis ponašanja napona i struje na spoju mernog elementa i elementa za predobradu koriste se ekvivalentna električna kola za svaki od njih.

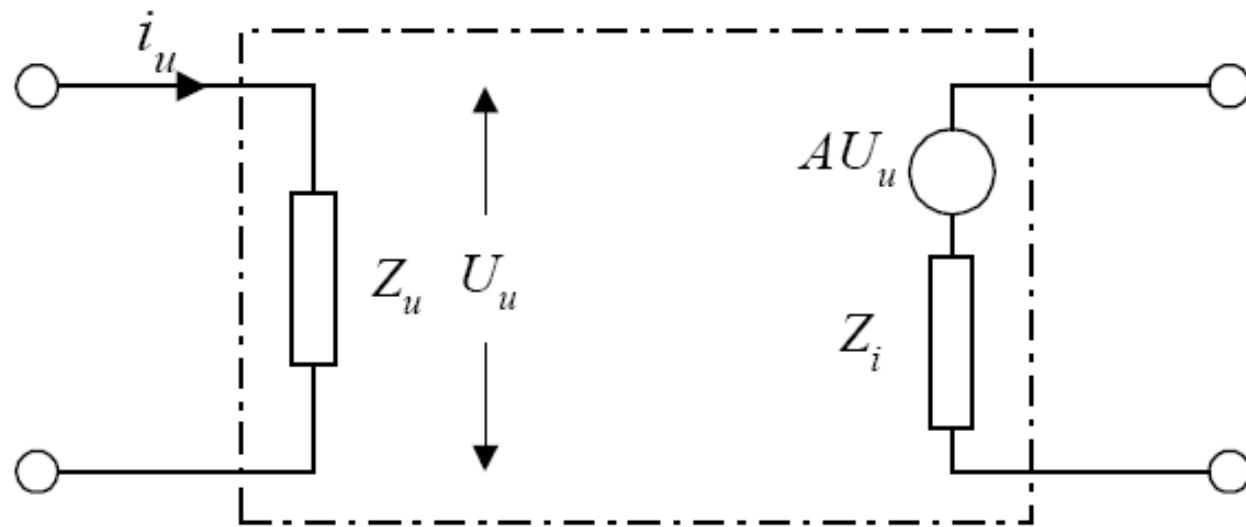
Teveninovo ekvivalentno kolo:

- Svaka električna mreža koja se sastoji od linearnih impedansi i naponskih izvora može se prikazati nadomesnim električnim kolom sa jednim naponskim izvorom i impedansom spojenom u rednoj vezi sa njim.

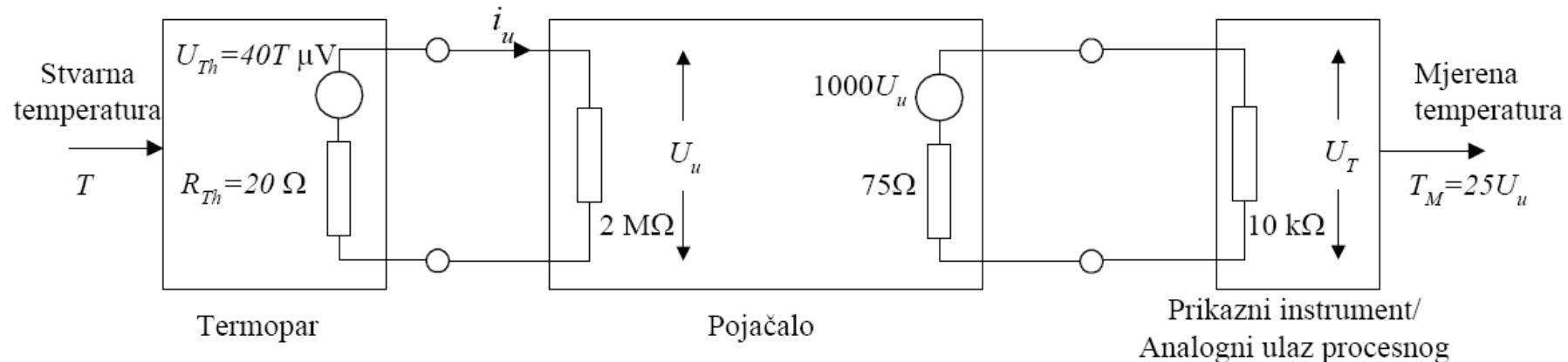


$$U_T = U_{Th} \frac{Z_T}{Z_{Th} + Z_T}; \quad Z_T \gg Z_{Th};$$

Teveninovo ekvivalentno kolo operacionog pojačavača



Ekvivalentna električna šema mernog elementa temperature



- U ovom je primjeru pretpostavljeno da 1V napona U_T odgovara promjeni temperature od 25°C . Ovdje je:

$$U_u = 40 \cdot 10^{-6} T \frac{2 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^6 + 20}; \quad U_T = 1000U_u \frac{10^4}{10^4 + 75};$$

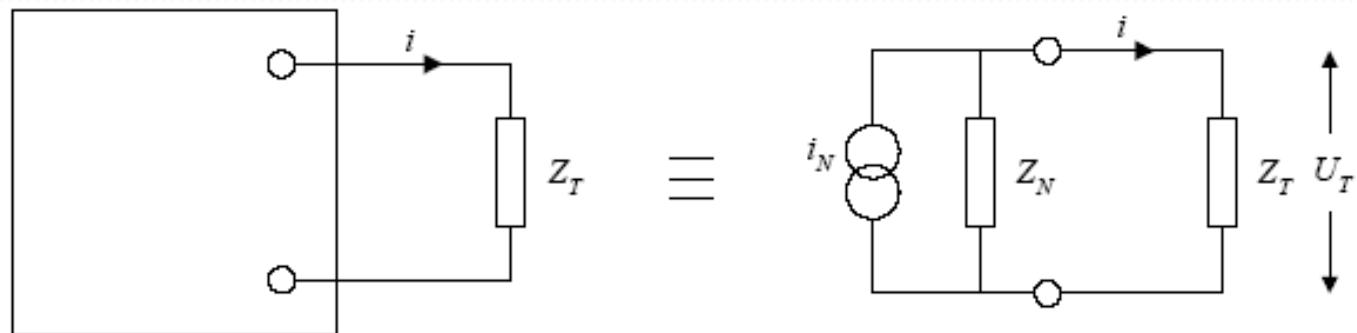
odakle slijedi:

$$T_M = \frac{2 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^6 + 20} \frac{10^4}{10^4 + 75} = 0.9925T.$$

- Dakle, greška uslijed opterećenja iznosi $-0.0075T$.

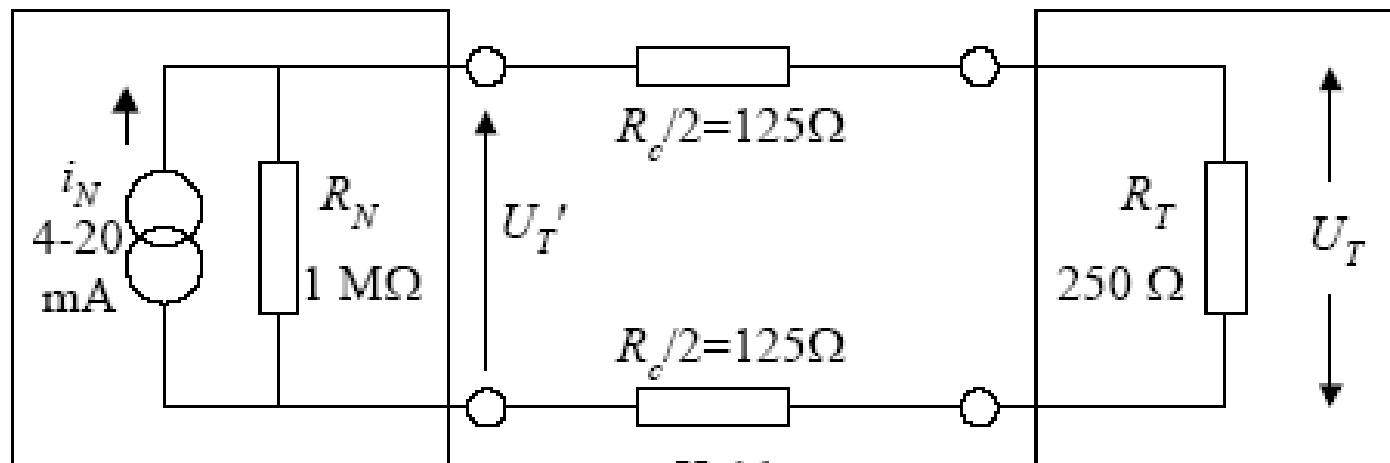
Nortonovo ekvivalentno kolo:

Svaka električna mreža koja se sastoji od linearnih impedansi i naponskih izvora može se ekvivalentirati električnim kolom s jednim strujnim izvorom i impedansom spojenom u paralelu s njim.



$$U_T = i_N \frac{Z_N Z_T}{Z_N + Z_T}; Z_T \ll Z_N;$$

Nortonovo ekvivalentno kolo za merni član diferencijalnog pritiska



Davač diferencijalnog
pritiska

Kabl

Prikazni instrument/
Analogni ulaz procesnog
računara

- Prema slici je:

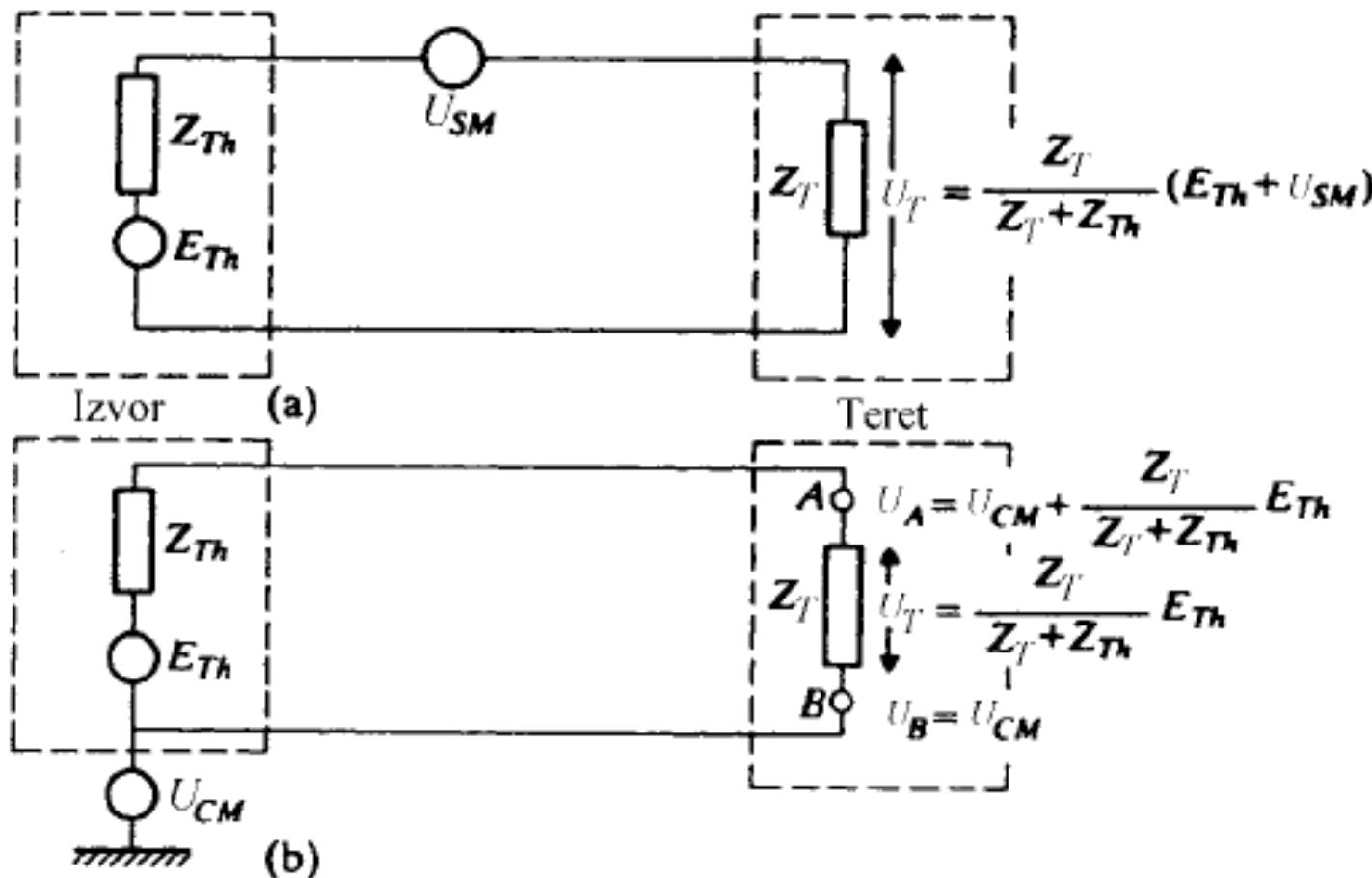
$$U'_T = \frac{R_N(R_C + R_T)}{R_N + R_C + R_T} i_N,$$

odnosno:

$$U_T = \frac{R_N}{R_N + R_C + R_T} R_T i_N.$$

- Za navedene vrijednosti na slici dobije se: $U_T = 0.995 R_T i_N$;
- Izlazni napon odstupa od željenog područja (1-5V) samo 0.05 %.

- U stvarnim realizacijama mernih sistema osim Théveninovog naponskog izvora (ili Nortonovog strujnog izvora) obično se pojavljuju i
 - ◆ interferencijski napon (to je nepoželjni deterministički signal) i
 - ◆ napon šuma (to je nepoželjni slučajni signal).
- Na sledećoj slici pod a) prikazana je tzv. serijska interferencija (engl. series mode interference) kod koje je interferencijski napon USM u serijskom spoju s mernim naponskim signalom UTh.
- Na slici b) prikazana je interferencija preko zajedničke tačke (engl.common mode interference) koja izaziva podizanje naponskog nivoa oba kola za interferencijski napon UCM u odnosu na uzemljenje.



a) serijska interferencija; b) interferencija preko zajedničke tačke

Izvori šuma

- Prema mjestu nastanka šum se u mernim sistemima može podeliti na unutrašnji šum (*engl. internal or inherent noise*) i na spoljašnji (interferencijski) šum.

Unutrašnji šum:

- Pojavljuje se u većoj ili manjoj mjeri kod svakog mernog senzora bez obzira kako kvalitetno je on izведен. Pitanje je procene koliko taj šum utieče na tačnost merenja.

- Primera radi, unutrašnji merni šum pojavljuje se kod otporničkih i poluprovodnih senzora kao posljedica stohastičkog kretanja elektrona zavisno od radne temperature.
- Ovaj se šum naziva toplotnii ili Johnsonov šum i ima svojstva belog šuma.

- Efektivna vrijednost napona šuma u frekvencijskom području mernog člana određena je izrazom:

$$U_{RMS} = \sqrt{4k R \Delta f \Theta}$$

gdje je:

k - Boltzmannova konstanta, $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$;

R - otpor mernog senzora, $[\Omega]$;

Δf - frekvencijsko područje mernog člana, $[\text{Hz}]$;

Θ - radna temperatura. $[\text{K}]$.

Primer: Za $R = 1 \text{ M}\Omega$, $\Delta f = 1 \text{ MHz}$, $\Theta = 300 \text{ K}$ dobije se $U_{RMS} = 0,13 \text{ mV}$, što je napon uporediv s malim mernim signalima kao što su signali na mernim trakama

Spoljašnji (interferencijski) šum:

- To je šum koji u merni sistem dolazi izvana.
- Najčešće susretani spoljni izvor šuma je naizmjenična energetska mreža (220 V, 50 Hz), koja u merni sistem unosi odgovarajući sinusni interferencijski signal.
- Jednosmjerna energetska mreža sama po sebi ne unosi šum u merni sistem, ali uklapanje i isklapanje sklopki u statičkim energetskim pretvaračima može uneti velike smetnje u merni sistem.
- Spoljni izvori šuma u mernom sistemu mogu biti i radiofrekvencijski prenosnici, aparati za zavarivanje i elektrolučne peći koje unose napon šuma frkvencije nekoliko MHz.

Načini djelovanja spoljnih izvora šuma na merne sisteme

Induktivno delovanje:

- Ako je merni krug u blizini naizmjeničnog energetskog električkog kola, može se pojaviti značajno međuinduktivno delovanje između ta dva kola.
- Naizmjenična struja i u energetskom kolu indukuje u mernom kolu serijski interferencijski napon

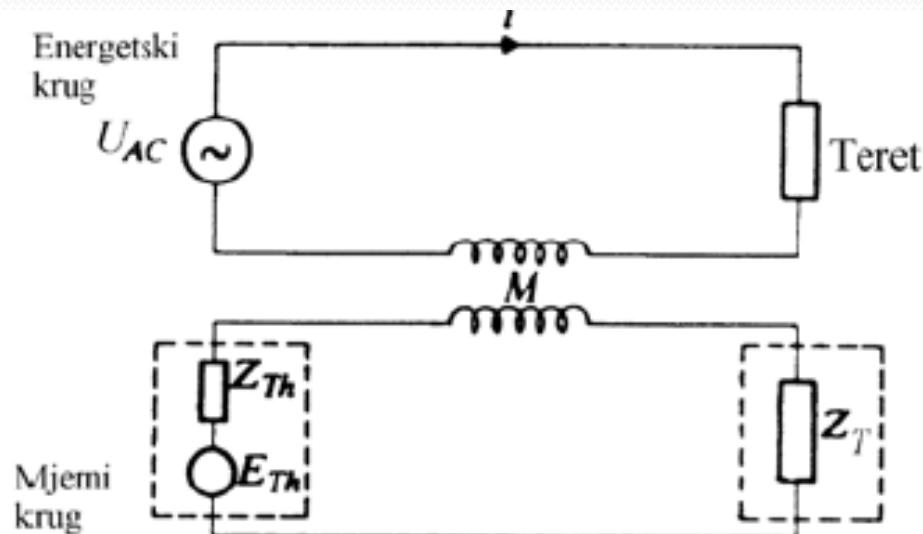
$$U_{SM} = M \frac{di}{dt}.$$

Primjer:

za $M \approx 1 \mu\text{H}$ i $di/dt \approx 103 \text{ A/s}$

(tipično za motor snage 1 k

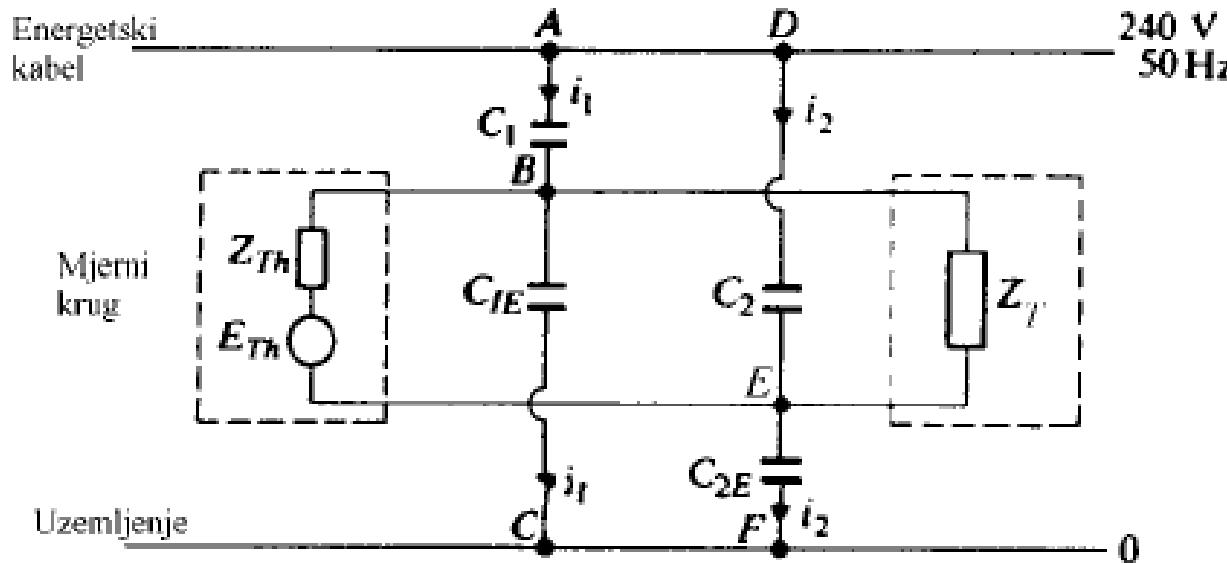
dobije se $U_{SM} \approx 1 \text{ mV}$.



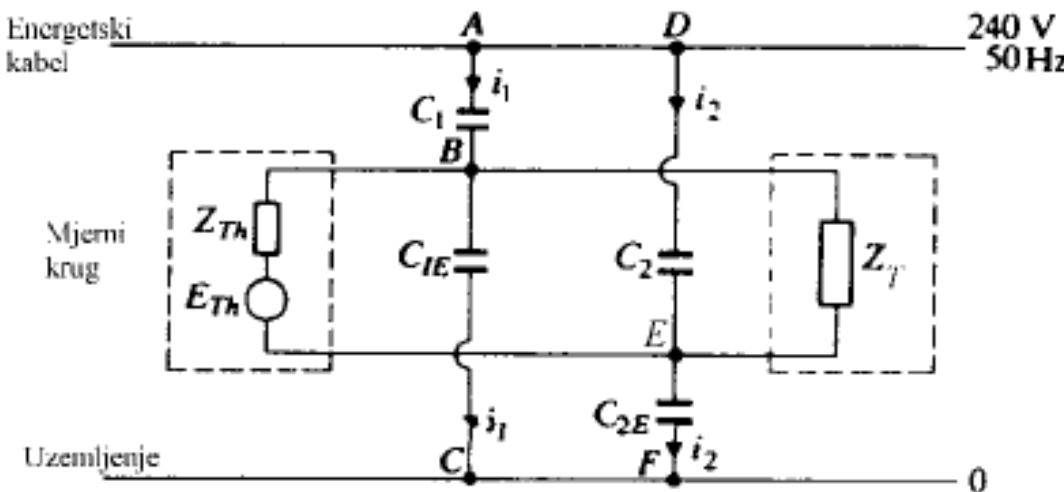
Kapacitivno delovanje:

- Kapacitivno (elektrostatičko) delovanje pojavljuje se kada je merni krug u blizini energetskog voda.

Naime, između energetskog voda, uzemljivačkog voda i mernog kruga može pojaviti kapacitivno delovanje, kao što je prikazano na slici.



Ovi su kapaciteti raspodijeljeni po čitavoj dužini mjernog voda, ali se mogu ekvivalentirati odgovarajućim koncentriranim kondenzatorima, kao što je prikazano na slici.



- Potencijali u tačkama B i E , zanemarujući za trenutak napon E_{Th} , iznose:

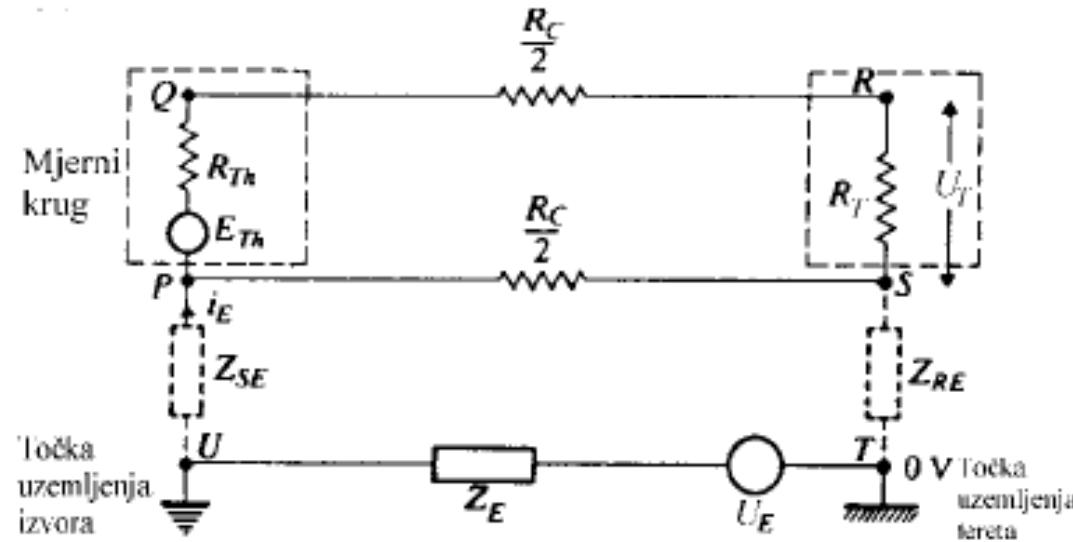
$$U_B = 240 \frac{C_1}{C_1 + C_{1E}}; \quad U_E = 240 \frac{C_2}{C_2 + C_{2E}}$$

- Kao posljedica kapacitivnog djelovanja pojavljuju se zajednički interferencijski napon $U_{CM} = U_E$ i serijski interferencijski napon

$$U_{SM} = 240 \left(\frac{C_1}{C_1 + C_{1E}} - \frac{C_2}{C_2 + C_{2E}} \right).$$

Višestruko uzemljenje:

- Pri objašnjavanju kapacitivnog djelovanja prepostavljeno je da uzemljenje ima u svakoj točki potencijal 0 V.
- Međutim, energetski uređaji velikih snaga mogu prouzrokovati proticanje kroz uzemljenje što ima za posljedicu pojavu različitih potencijala u tačkama uzemljenja.
- Ako bi mjerni član bio potpuno odvojen od uzemljenja, ne bi bilo nikakvog djelovanja na njega.
- U stvarnosti se može dogoditi da jedan član mjernog kruga ima konačan otpor prema jednoj tački uzemljenja a drugi prema nekoj drugoj, prostorno udaljenoj tački, koja je na različitom potencijalu od prve tačke.
- Kao posljedica toga u mjernom se sistemu pojavljuju zajednički i serijski interferencijski naponi.
- Problem višestrukog uzemljenja ilustrovan je na sljedećoj slici:



- Na osnovi slike može se pisati:

$$i_E = \frac{U_E}{Z_E + Z_{SE} + (R_c / 2) + Z_{RE}};$$

$$U_{CM} = U_S = U_E \frac{Z_{RE}}{Z_E + Z_{SE} + (R_c / 2) + Z_{RE}};$$

$$U_{SM} = U_E \frac{R_c / 2}{Z_E + Z_{SE} + (R_c / 2) + Z_{RE}}.$$

- U praksi se nastoji postići da su Z_{SE} i Z_{RE} što veći.
- To nije uvijek moguće ostvariti.

Primer:

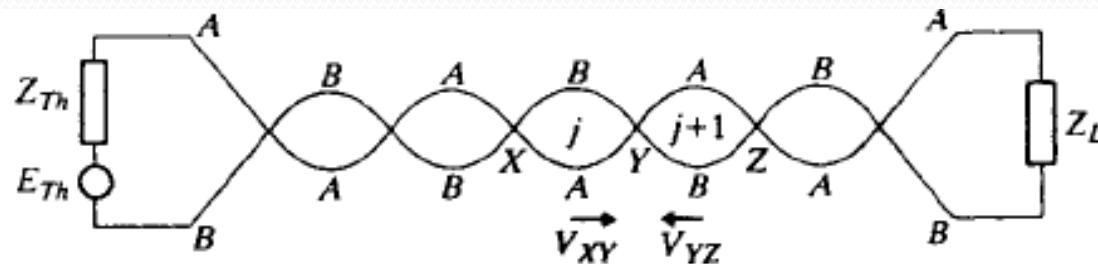
- Da se dobije što brži odziv jedan vrh termopara dodiruje oklop, koji je uronjen u metalnu posudu u kojoj se mjeri temperatura, a koja je uobičajeno uzemljena.
- Rezultat je mali otpor Z_{SE} , npr. $Z_{SE} = 10 \Omega$, Za $R_E = 1 \Omega$, $R_C/2 = 10 \Omega$, $U_E = 1V$ i $Z_{RE} = 106 \Omega$ dobije se $U_{SM} \approx 10 \mu V$.
- U slučaju da se tačka S spoji direktno na uzemljenje ($Z_{RE} = 0 \Omega$) dobio bi se $U_{SM} \approx 0.48 V$.
- Dakle, ako se mjerni sistem mora uzemljiti, uzemljenje se smije izvesti samo na jednom kraju.

Fizičko udaljavanje:

- Iznosi međuinduktiviteta i kapaciteta između energetskog i mjernog kruga obrnuto su proporcionalni njihovoj udaljenosti, treba pri njihovom izvođenju nastojati postići što je moguće veću udaljenost.

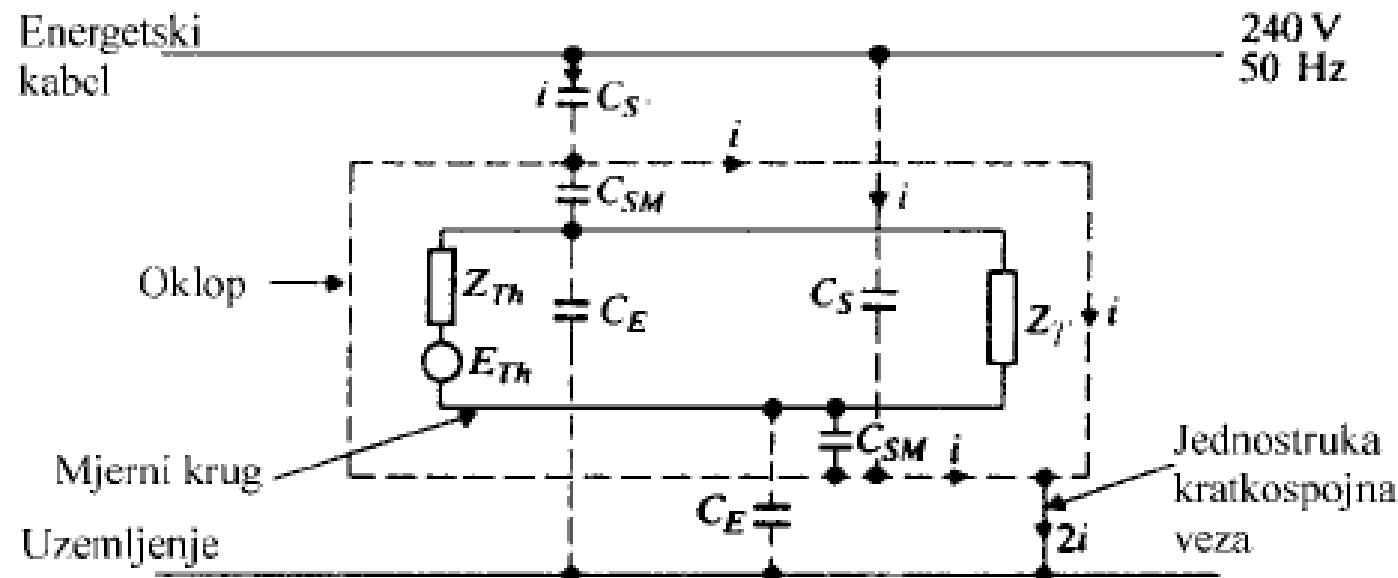
Uplitanje mjernih vodova:

- Najjednostavniji način smanjenja induktivnog interferencijskog djelovanja.

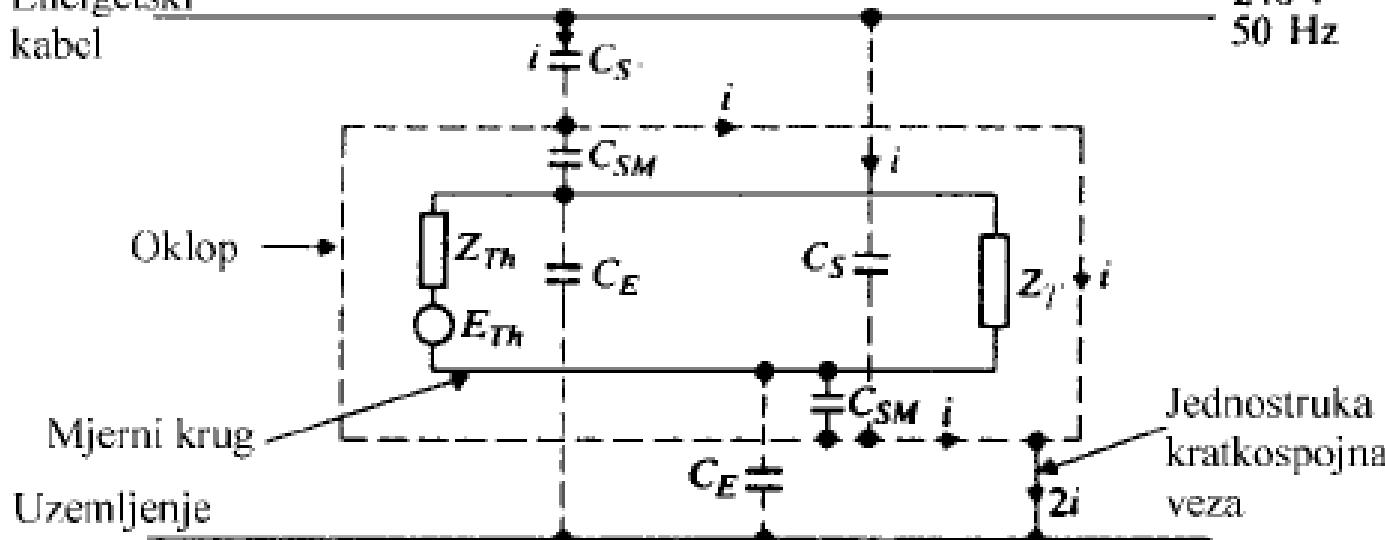


Dva provodnika A i B mjernog kruga međusobno se upletu tako da sve petlje imaju približno jednake površine.

Postavljanje plašta oko mernih vodova

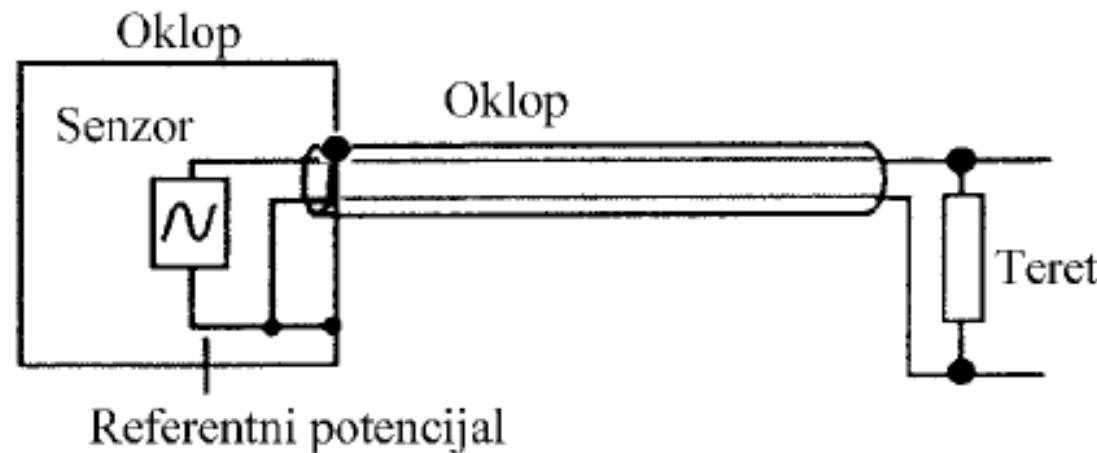


- Oklapanjem mjernih vodova smanjuje se kapacitivno interferencijsko djelovanje na mjeri sistem.
- Metalni oklop (plašt) mora se uzemljiti, ali samo u jednoj tački, kako je prikazano na slici.
- Kao što se može vidjeti, nema direktnog spoja između mernog kruga i oklopa; postoji samo visokoomska kapacitivna veza preko kapaciteta C_{SM} .

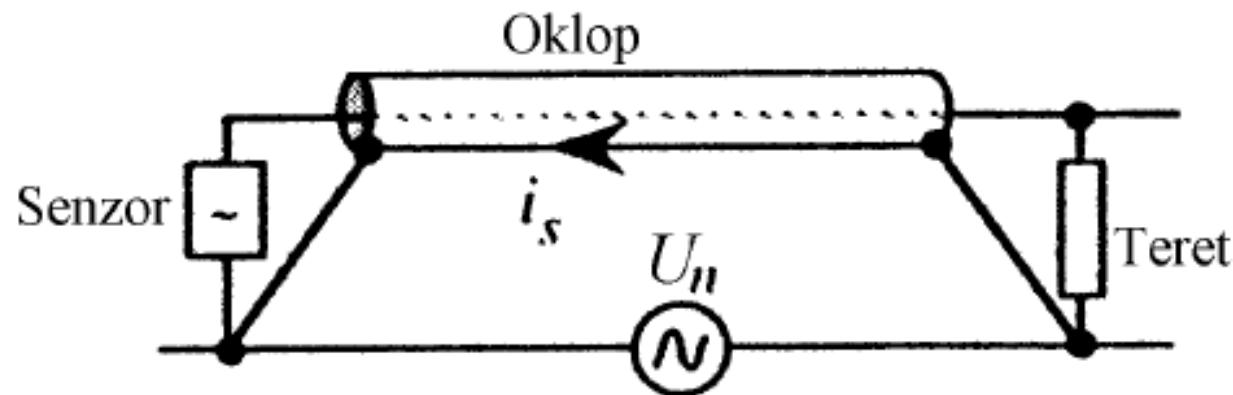


- Oklop predstavlja niskoomski otpor za interferencijsku struju i , pa su struje kroz kapacitete C_{SM} i C_E male, što ima za posljedicu smanjenje zajedničkog interferencijskog napona U_{CM} , a serijski interferencijski napon jednak je nuli.
- U stvarnosti je mjerni senzor obično smještenu oklopljeno kućište, a za prenos signala koristi se oklopljeni (širmovani) kabl.
- Oklop kabla mora biti spojen na kućište senzora, ali ne smije biti spojen na drugom kraju.

Ispravan spoj



Neispravan spoj

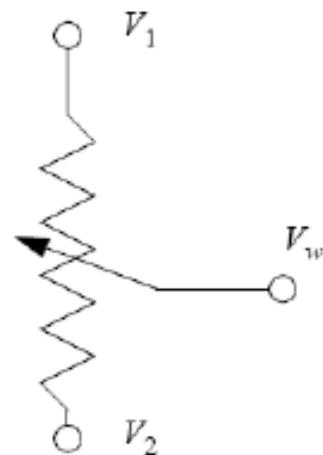


Ostale metode za smanjenje smetnji:

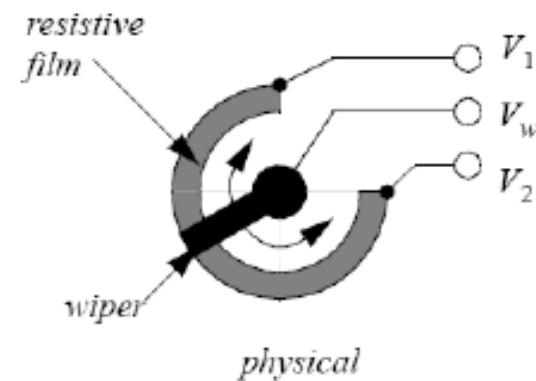
- ◆ Korištenje diferencijalnih pojačala;
- ◆ Filtriranje mernih signala;
- ◆ Usrednjavanje signala;
- ◆ Modulacija;

MERENJE – POMAKA

Potenciometri linearni i kružni

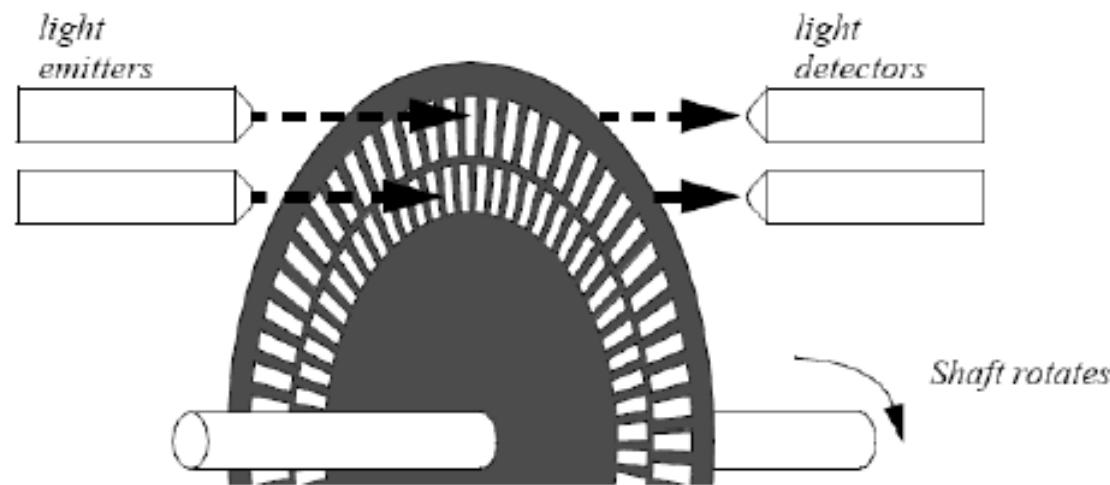


schematic



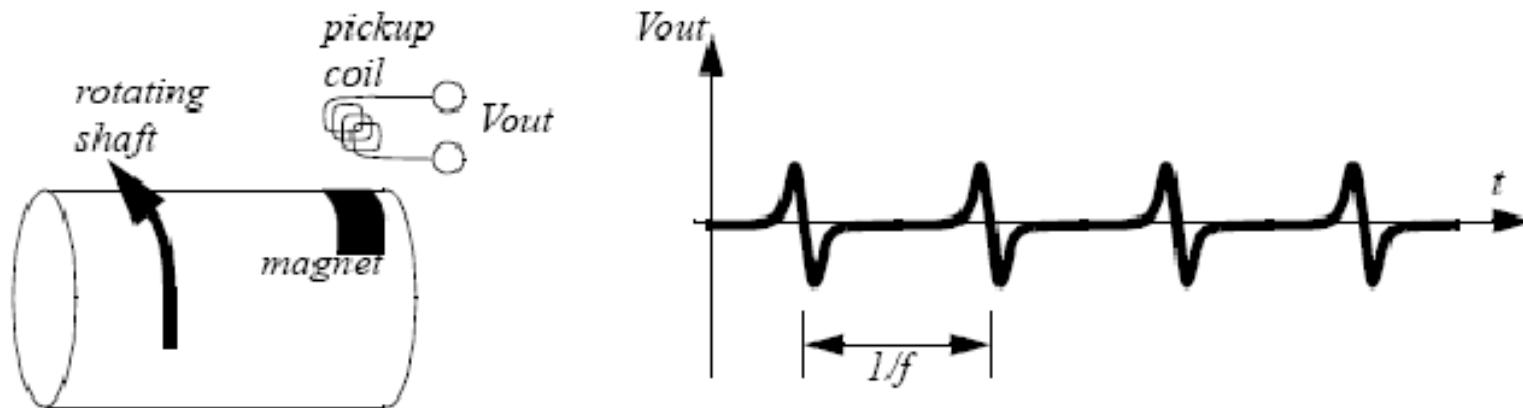
MERENJE – ENKODERI

Enkoderi – absolutni i inkrementalni

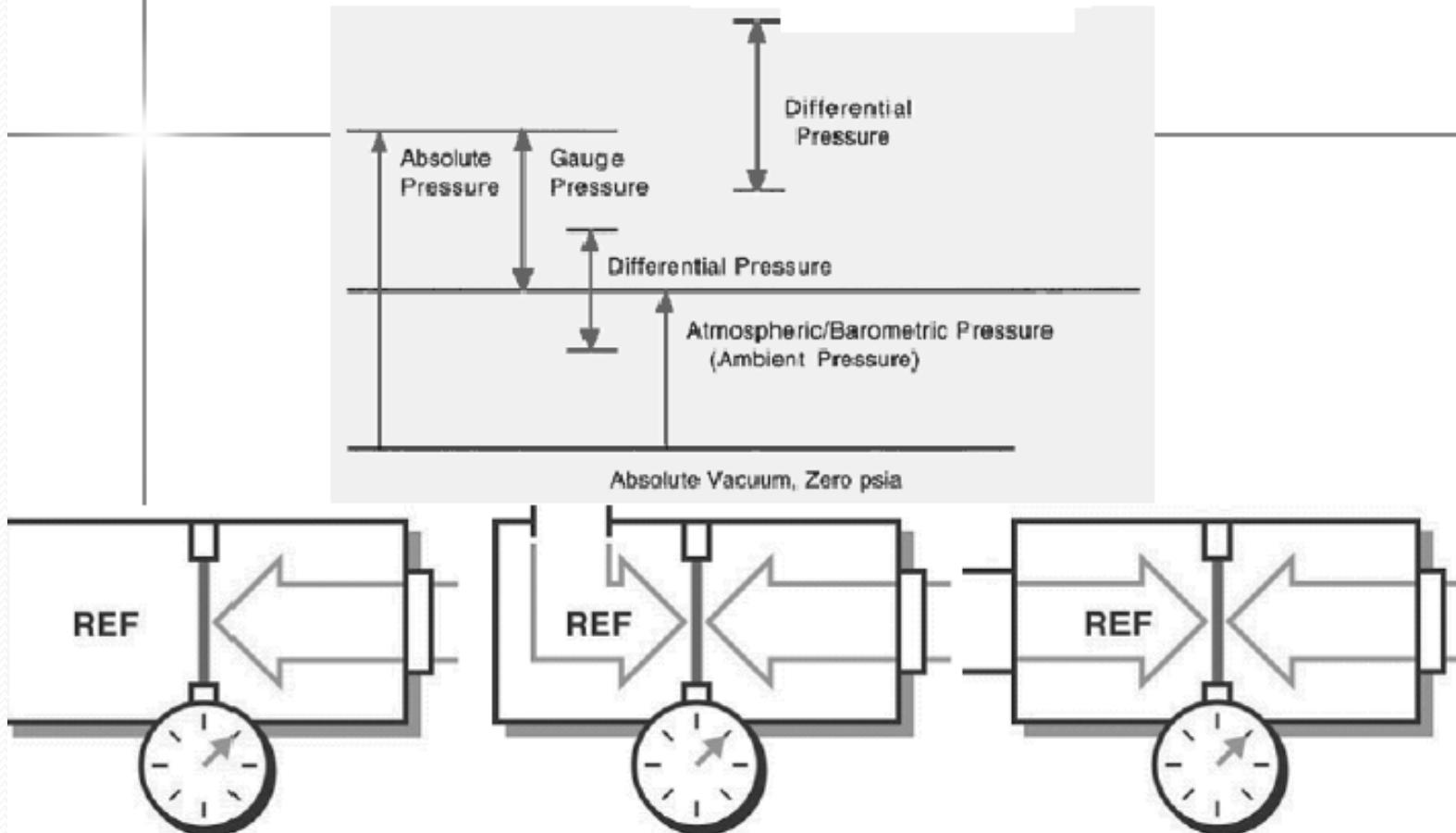


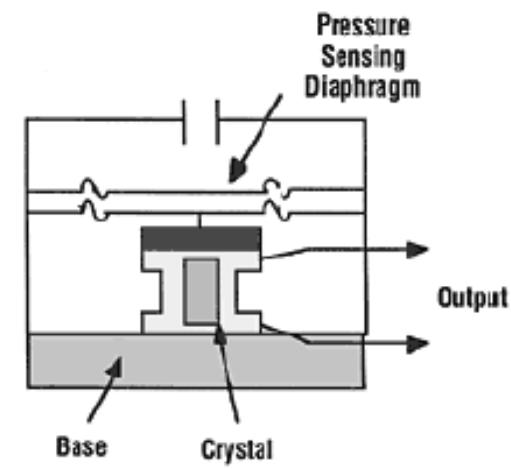
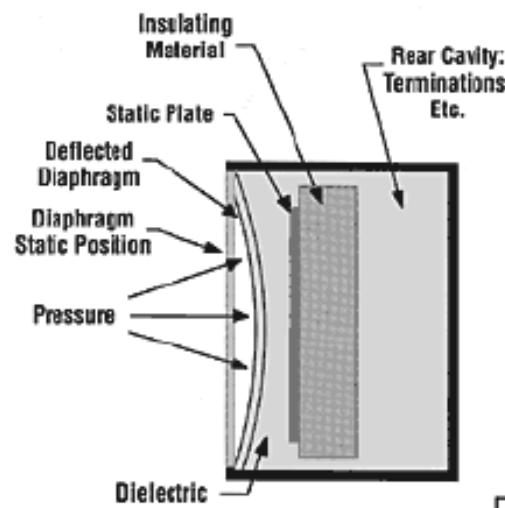
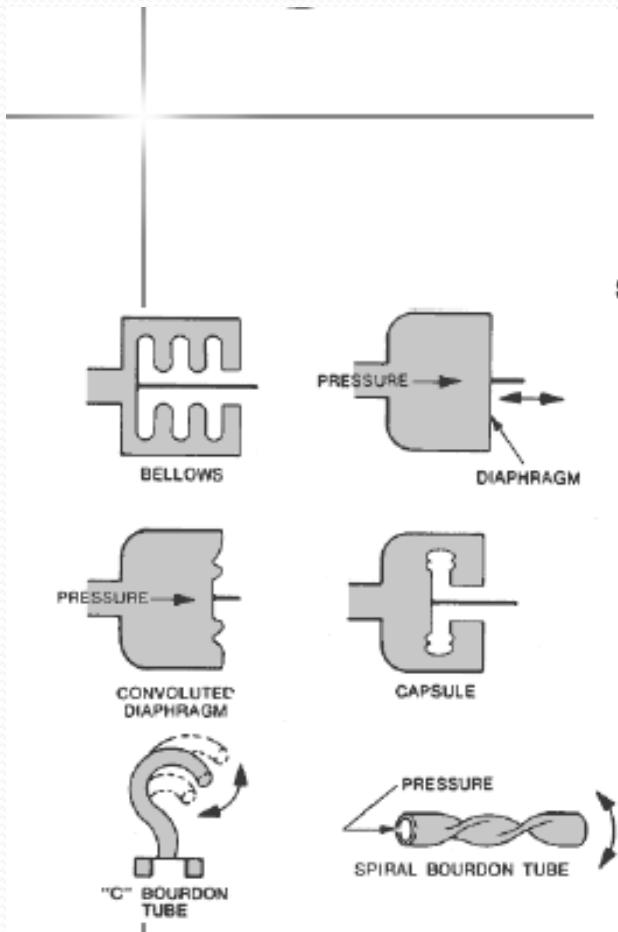
MERENJE – TAHOMETAR

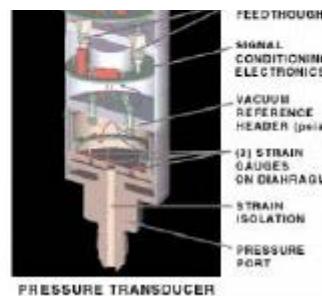
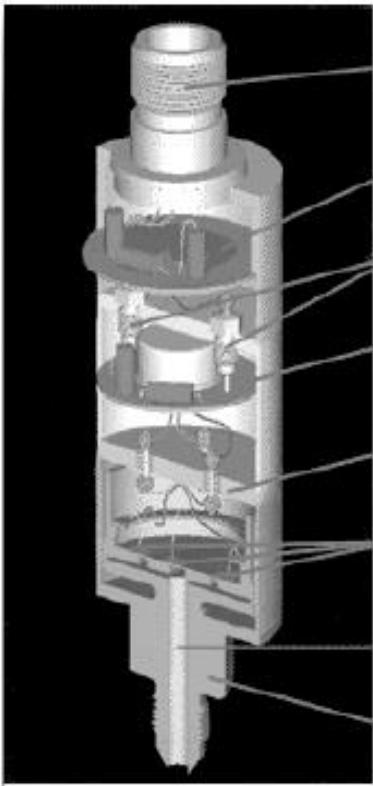
Merenje brzine okretanja



MERENJE PRITISKA







Pressure can be measured using diaphragm based sensors.

MERENJE TEMPERATURE

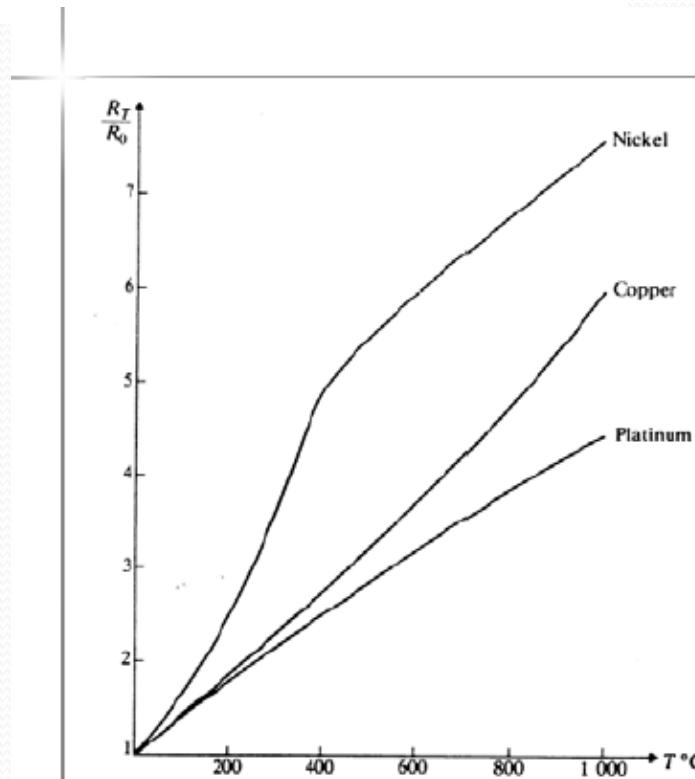
- Otpornički senzori
- Termoparovi
- Termistori
- Pirometri
- Termo kamere

■ otpornički senzori (najčešći u praksi)

- Otpor metala raste sa temperaturom (u području od -100 do 800°C)

$$R_T[\Omega] = R_0 (1 + \alpha T + \beta T^2 + \gamma T^3 + \dots)$$

$$R_T[\Omega] \approx R_0 (1 + \alpha T)$$



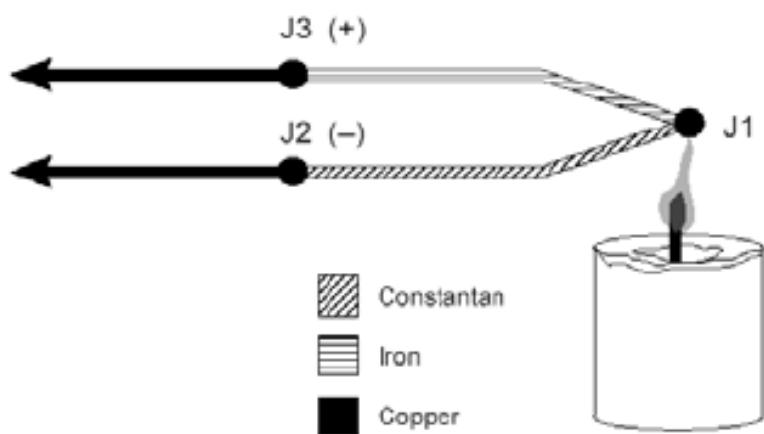
- Najčešće u praksi Pt-100 sonda (otpor od 100Ω pri 0°C)
- Volfram, bakar, nikal, ... rijeđe

■ TERMOPAROVI

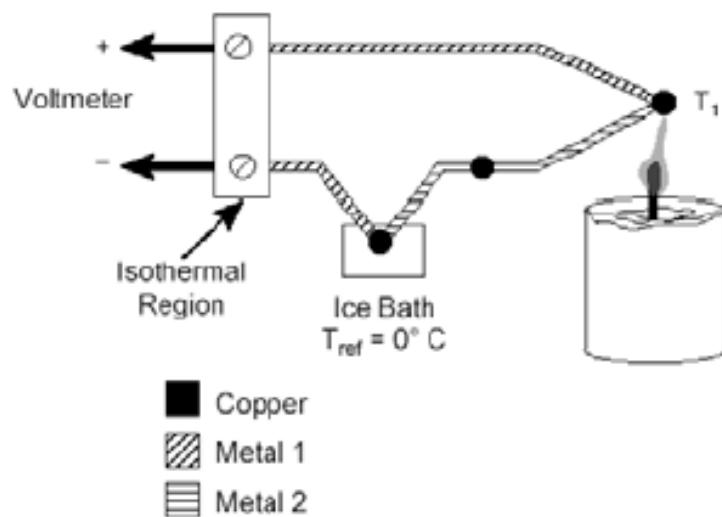
- Razlika napona je približno linearna razlici temperatura * Seebeckov koeficijent (mjera termoelektričnog napona ovisna o vrsti materijala)

$$\Delta V \approx S \Delta T$$

Konstantan =
legura od 40% Ni
+ 60% Cu



Kromel = legura od
90% Ni + 10% Cr



MERENJE TEMPERATURE

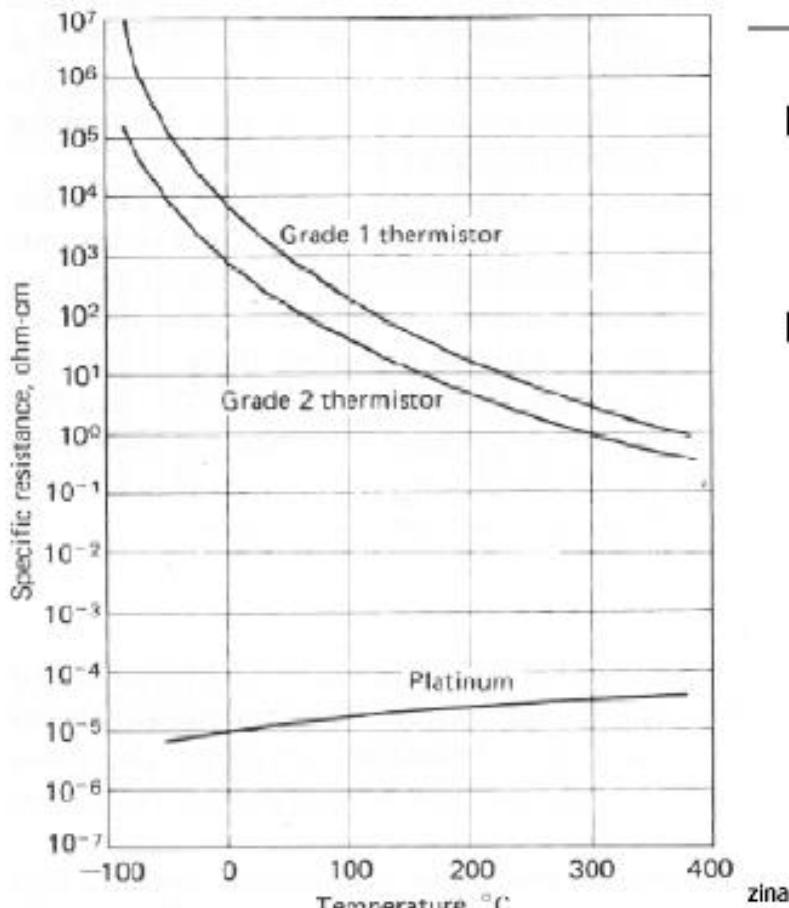
Thermocouple Type	Conductor		Temperature Range (°C)	Voltage Range (mV)	Seebeck Coefficient ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)
	Positive	Negative			
E	Chromel	Constantan	-270 to 1,000	-9.835 to 76.358	58.70 at 0 °C
J	Iron	Constantan	-210 to 1,200	-8.096 to 69.536	50.37 at 0 °C
K	Chromel	Alumel	-270 to 1,372	-6.548 to 54.874	39.48 at 0 °C
T	Copper	Constantan	-270 to 400	-6.258 to 20.869	38.74 at 0 °C
S	Platinum-10% Rhodium	Platinum	-50 to 1,768	-0.236 to 18.698	10.19 at 600 °C
R	Platinum-13% Rhodium	Platinum	-50 to 1,768	-0.226 to 21.108	11.35 at 600 °C

■ TERMISTORI

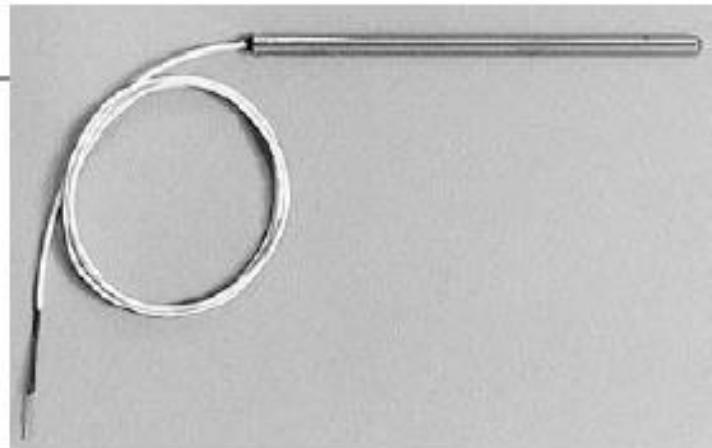
- Poluvodički senzori (smjese selenida, sulfida ili oksidi metala
– Mg, U, Cu, Co, Fe, ...)
- NTC - otpor opada sa porastom temperature
- PTC - otpor raste sa porastom temperature (za zaštitu motora i transformatora)

■ K, β – konstante termistora

$$R_{\Theta} = K e^{\frac{\beta}{\Theta}}$$



- Bolja osjetljivost od otpornih
- Manja vremenska konstanta (<1s)



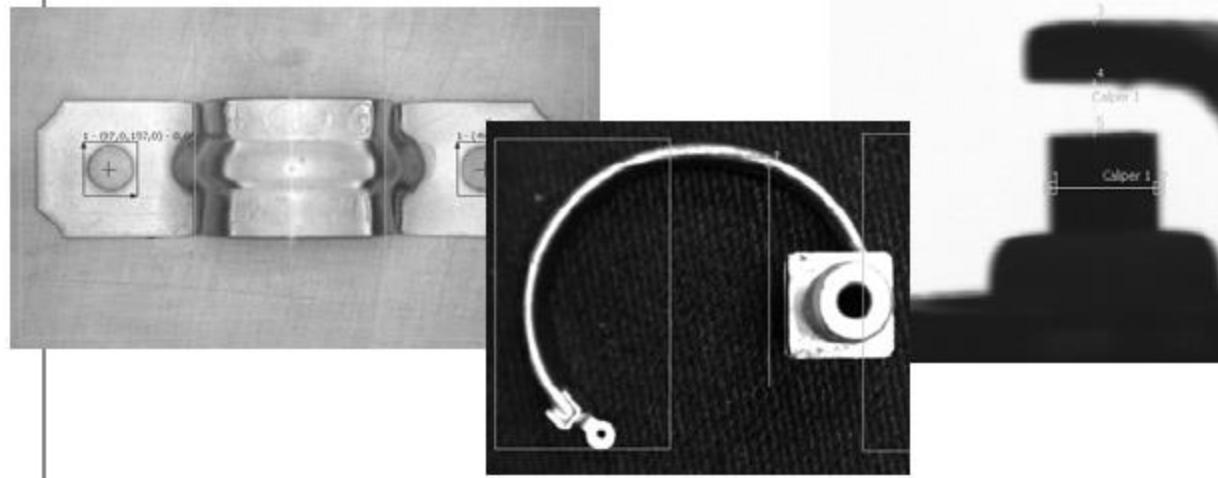
- Potrebna kompenzacija otpora vodova (otporni)
- Relativno spora dinamika (1-40 s)

MJERENJE PROTOKA

- Diferencijalni tlak
- Koriolisova sila
- Venturijeva cijev
- Pitotove cijevi
- Magnetskim poljem
- Ultrazvuk
- Radar
- Rotatometri
- ...

KAMERE

- Vizualna inspekcija (mjerjenje dimenzija, brzine, ubrzanja, boje, temperature, ...)



5