



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva



Prof.dr.sc. Vedran Bilas

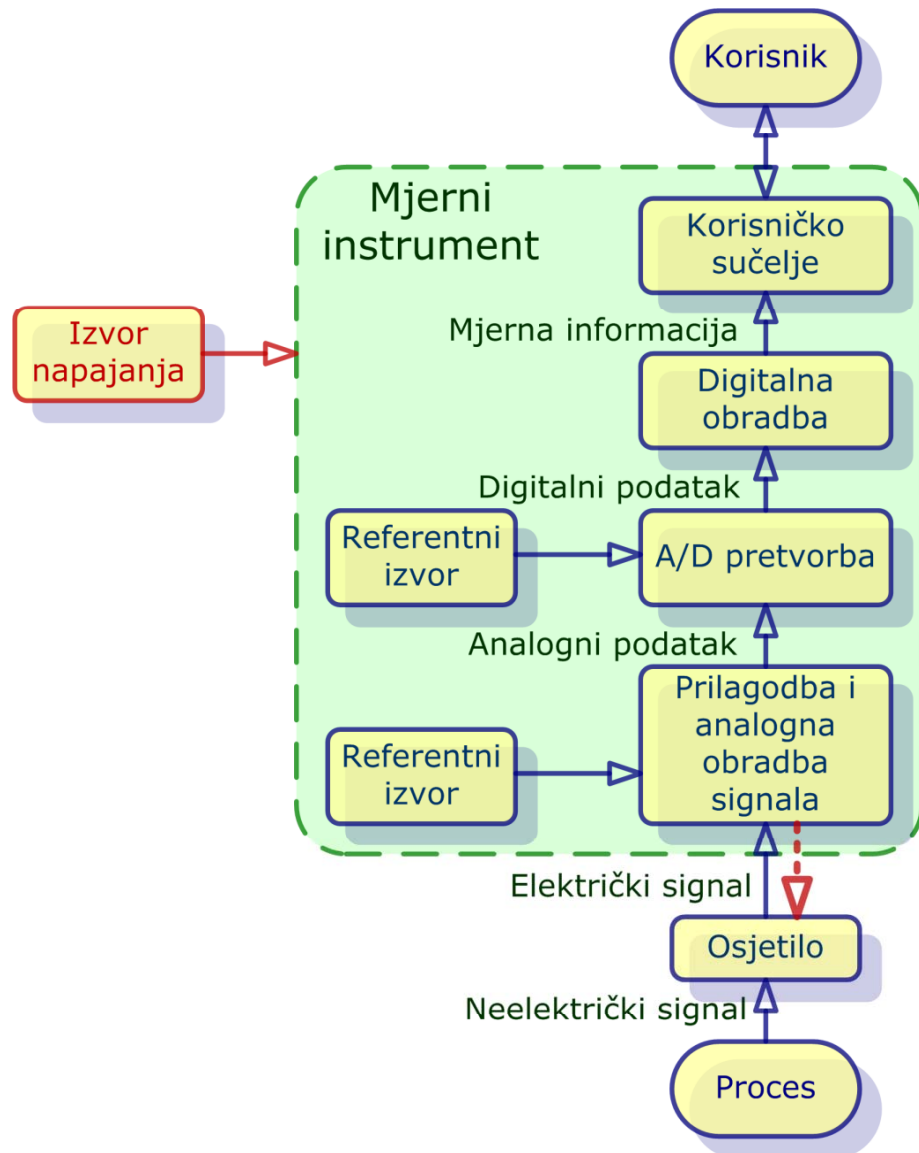
Osnove elektroničkih mjerenja i instrumentacije

P6 – Osjetila

Sadržaj

- Podjele osjetila
- Primjeri osjetila
 - Fizikalna načela
 - Spajanje u mjerni krug
- Osjetila s promjenom impedancije (R, C, L)
- Piezoelektrička osjetila
- Termopar
- Fotodioda
- Hallova sonda

Elektronički mjerni lanac



- Funkcijske cjeline
- Osjetila
- Prilagodba i analogna obradba signala
- Analogno-digitalna pretvorba
- Digitalna obradba signala
- Korisnička sučelja
- Izvor energije

Podjela osjetila – 1

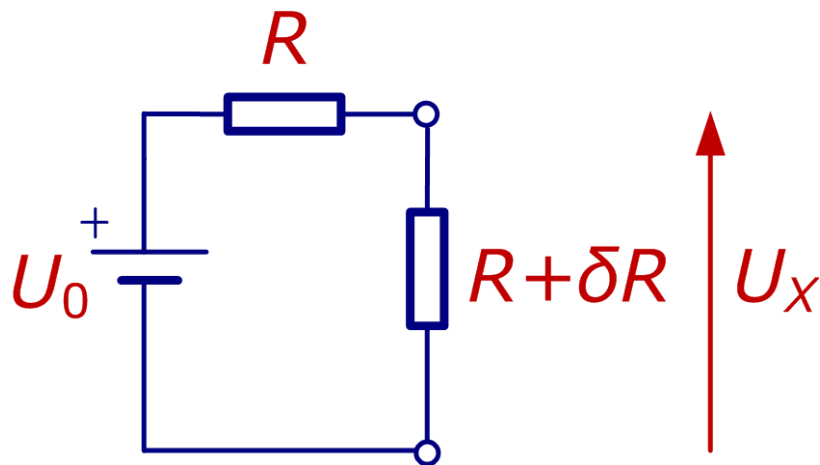
- Prema mjerenoj veličini
 - Položaj, pomak, brzina, akceleracija, vibracije
 - Sila, tlak, moment, naprezanje, kružna brzina
 - Temperatura, vlažnost, protok, koncentracija, viskoznost
 - Elektromagnetsko zračenje, optička mjerenja, ionizirajuće zračenje
 - Zvuk i ultrazvuk
 - Kemijske i biološke veličine

Podjela osjetila – 2

- Prema fizikalnom načelu rada (promjenjivoj veličini)
 - R, L, C, piezoelektrički,...
- Obliku energije mjenjenog signala
 - Termički
 - Radijacijski
 - Mehanički
 - Magnetski
 - Kemijski
 - (Biološki)
- Prema impedanciji
- Prema potrebi za vanjskim izvorom energije (aktivna, pasivna)

Otpornička osjetila

- Promjena otpora razmjerna mjerenoj veličini
 - Primjer: Potenciometar za mjerenje linearnog pomaka
 - Mjerenje promjene otpora mjerenjem napona na otporniku
 - Osjetljivost, nelinearnost



$$U_x = U_0 \frac{R}{2R + \delta R} + U_0 \frac{\delta R}{2R + \delta R}$$

Osjetilo za mjerenje temperature - 1

- Osjetilo za mjerenje temperature (*RTD - Resistive Temperature Detector*)
- Ovisnost otpora metala o temperaturi
 - pozitivan temperaturni koeficijent (PTC)
- Najčešća primjena **žica ili tanki sloj platine** (Pt)
- Vrijednosti otpora pri 0°C
 - 100Ω - Pt100, 1000Ω - Pt1000
- Izvrsna stabilnost
- Primjenjuje se u širokom rasponu od -220°C do + 750°C

Osjetilo za mjerenje temperature - 2

- Ovisnost otpora o temperaturi - načelno nelinearna
- Primjer Pt100 (aproksimacija razvojem u red)

$$R(T) = R_0 \left[1 + \alpha T + \beta T^2 + \gamma T^3 (T - 100^\circ \text{C}) \right]$$

$$R_0 = 100\Omega, \quad 0^\circ \text{C}$$

$$\alpha = 3,90802 \cdot 10^{-3}^\circ \text{C}^{-1}$$

$$\beta = -5,802 \cdot 10^{-7}^\circ \text{C}^{-2}$$

$$\gamma = \begin{cases} -4,27350 \cdot 10^{-12}^\circ \text{C}^{-4} & (T < 0^\circ \text{C}) \\ 0 & (T > 0^\circ \text{C}) \end{cases}$$

- Primjenjuje se pojednostavljeni izraz
 - točne vrijednosti se zadaju tablično

$$R(T) = R_0 \left[1 + \alpha (T - T_0) \right]$$

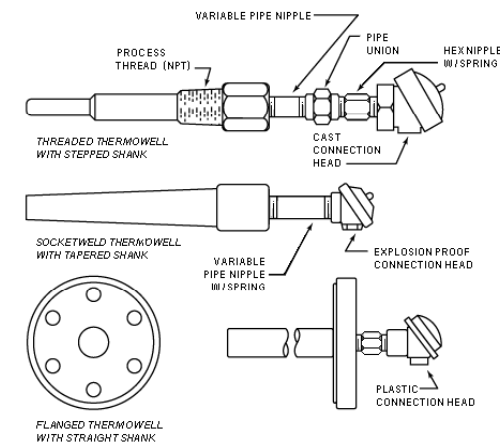
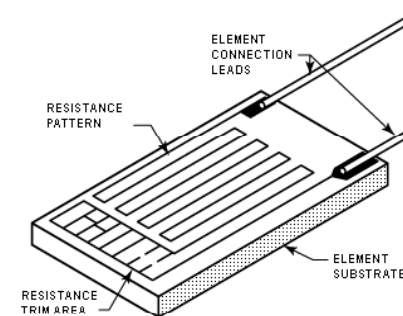
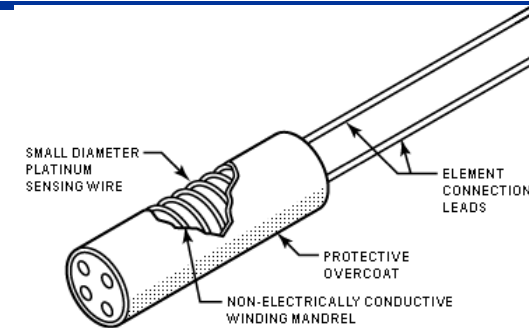
$$R_0 = 100\Omega, \quad 0^\circ \text{C}$$

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100^\circ \text{C} \cdot R_0} \left[\frac{\Omega}{^\circ \text{C}} \right]$$

$$\alpha \approx 0,4\%^\circ \text{C}^{-1}$$

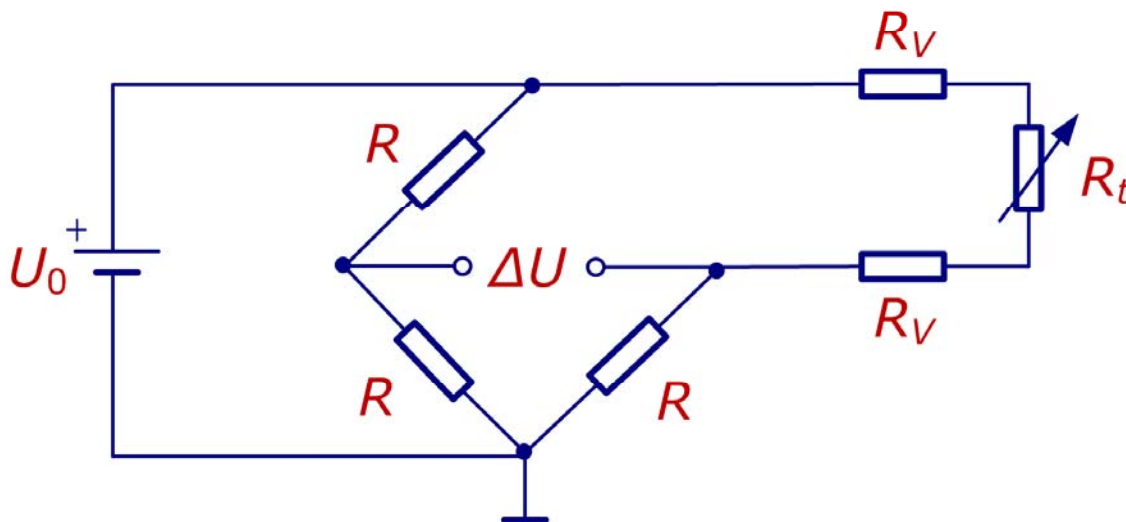
Osjetilo za mjerenje temperature - 3

- Građa osjetila
- Platinska žica
 - specifični otpor $0,11\Omega\text{mm}^2/\text{m}$
 - debljina $\sim 10\mu\text{m}$
- **Žica** se namotava na keramičko tijelo
- **Tanki metalni film** se nanosi na keramičku podlogu
- Ugrađuju se u **metalna kućišta** čime se definiraju termička svojstva (brzina odziva)



Osjetilo za mjerenje temperature - 4

- Spajanje osjetila
- Primjenjuju se **male struje** ($\sim 1\text{mA}$) radi sprečavanja samozagrijavanja
- **Mosni spoj** s jednim promjenjivim otpornikom
 - Nelinearnost, utjecaj spojnih vodova



$$\Delta U = U_0 \frac{R}{R + 2R_V + R + \Delta R} - U_0 \frac{R}{2R}$$

Temperaturno ovisni otpornici-1

- **Termistor** (*THERMally sensitive resISTOR*)
- **Temperaturni koeficijent**
 - **Negativan** (NTC) koristi se za mjerenje
 - **Pozitivan** (PTC) koristi se za zaštitne sklopove
- **Poluvodički materijal** (smjesa metalnih oksida)
- **Izrazito nelinearna karakteristika**, eksponencijalna
 - Vrlo dobro se modelira interpolacijskim funkcijama
- **Visoka osjetljivost** (temperaturni koeficijent red veličine veći od Pt osjetila), - 3%/°C do -6%/°C
- Primjena -50°C do 150°C
- Otpor na 25°C je tipično između 100Ω i 100kΩ (10Ω do 40MΩ)
- Male tolerancije u proizvodnji, malo rasipanje karakteristika, ponovljivost, zamjenjivost

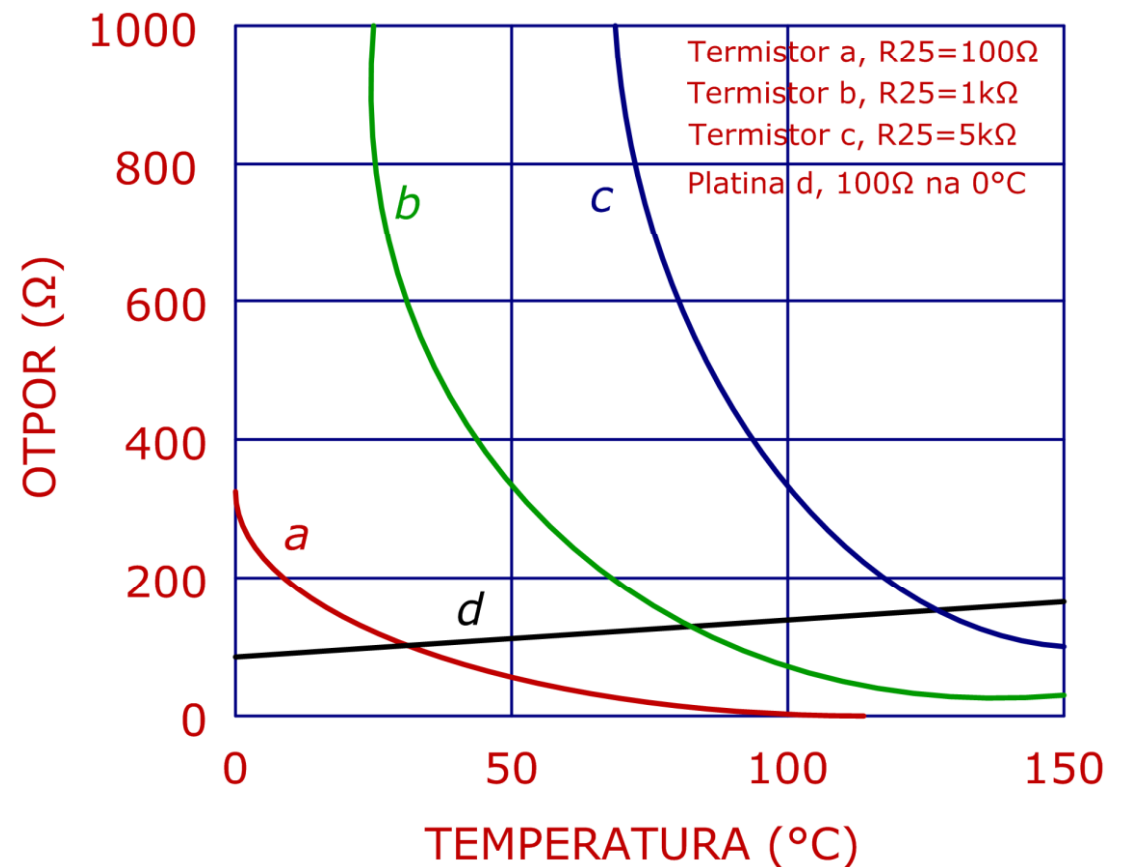
Temperaturno ovisni otpornici-2

- Ovisnost otpora o temperaturi, aproksimacija eksponencijalnom funkcijom (Steinhart-Hart)

$$R(T) = Ae^{\left(\frac{B}{T}\right)}$$

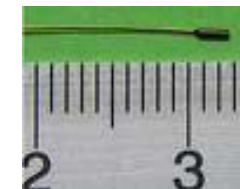
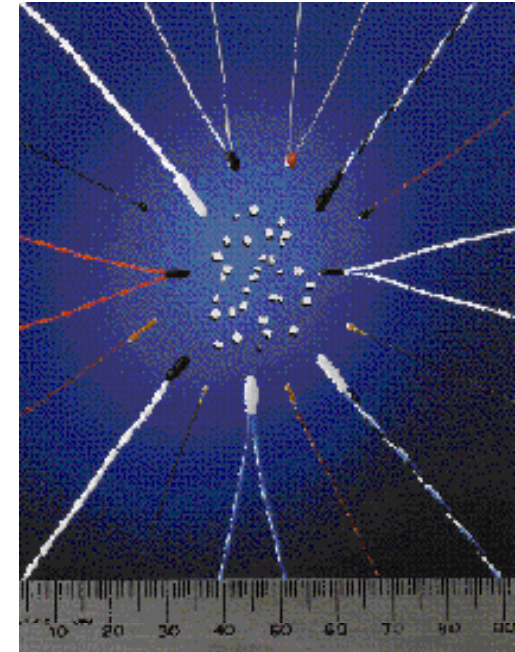
- $B \sim 2000-5000$ [K], konstanta ovisna o materijalu
- T [K] temperatura
- Osjetljivost je funkcija temperature
- Mjerena temperatura se određuje iz otpora na temperaturi 25°C i izmjerenog otpora

$$R(T_2) = R(T_1) e^{B\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)}$$



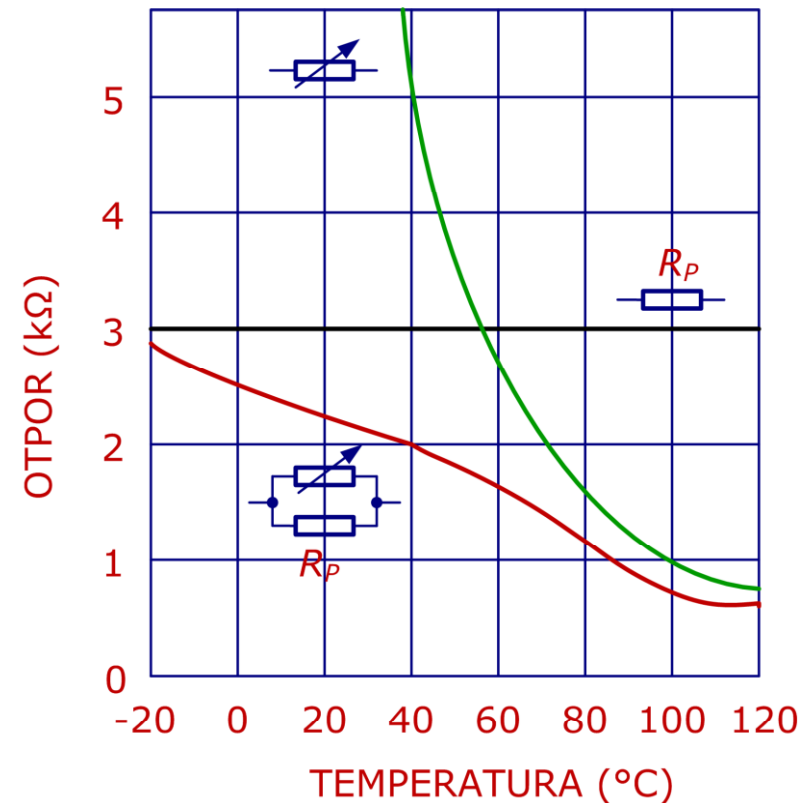
Temperaturno ovisni otpornici-3

- **Izrada** - u različitim oblicima i različitim dimenzija
- **Komponente za površinsku ugradnju** (SMD - *Surface Mount Device*)
- **Diskovi ili cilindri s dvije priključne žice**
- Zaštićuju se plastičnim kućištem
- **Male dimenzije** omogućuju vrlo veliku brzinu odziva



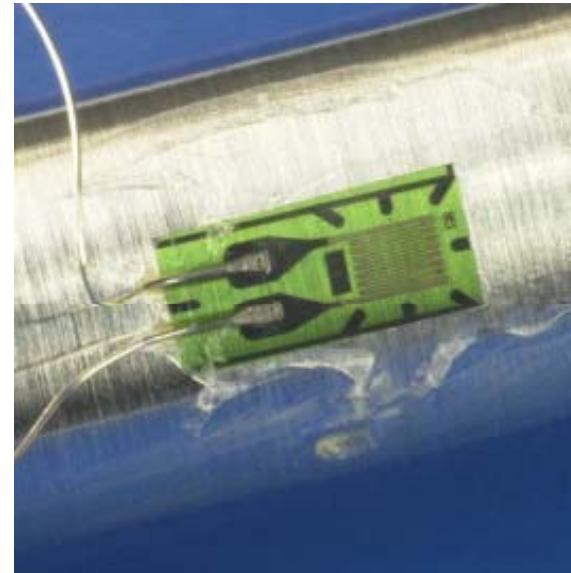
Temperaturno ovisni otpornici-4

- Mjerenje napona na termistoru – izazvanog konstantnom strujom, naponsko djelilo
- Linearizacija u dijelu prijenosne karakteristike
- Serijsko ili paralelno spajanje otpornika stalne vrijednosti



Tenzometri - 1

- Tenzometar (*strain gauge*)
 - otpornička traka za mjerenje naprezanja mjerenjem promjene promjera i duljine vodiča
 - svojstvo promjene otpora promjenom dimenzija
- Ugrađuju se lijepljenjem na mehaničku konstrukciju koja se napreže
- Temperatura utječe na dimenzije
 - ugradnjom (kompenzacijski otpornik) i spajanjem otpornika treba se osigurati minimalan utjecaj temperature



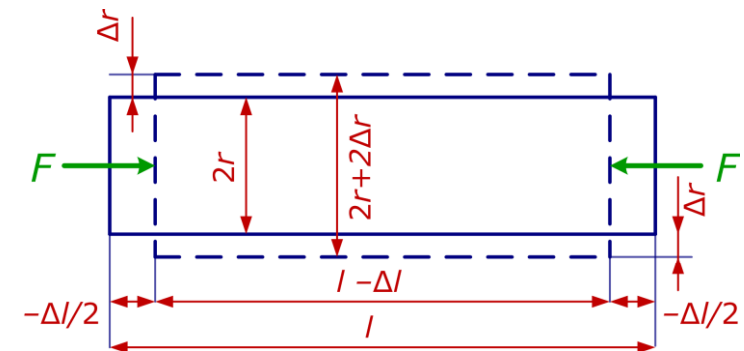
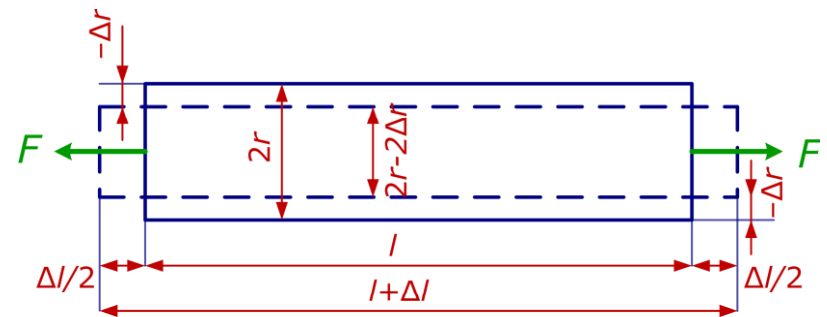
Tenzometri - 2

- **Naprezanje** σ (*stress*)
 - djelovanje sile
 - vlačno, tlačno
- Posljedica djelovanja sile **deformacija** ε (*strain*)
 - skraćenje, produljenje
- Do **granica elastičnosti**, naprezanje je linearno razmjerno relativnom produljenju (Youngov modul elastičnosti E)
 - deformacija u smjeru djelovanja sile i okomito na smjer djelovanja sile
 - $\mu=0,25-0,4$ za metale (Poissonov koeficijent)

$$\sigma = \frac{F}{S} \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l}$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$



$$\varepsilon_r = \frac{\Delta r}{r} \quad \varepsilon_r = -\mu \varepsilon_l$$

Promjena otpora s naprezanjem

- Otpor ovisi o materijalu (specifični otpor) i dimenzijama otpornika
- **Faktor pretvorbe K** (tipična vrijednost oko 2) vezuje promjenu otpora i deformaciju
- Naprezanje se izračunava poznavanjem modula elastičnosti materijala

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad \frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S}$$

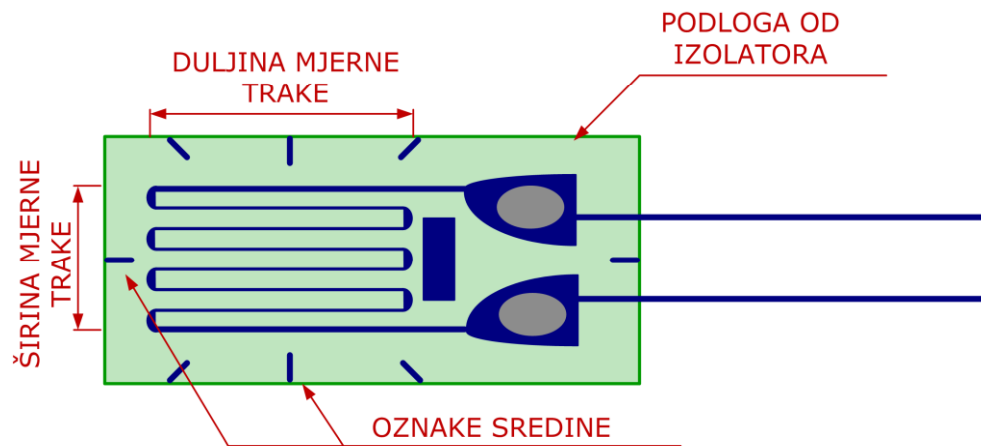
$$S = r^2 \pi, \quad dS = 2r\pi dr, \quad \frac{dS}{S} = \frac{2}{r} dr$$

$$\frac{\frac{dR}{R}}{\frac{dl}{l}} = \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\frac{dl}{l}} + 1 - 2 \left(\frac{\frac{dr}{r}}{\frac{dl}{l}} \right) = \theta + 1 + 2\mu = K$$

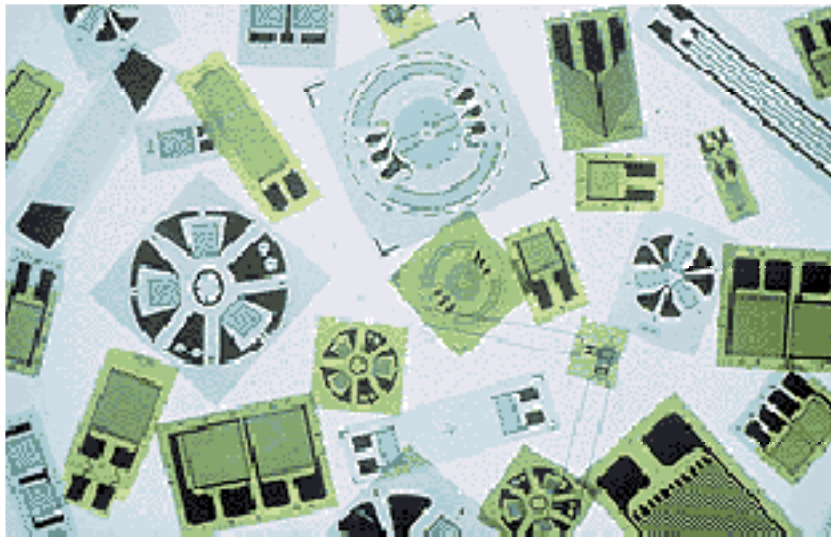
$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \Rightarrow \varepsilon = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{K} \Rightarrow \sigma = \varepsilon E$$

$$\sigma = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{K} E$$

Izvedba tenzometara

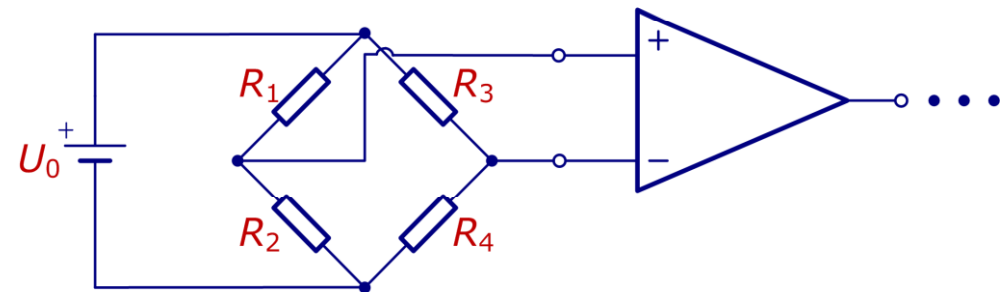
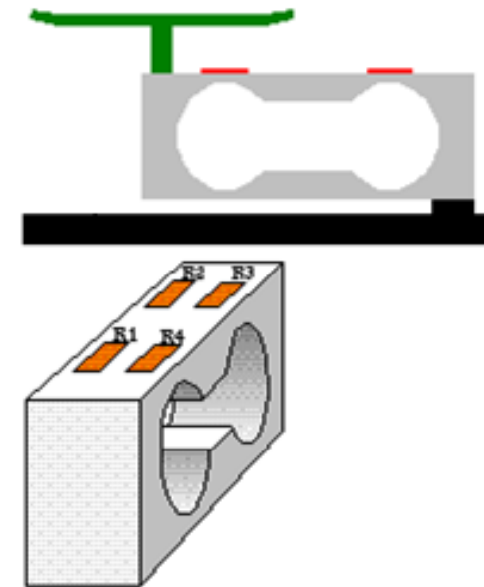


- Mehaničke izvedbe se razlikuju obzirom na mjerenu deformaciju
- Tipične vrijednosti otpora
 - 120Ω , 350Ω , 700Ω , 1000Ω



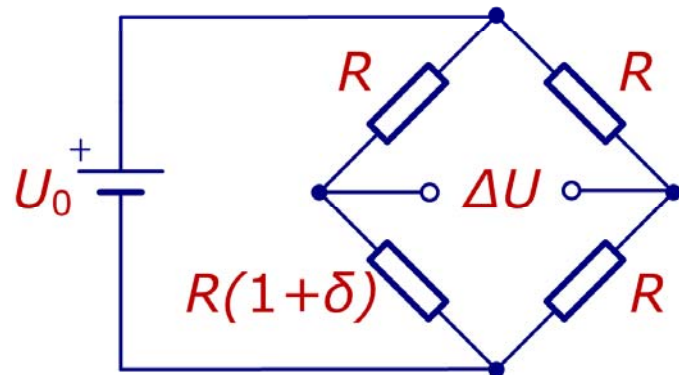
Spajanje tenzometara

- U pravilu tenzometri se spajaju u **mosni spoj** (*Wheatstone bridge*)
 - 1-4 promjenjiva otpornika
 - kompenzacijski otpornici
- **Mosni spoj ima inherentne prednosti**
 - potiskivanje svih zajedničkih utjecajnih veličina (temperatura, električne smetnje)
- **Most je potrebno napajati**
 - izlazni napon ovisi o naponu napajanja mosta
- **Mosni spoj rezultira diferencijalnim izlaznim signalom**
- **Most može biti udaljen od pojačala** za mjerenje diferencijalnog napona
 - unosi problem pada napona
 - smetnje
 - višezilni spojevi



Osnove mosnih spojeva-1

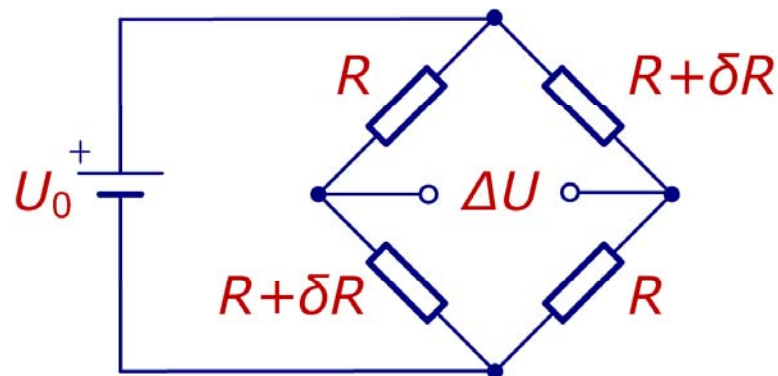
a) Jedan promjenjivi otpornik



$$\Delta U = U_0 \frac{R + \Delta R}{R + R + \Delta R} - U_0 \frac{R}{2R}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \delta \quad \Delta U = U_0 \frac{\delta}{2(2 + \delta)}$$

b) Dva promjenjiva otpornika I

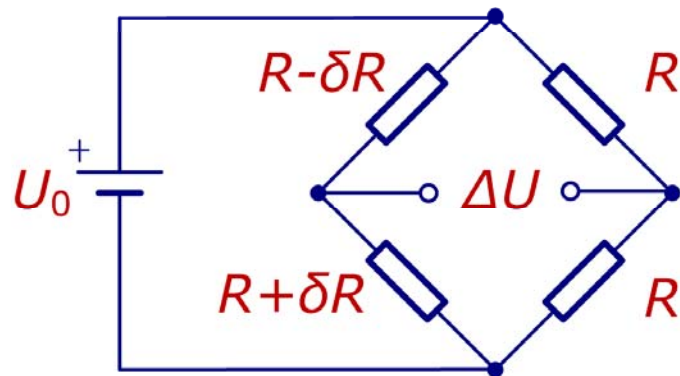


$$\Delta U = U_0 \left(\frac{R(1 + \delta)}{R + R(1 + \delta)} - \frac{R}{R + R(1 + \delta)} \right)$$

$$\Delta U = U_0 \frac{\delta}{2 + \delta}$$

Osnove mosnih spojeva-2

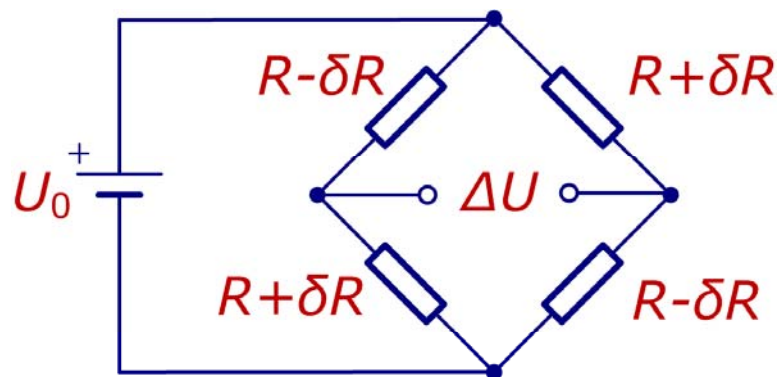
c) Dva promjenjiva otpornika II



$$\Delta U = U_0 \left(\frac{R(1+\delta)}{2R} - \frac{R}{2R} \right)$$

$$\Delta U = U_0 \frac{\delta}{2}$$

d) Četiri promjenjiva otpornika



$$\Delta U = U_0 \left(\frac{R(1+\delta)}{2R} - \frac{R(1-\delta)}{2R} \right)$$

$$\Delta U = U_0 \delta$$

Ugradnja tenzometara -1



Kapacitivna osjetila

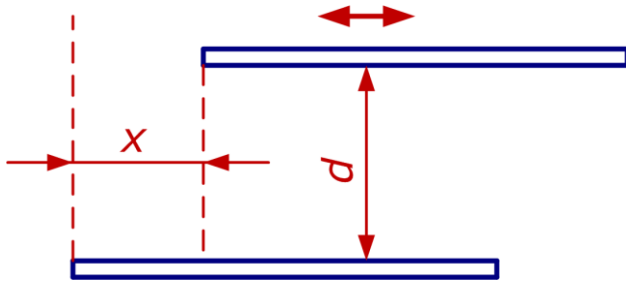
- Kapacitet pločastog kondenzatora

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d}$$

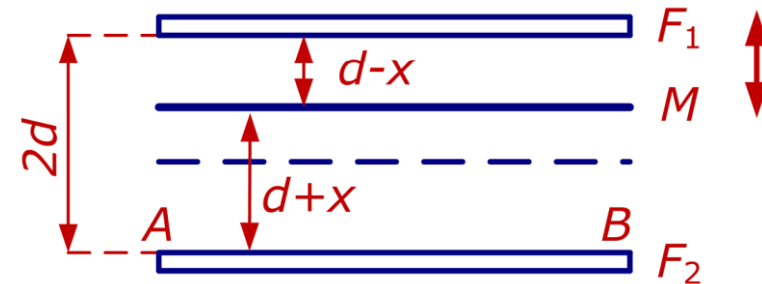
- **Promjenjive veličine:**
 - razmak, površina, dielektrik
 - najčešće pomicanje elektroda (mjerjenje pomaka, tlaka, sile, vibracija, visine stupca tekućine, detekcija vrste fluida, mjerjenje vlažnosti ili mokrine, ...)
- Mehaničke konstrukcije, do MEMS izvedbi za očitavanja pomaka mikroskopskih struktura
- Promjena kapaciteta od reda femtofarada do pikofarada, **vrlo visoka razlučivost**

Kapacitivna osjetila – pomak pločica

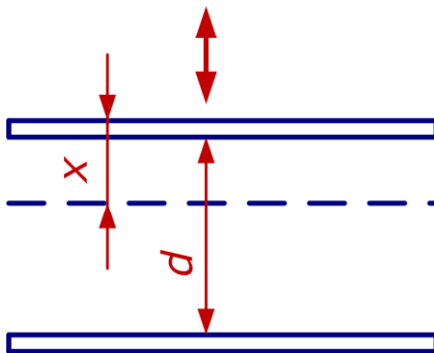
a) Promjena površine



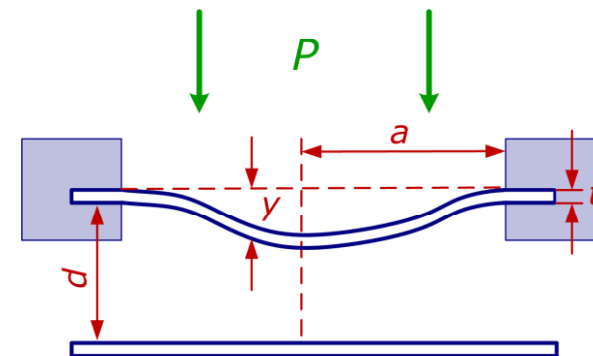
c) Promjena razmaka, diferencijalno



b) Promjena razmaka

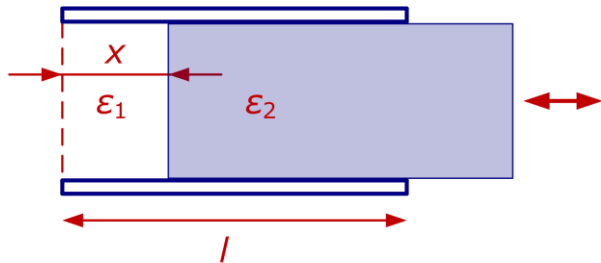


d) Promjena površine i razmaka, mjerenje tlaka

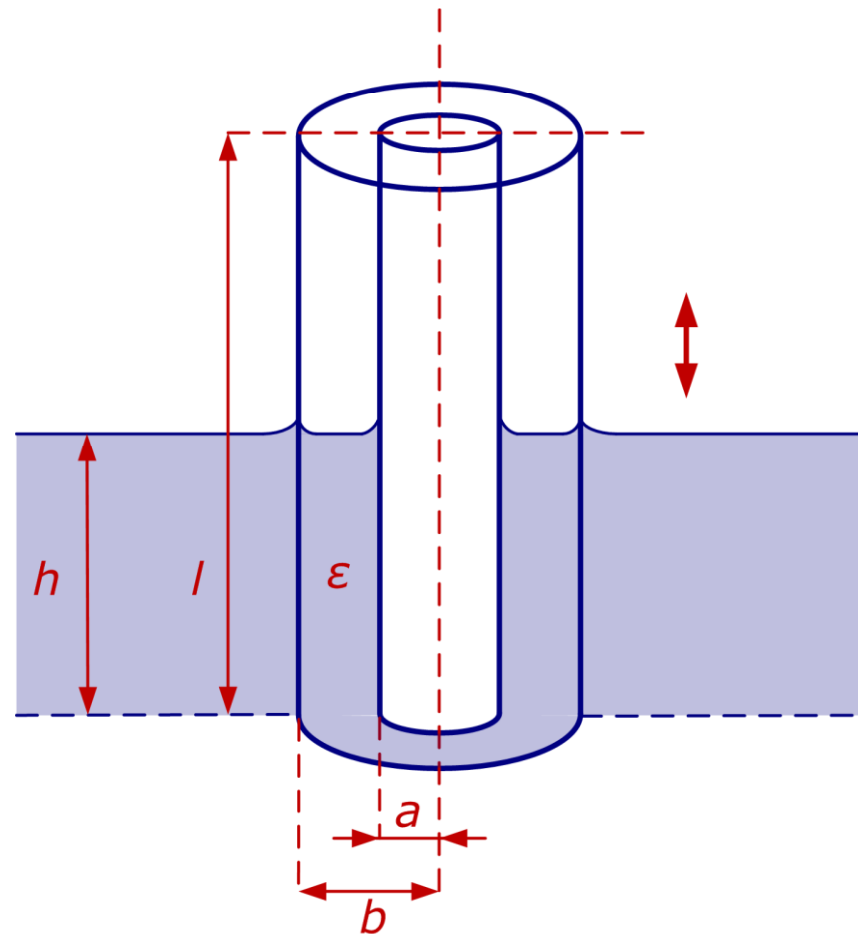


Kapacitivna osjetila – promjena dielektrika

a) Pomak dielektrika

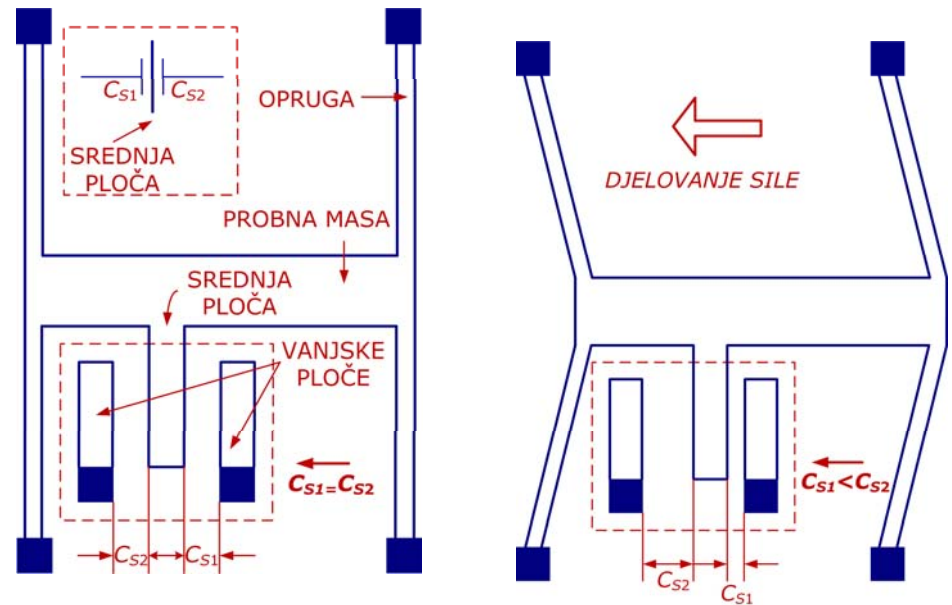
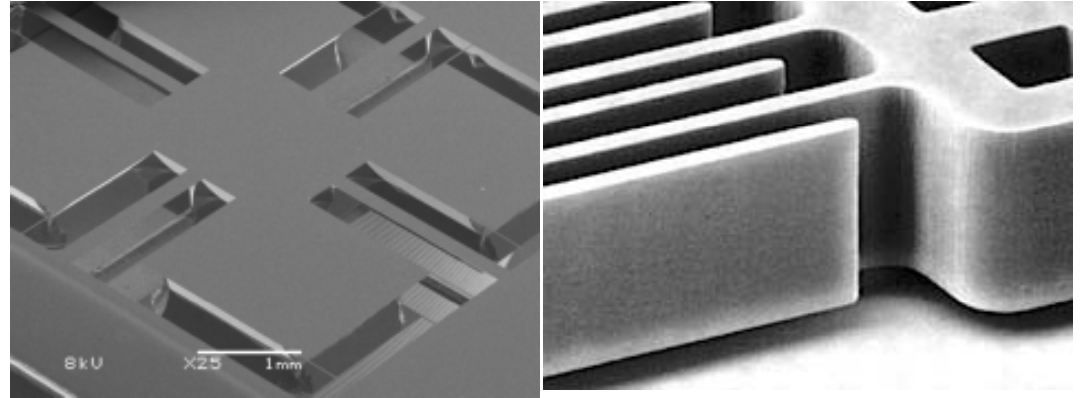


b) Promjena visine stupca

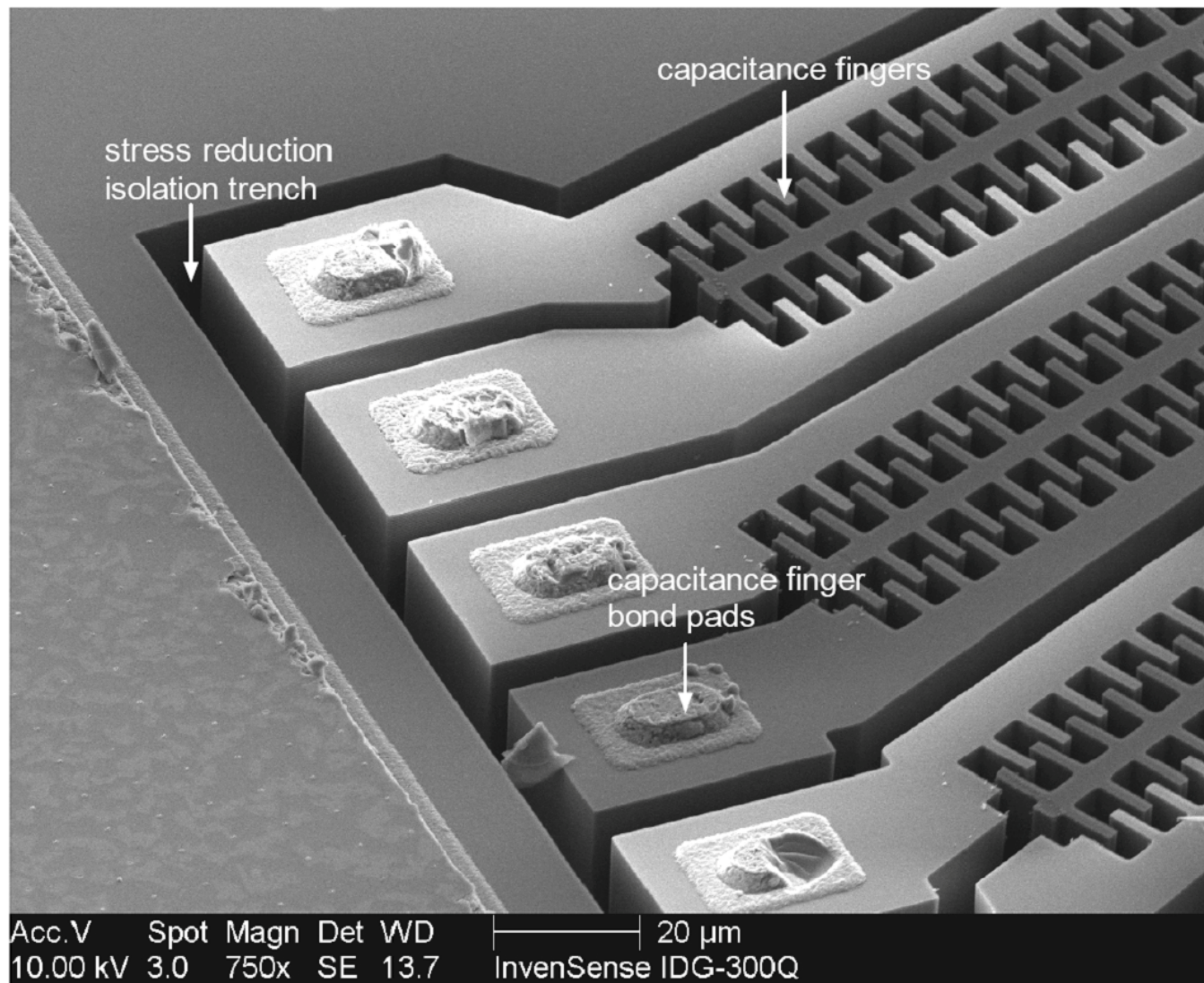


Kapacitivna osjetila - MEMS

- Mikro elektromehanički sustavi (MEMS - *MicroElectroMechanical System*)
- Poluvodička tehnologija
- Mikroskopske dimenzije
- Mjerenje pomaka preko promjene kapaciteta
- Primjer: MEMS akcelerometar

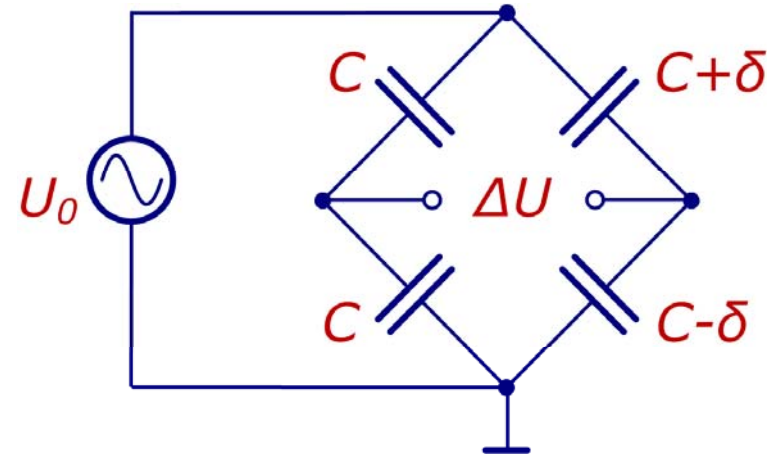


Kapacitivna osjetila - MEMS



Spajanje kapacitivnih osjetila

- Spajanje u "polumost",
izmjenično napajanje
 - diferencijalni signal postoji
uslijed razlika u modulu i fazi
impedancija
- Osjetilo može biti dio oscilatora
 - promjena kapaciteta mijenja
frekvenciju



Induktivna osjetila

- Dvije skupine (**mjerenje pomaka**):
 - temeljene na **promjeni magnetskog otpora** (reluktancije) uslijed **promjene duljine zračnog raspora**
 - temeljene na **promjeni induktiviteta** uslijed **promjene položaja kotve**
- Vrlo robusni
- Primjenjuju se u industrijskim mjerenjima
- Oklapanjem se smanjuje utjecaj vanjskog magnetskog polja

Pretvornik s promjenom reluktancije

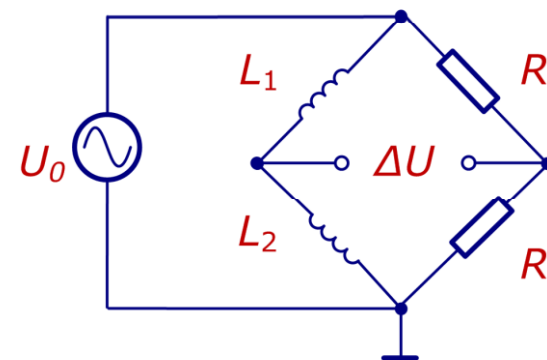
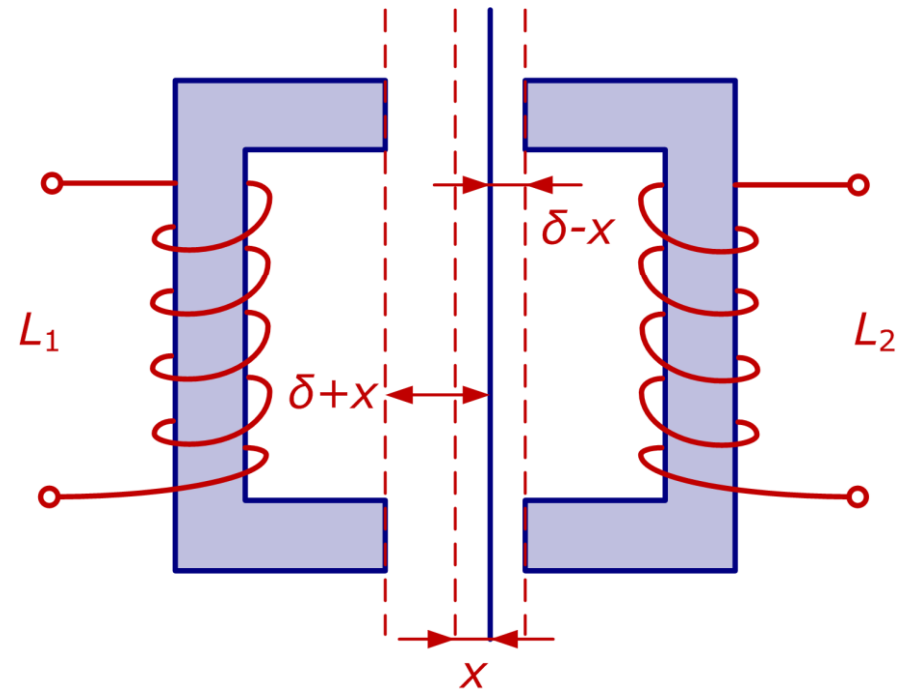
- Pomak jezgre
- Izmjenično napajanje
- Mosni spoj

$$L_1 = \frac{L_0}{1 + 2\alpha(\delta + x)}$$

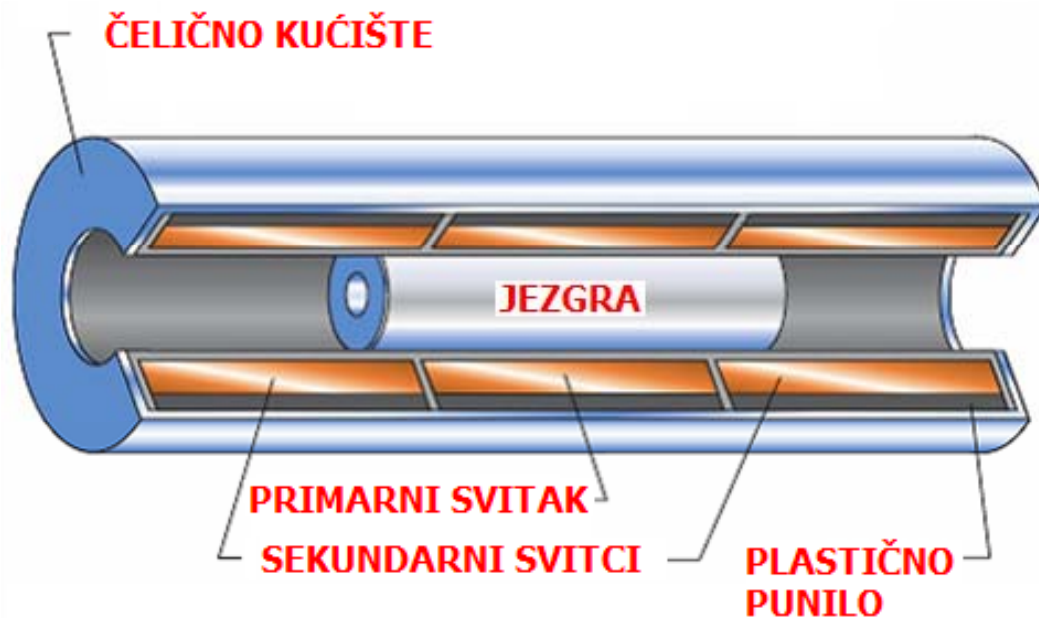
$$L_2 = \frac{L_0}{1 + 2\alpha(\delta - x)}$$

$$\frac{\Delta U}{U_0} = \frac{j\omega L_2}{j\omega L_1 + j\omega L_2} - \frac{1}{2} = \frac{L_2}{L_1 + L_2} - \frac{1}{2}$$

$$\frac{\Delta U}{U_0} = \frac{x}{\left(\frac{1}{\alpha} + 2\delta\right)}$$

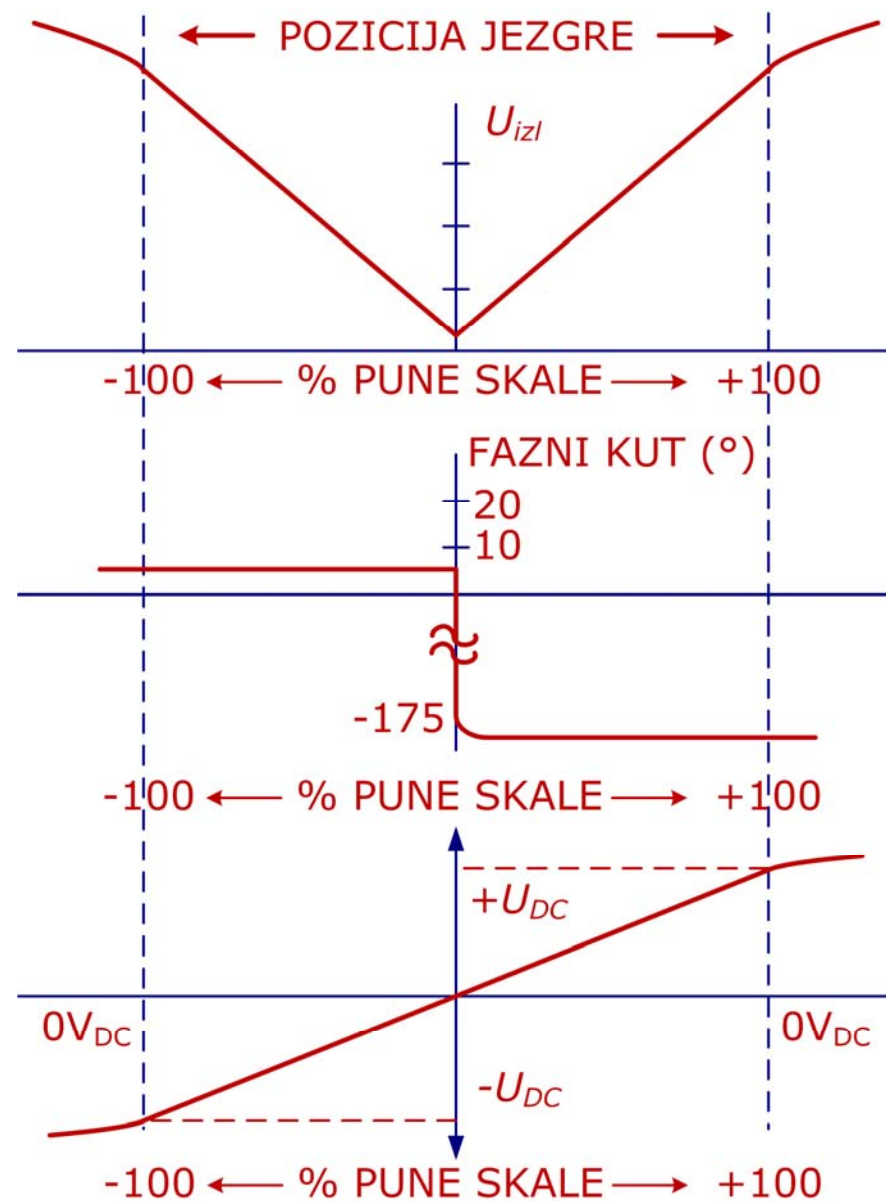
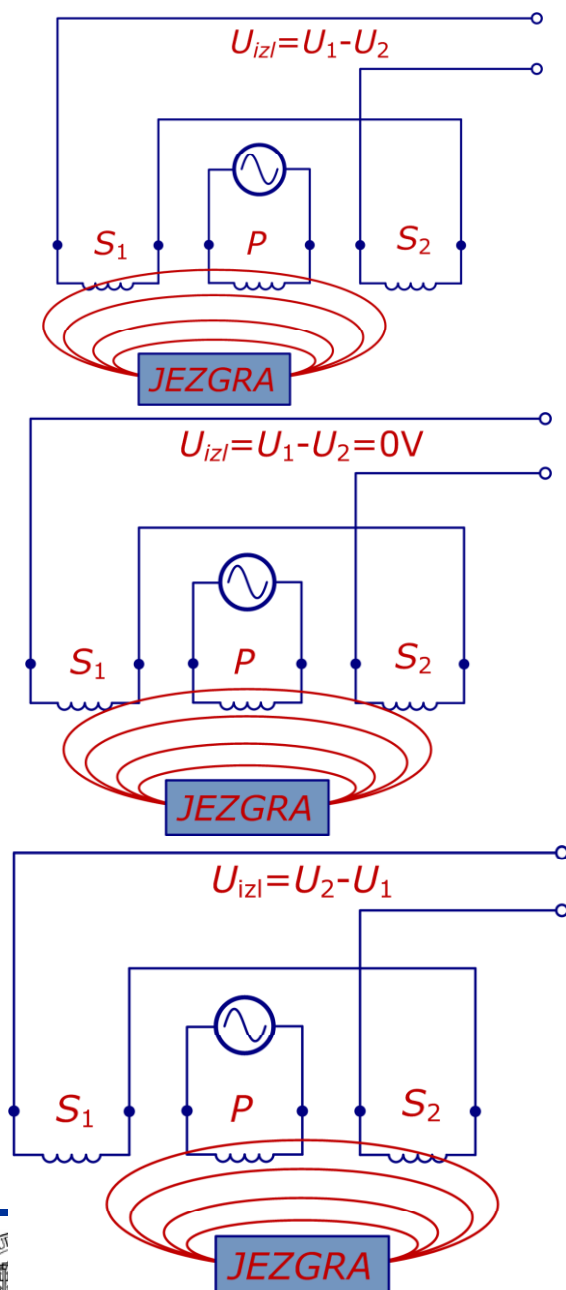


Pretvornik s promjenom induktiviteta



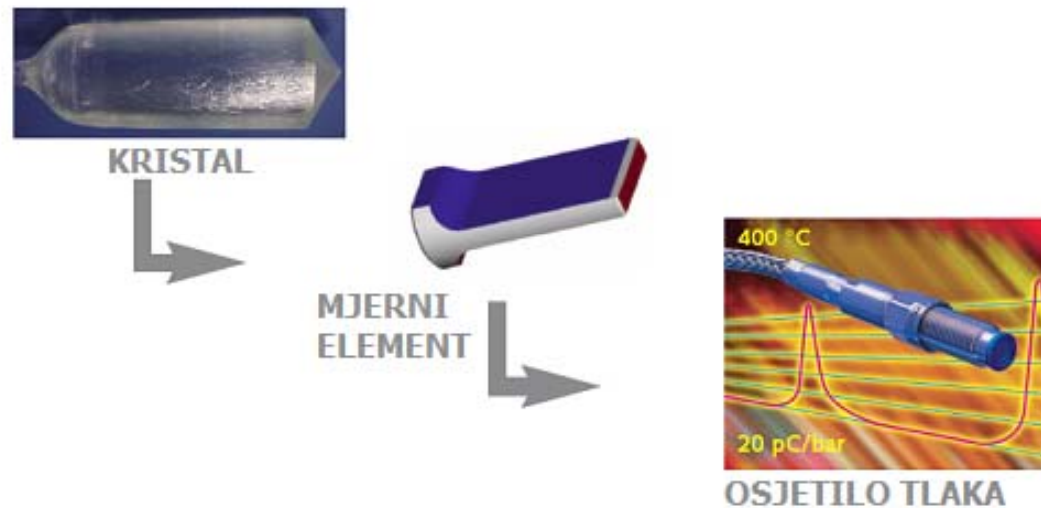
- Linearni diferencijalni transformator (*LVDT* - *Linear Variable Differential Trasformer*)
- Mjerilo promjene međuinduktiviteta dvaju sekundarnih i jednog primarnog svitka
- Vrhunsko mjerilo vrlo malih pomaka
- Izmjenično napajanje
- Mosni spoj
- Detekcijom faze određuje se smjer pomaka jezgre

LVDT – načelo rada



Piezoelektrička osjetila

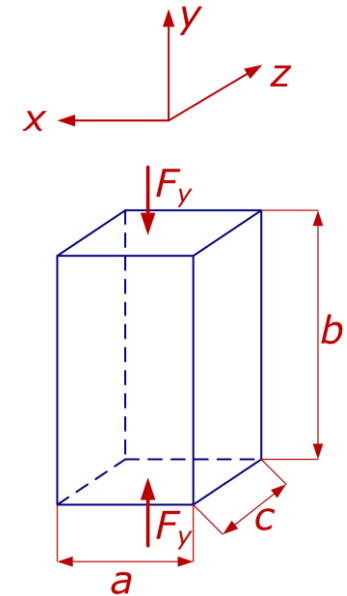
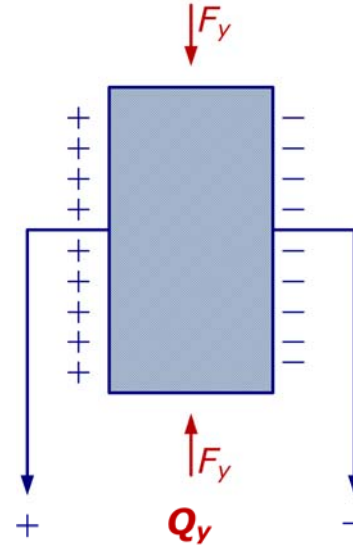
- Pojava naboja kao posljedica djelovanja sile na kristal naziva se piezoelektričkim efektom
 - Količina naboja Q , razmjerna je sili F
- Piezoelektrički materijali
 - kremen (*quartz*)
 - keramike
- Primjena za mjerenje sile, tlaka, akceleracije



Piezoelektrička osjetila - načelo

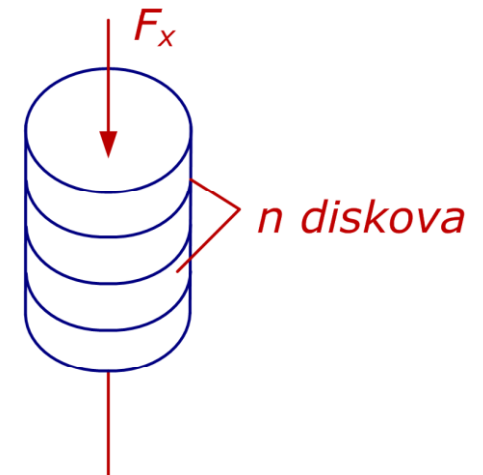
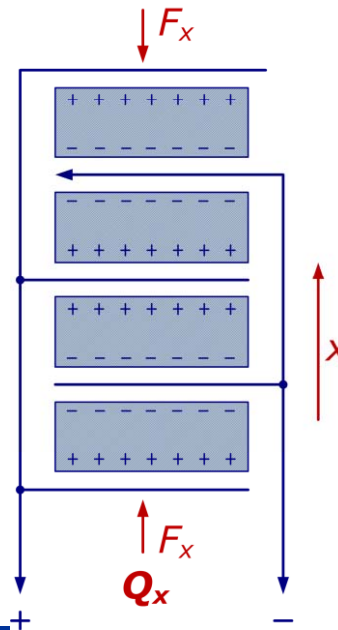
- Longitudinalna sila
 - Osjetilo oblika štapića
 - Količina naboja ovisi o geometriji

$$Q_y = -2,3\alpha F_y \frac{b}{a} \quad [\text{pC}]$$



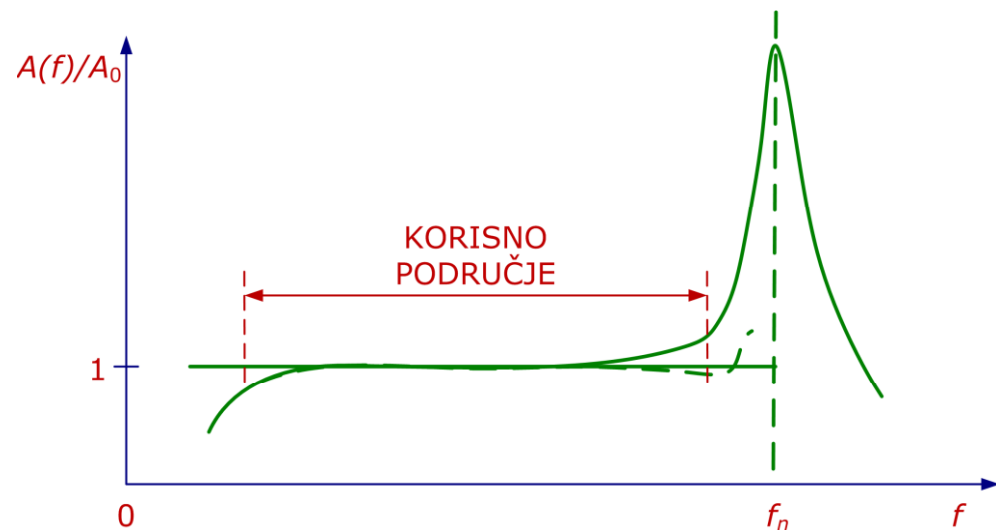
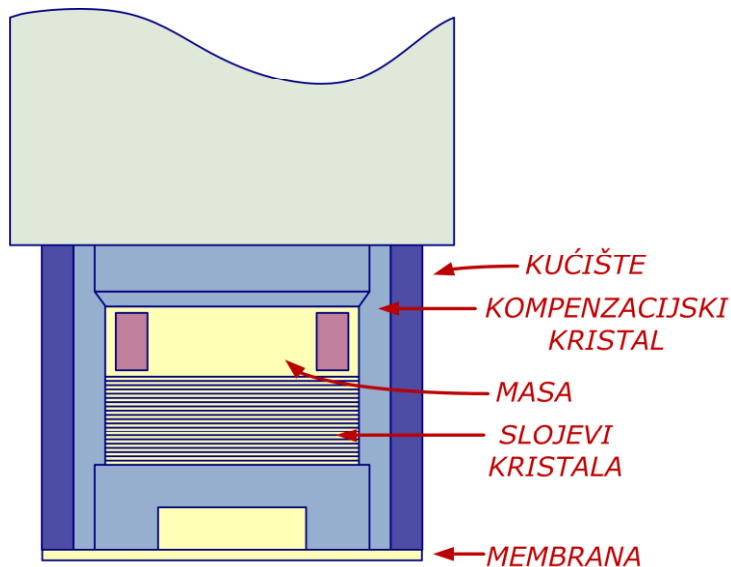
- Transverzalna sila
 - Osjetilo oblika diska
 - Količina naboja ne ovisi o geometriji
 - Povećanje osjetljivosti s više diskova

$$Q_x = 2,3\alpha F_x$$



Piezoelektrička osjetila - ugradnja

- Piezoelektrički materijal **se ugrađuje u kućišta**
- **Gubitak naboja** - koriste se za **kvazistatička i dinamička mjerenja** (donja granična frekvencija)
- **Struktura pretvornika ima svoju vlastitu rezonancijsku frekvenciju** (primjer: akcelerometar)
 - Sustav drugog reda
 - Određuje korisno frekvencijsko područje



Piezoelektrička osjetila - značajke

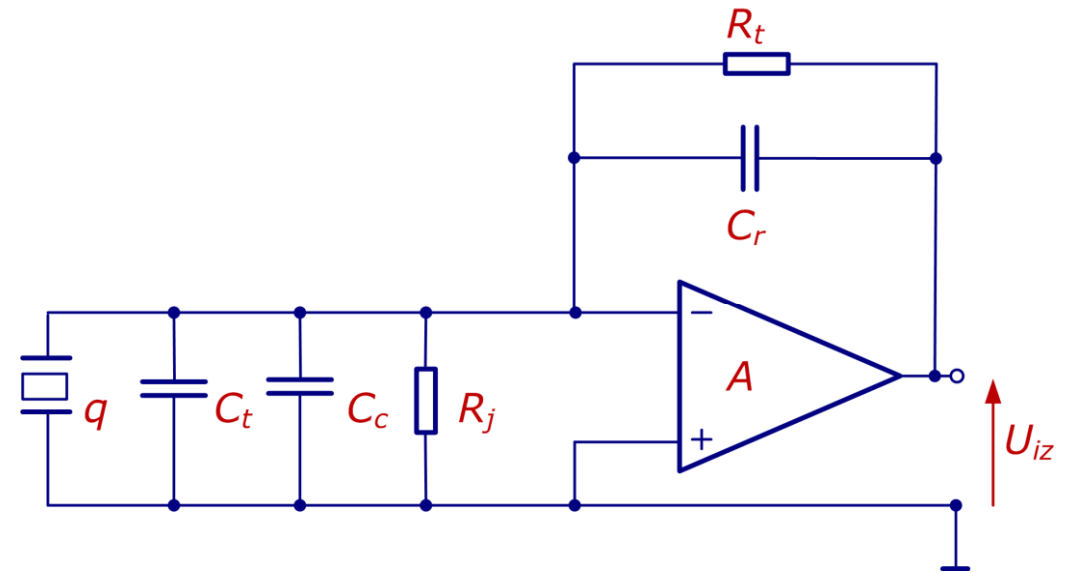
- Dugi životni vijek
 - Bez efekata starenja
- Visoka osjetljivost
- Mali mrtvi hod
- Široko mjerno područje
- Mjerenje bez pomaka
- Visoke vlastite frekvencije (oscilacije)
- Široko temperaturno područje rada

Piezoelektrička osjetila - spajanje

- Generirani **naboj pretvoriti u napon**
- Priključni kabel unosi kapacitet koji kvari mjerenje
- Primjenjuje se “nabojsko” pojačalo
 - promjene ulaznog naboja pretvara u izlazni napon
 - eliminira utjecaj kapaciteta osjetila i priključnog kabela

Nabojsko pojačalo

- Pojačalo visokog pojačanja otvorene petlje, s **vrlo visokom ulaznom impedancijom** (MOS/J FET, $10^{14}\Omega$)
- Spoj integratora s definiranom gornjom graničnom frekvencijom
- Klizanje (*drift*) izlaznog napona određuju struje curenja pojačala

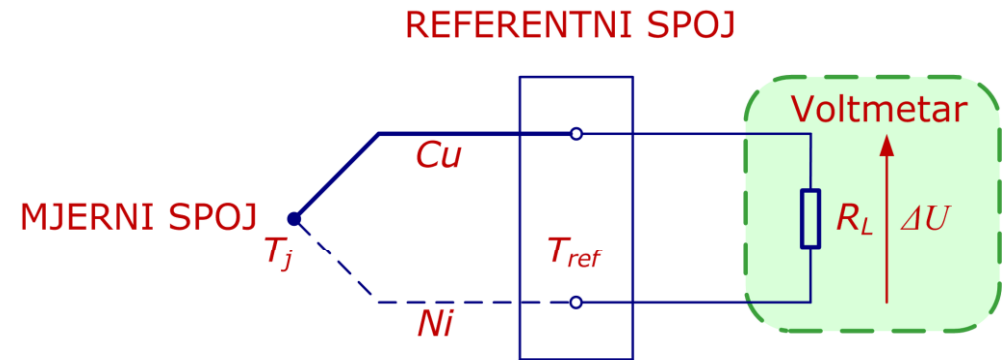


$$U_{iz} = \frac{-q}{C_r} \frac{1}{1 + \frac{1}{AC_r} (C_t + C_r + C_c)}$$

$$U_{iz} \approx \frac{-q}{C_r}$$

Termopar

- Krug od dva različita metala, sa spojevima na različitim temperaturama, javlja se elektromotorna sila
- Generirani napon ovisi o razlici temperatura, \propto Seebackov koeficijent



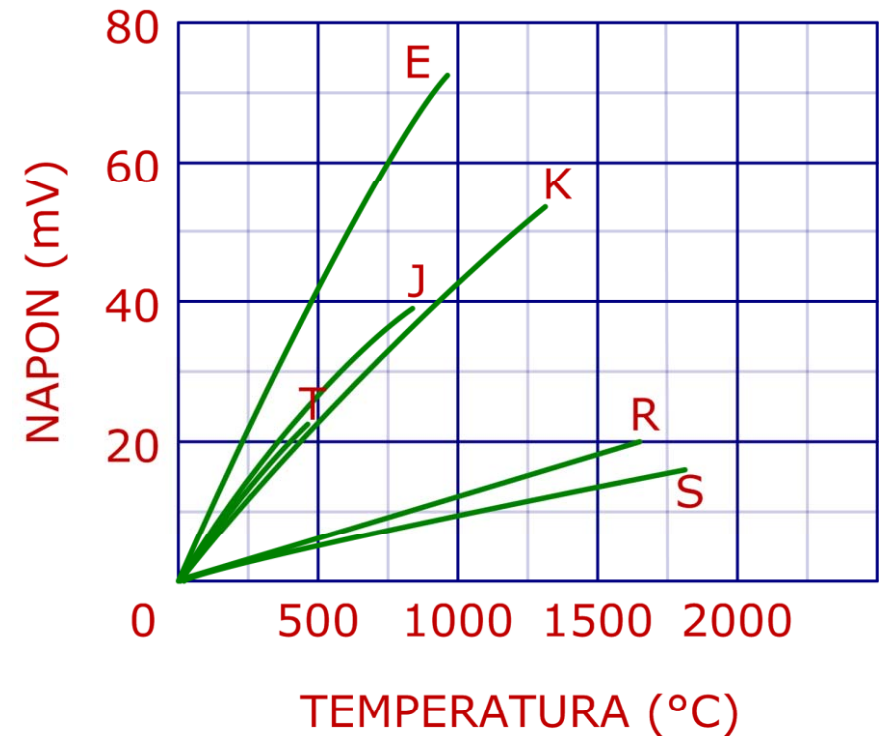
- Spoj dvaju metala - **termopar** (*thermocouple*)

$$U = \alpha (T_j - T_{ref})$$



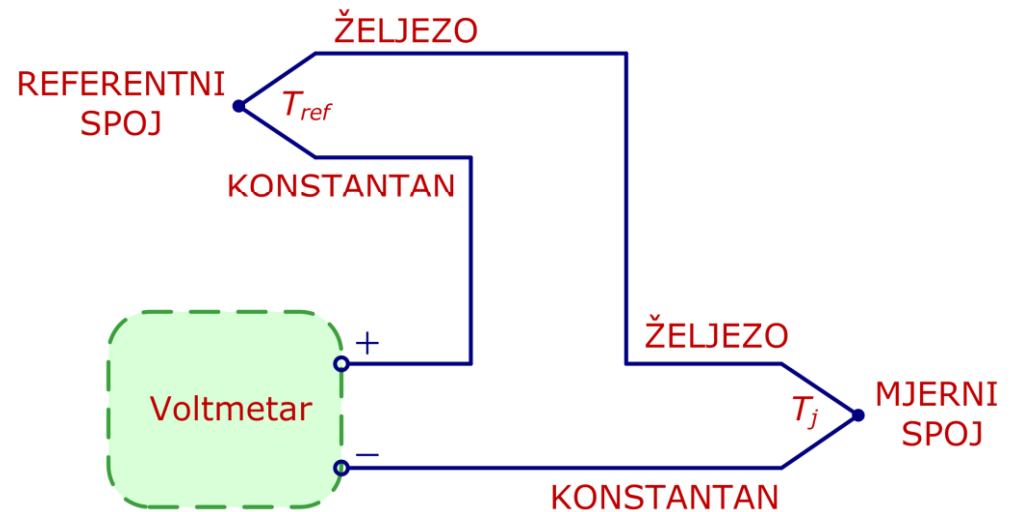
Termopar - značajke

- Radne temperature -270°C do 3500°C
- Osjetljivost $0,05\text{--}1\text{ mV/K}$
- Visoka linearnost
- Različiti tipovi (spojevi različitih metala: željezo, bakar, konstantan, krom, platina)
- Može se izvesti u poluvodičkoj tehnologiji



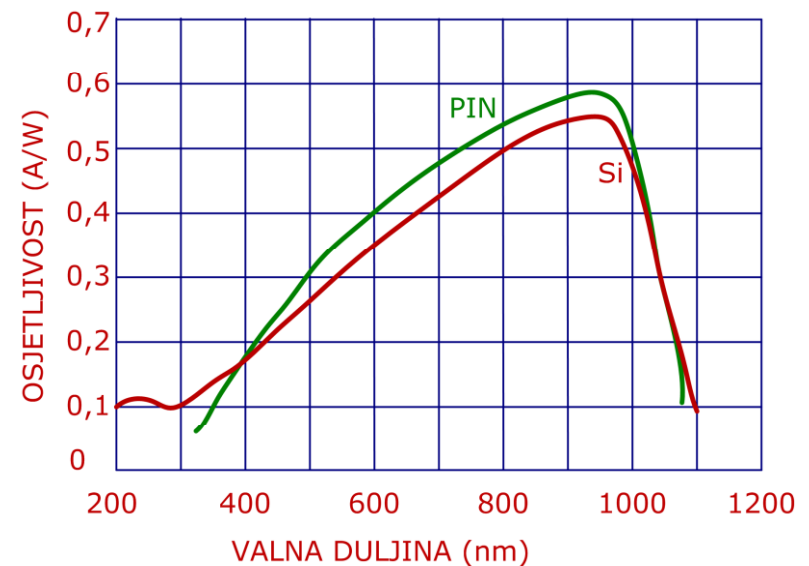
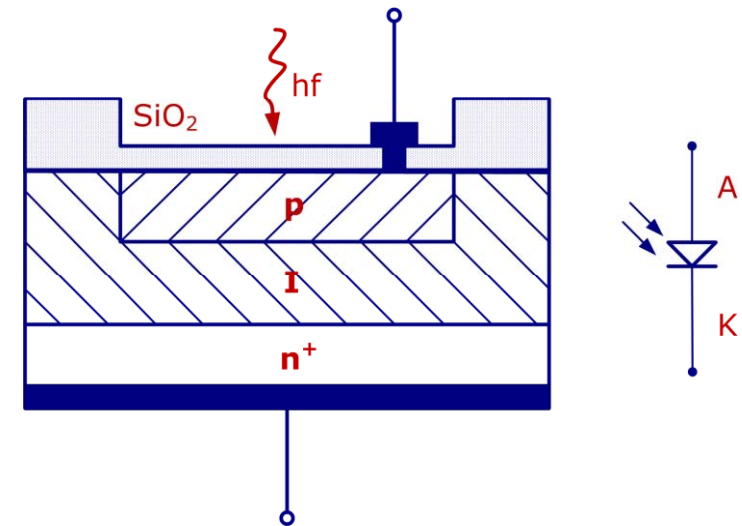
Termopar - spajanje u mjerni krug

- Kod mjerenja treba biti **definirana temperatura referentnog** (hladnog) **spoja** metala (*cold junction*)
- Problem promjene temperature hladnog kraja (*cold junction compensation*)
 - Održavati stalnu temperaturu
 - **Kompensacija promjene temperature elektronički**
 - mostom s NTC otpornikom
 - integriranom izvorom napona oduzimanjem napona razmjernog temperaturi okoline



Fotodioda

- Fotodioda, **optoelektronička komponenta**
 - pretvorba optičke energije u električnu (struju)
- Pretvorba upadnog zračenja ovisi o
 - spektralnoj karakteristici diode
 - upadnom kutu zračenja
- Primjena
 - mjerenje intenziteta zračenja u različitim dijelovima spektra
 - optičko odvajanje
 - komunikacijski sustavi

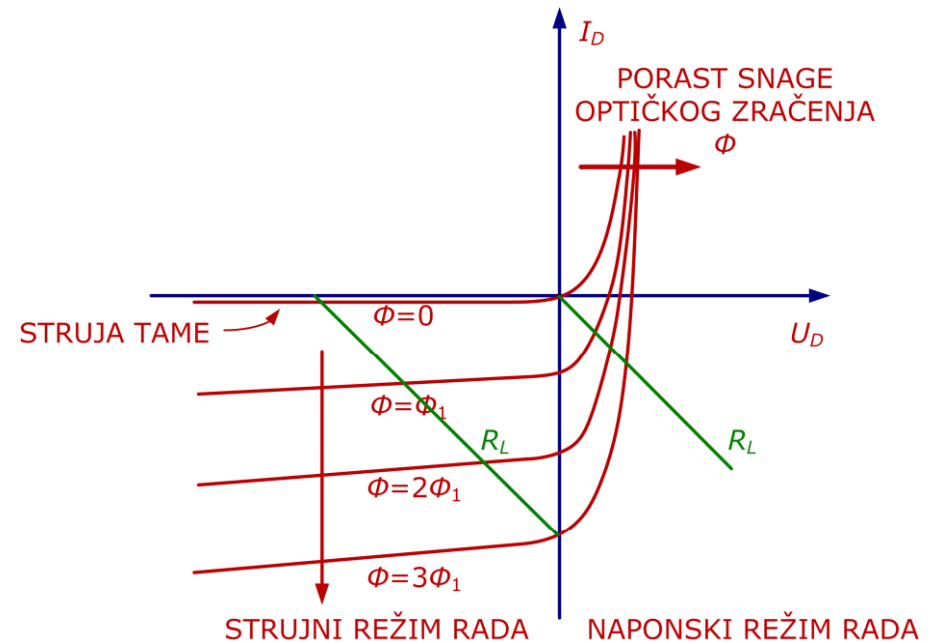
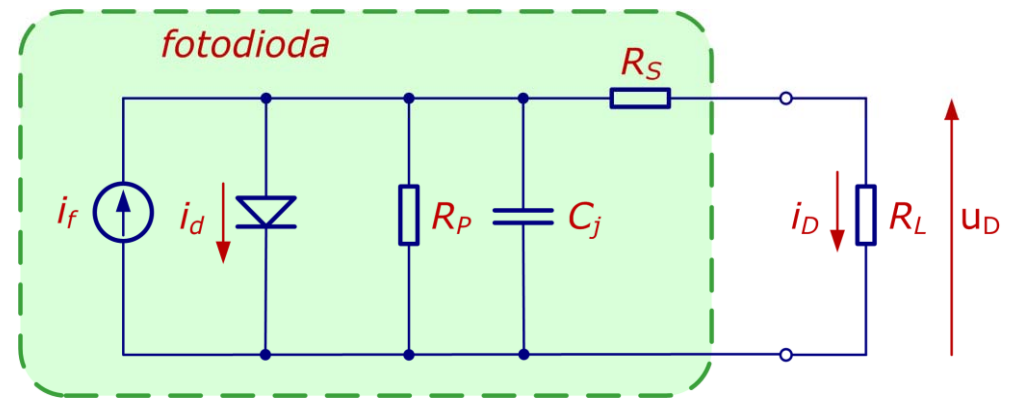


Fotodioda – nadomjesna shema

- i_f struja fotonosilaca, i_d difuzijska struja diode, R_p paralelni otpor pn spoja, C_j kapacitet, R_s serijski otpor diode, napon u_D na trošilu R_L stvara struja i_D

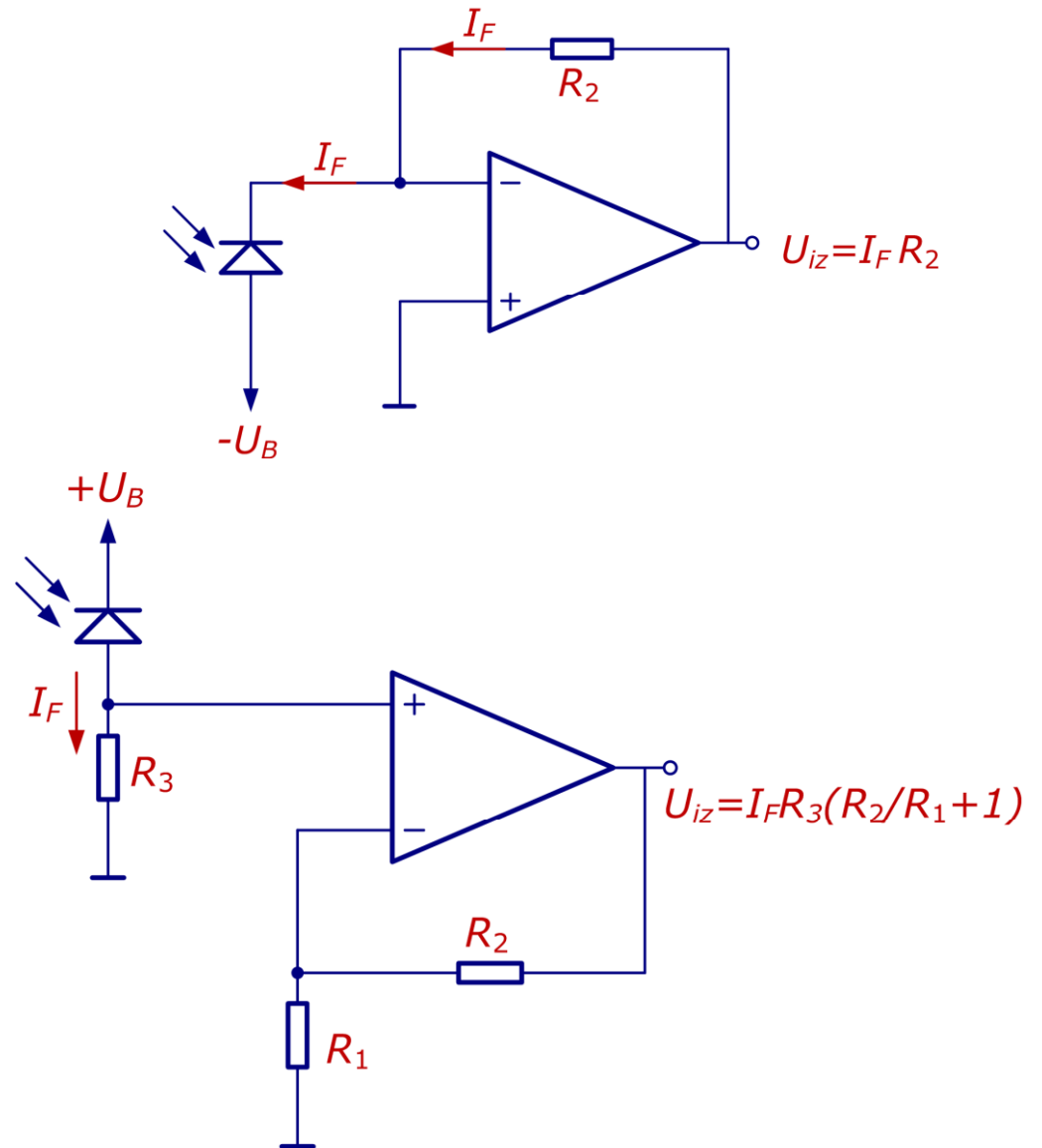
$$i_D(t) = i_f(\phi) - I_s \left(e^{\frac{u_D}{U_T}} - 1 \right)$$

- Dva načina rada fotodiode
- **naponski** (*photovoltaic*) bez zaporne polarizacije
 - **strujni** (*photocurrent*) zaporno polarizirana



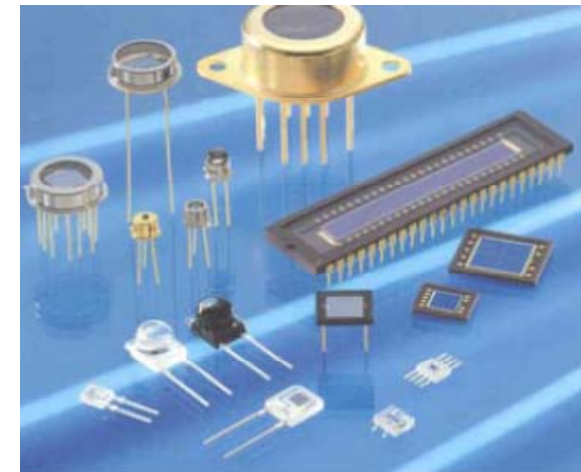
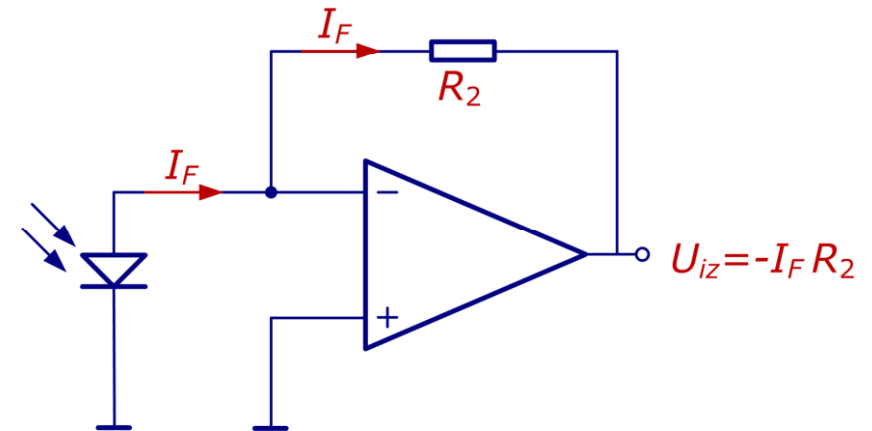
Fotodioda – strujni režim rada

- Zaporna polarizacija diode, mjeri se struja
- Linearna ovisnost struje o intenzitetu upadnog zračenja
- Brzi odziv (smanjen kapacitet)
- Široko dinamičko područje
- Razlučivost ograničena strujom tame (*dark current*) i šumom
- Primjena: mjerenje i komunikacijski sustavi



Fotodioda - naponski režim

- Dioda se može zaključiti različitim otporima
- R_L , 0, ∞ , optimalno
 - $R_L = 0$, mjeri se struja kratkog spoja, linearno, velika osjetljivost
 - $R_L = \infty$, mjeri se napon praznog hoda, nelinearno
 - $R_L = R_{opt}$, primjena kod fotoćelija

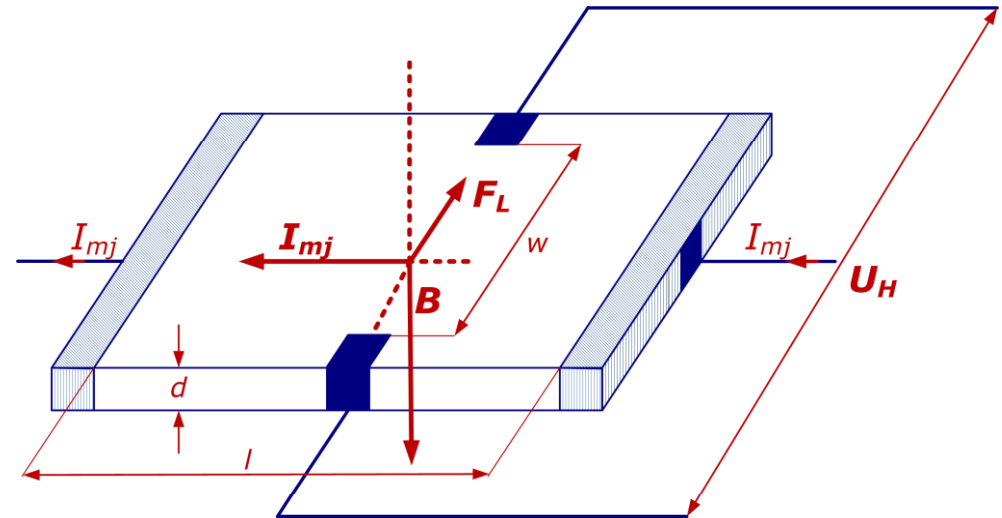


Hallovo osjetilo

- Na vodič kojim **teče struja I** djeluje **magnetsko polje B**
- Javlja se **elektromotorna sila U_H** okomita na smjer struje i magnetskog polja
- **Hallov napon** je razmjernan jakosti struje, indukciji, te obrnuto razmjernan debljini vodiča, R_H je Hallov koeficijent

$$U_H = R_H \frac{I_{mj} B}{d}$$

- **Osjetljivost** se izražava u V/T, tipično 100V/T
- Izrađuju se od vrlo tankih pločica poluvodiča niske vodljivosti (n tipa)



Halovo osjetilo - primjena

- **Frekvencijsko područje** od DC do 100kHz
- Primjenjuju se za mjerenje magnetskog polja, **mjerenje struje**, detekciju položaja, mjerenje broja okretaja
- **Robusni i jednostavni**
- Izvedeni kao integrirani krugovi s obradbom signala, analogni, digitalni, impulsni izlazi
- Mjerenje u 1, 2 ili 3 osi

