



Merni sistemi u računarstvu, <http://automatika.etf.bg.ac.rs/sr/13e053msr>

# Merenje električnih veličina II deo

Dr Nadica Miljković, vanredni profesor, kabinet 68, [nadica.miljkovic@etf.bg.ac.rs](mailto:nadica.miljkovic@etf.bg.ac.rs)

Prezentacija za ovo predavanje je skoro u potpunosti pokrivena MIEM udžbenikom

doc. Miljković: <https://zenodo.org/record/1335250#.W-IKBeloIU>. Takođe,

korišćene su i beleške za Merne mostove prof. Pejovića:

<http://tnt.etf.rs/~oe2em/mostovi.pdf>.

# Instrument sa pokretnim kalemom

$I$  - intenzitet struje kroz kalem  
 $N$  - broj navoja kalema tj. namotaja  
 $l$  - dužina kalema  
 $B$  - magnetska indukcija

⇓

formira se elektro-magnetska sila:

$$F = N I l B$$
$$M_1 = F l = N I l B l$$
$$M_2 = -K \alpha$$

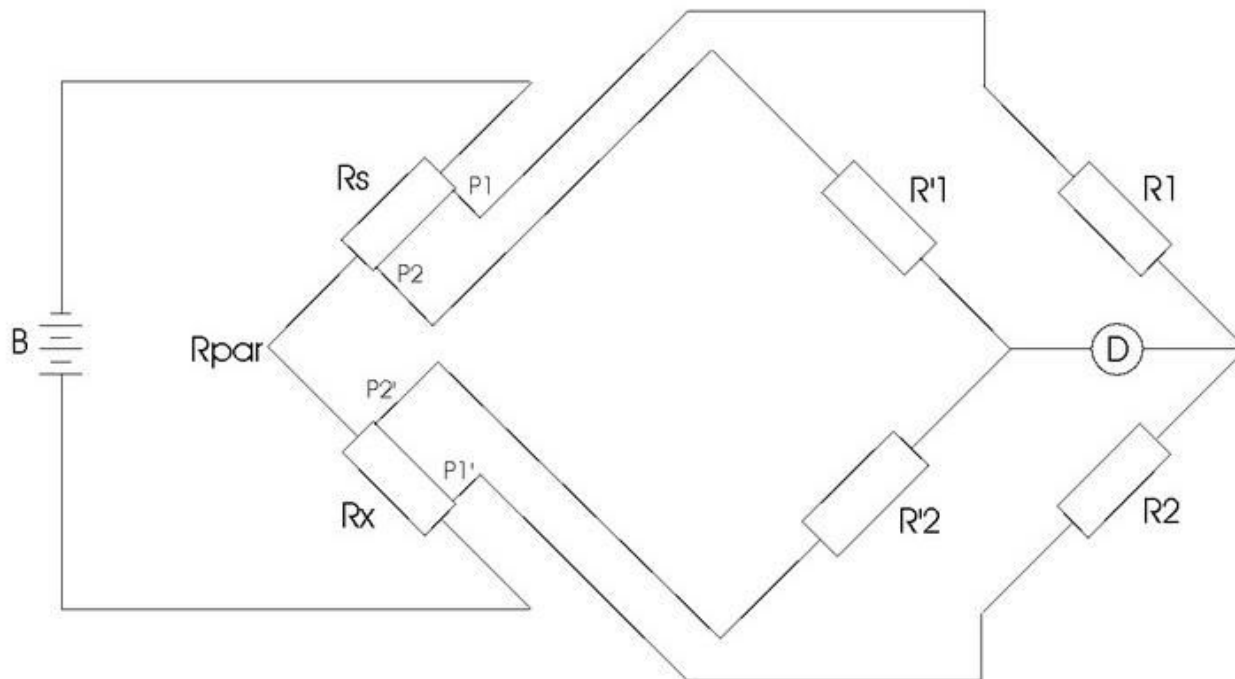
↓  
širina pravougaonog  
kalema

---

$$M_1 + M_2 = 0$$
$$N I l B l = K \alpha$$
$$\alpha = \frac{N l B l}{K} \cdot I \Rightarrow \alpha \text{ i } I \text{ su direktno proporcionalne}$$

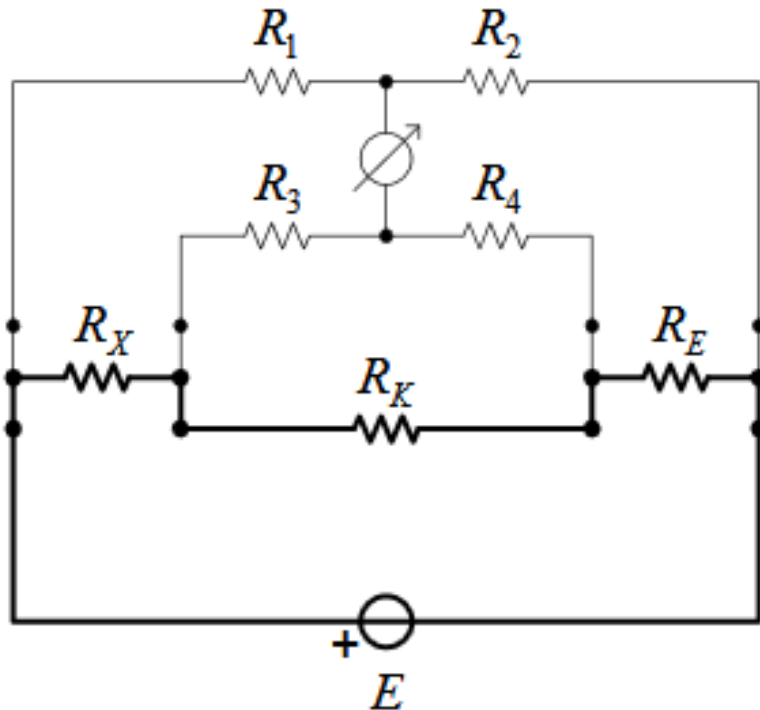
- Tražili su studenti 2018. godine:
  - Za skretanje kazaljke tj. računanje ugla  $\alpha$ , tačan proračun je prikazan na ovom slajdu.
  - Konačni izrazi su dati u [MIEM](#) knjizi.

# Precizni otpornici ( $< 1 \Omega$ )



- Za merenje malih otpornosti ( $< 1 \Omega$ ), koristi se Tomsonov/Kelvinov most ([https://en.wikipedia.org/wiki/Kelvin\\_bridge](https://en.wikipedia.org/wiki/Kelvin_bridge)).
- Otpornost pristupnih vodova (u laboratoriji su korišćeni do sada od oko  $0.2 \Omega$ ). Za merenje “malih” otpornosti, otpornost vodova koja se inače smatra zanemarivom, postaje značajna.
- Da bi se eliminisao uticaj pristupnih vodova, prave se otpornici sa 4 izvoda (2 strujna i 2 naponska) po ugledu na Kelvinove kontakte.
- Slika, By DieSwartzPunkt at English Wikipedia, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=38909138>

# Tomsonov (Kelvinov) most



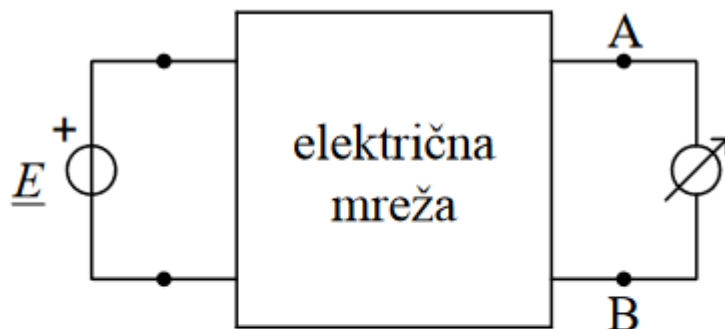
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

$$R_X = R_E \frac{R_1}{R_2}$$

- Tomsonov (Kelvinov) most se koristi za merenje “malih” otpornosti.
- Otpornost kablova  $R_K$  ne utiče na ravnotežu ovog mosta.



# Mostovi za naizmeničnu struju

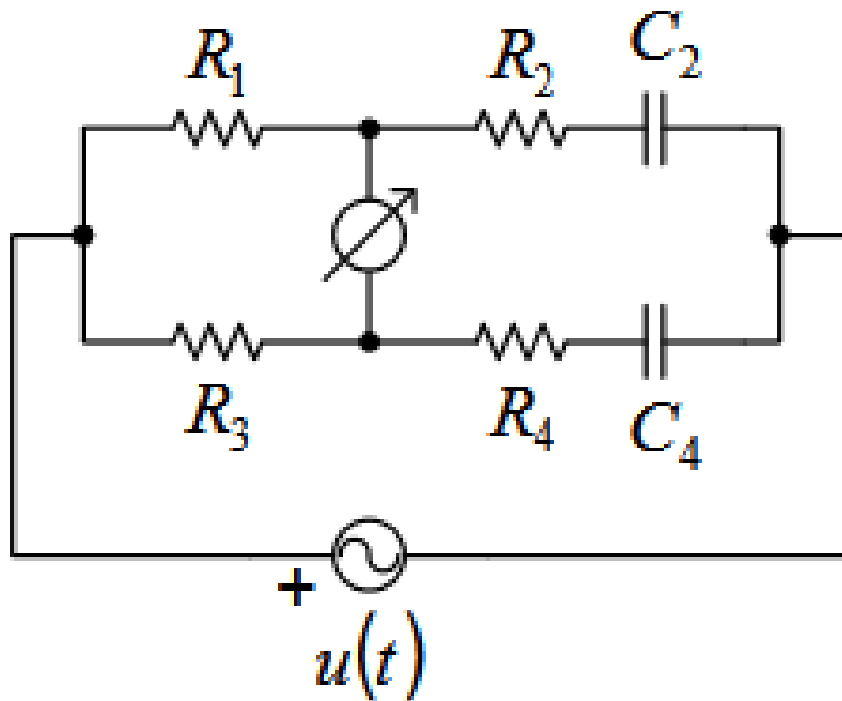


$$\underline{U}_{AB} = f(\underline{E}, \underline{Z}_1, \dots, \underline{Z}_n)$$

$$\underline{Z}_i = g(L, C, M, R, f)$$

- Uslov ravnoteže se definiše kompleksnom jednačinom.
- Ako se impedansa izrazi preko otpornosti i reaktanse onda se uslov ravnoteže svodi na dve realne jednačine.
- U opštem slučaju, za uravnoteženje mosta za naizmeničnu struju potrebna su dva promenljiva parametra.
- Koliko promenljivih parametara je potrebno za uravnoteženje Vitstonovog mosta?
- Na slici, opšta šema iz <http://tnt.etf.bg.ac.rs/~oe2em/mostovi.pdf>
- $M$  ispod slike predstavlja međusobnu induktivnost kod spregnutih kalemova.

# Most za poređenje redne C

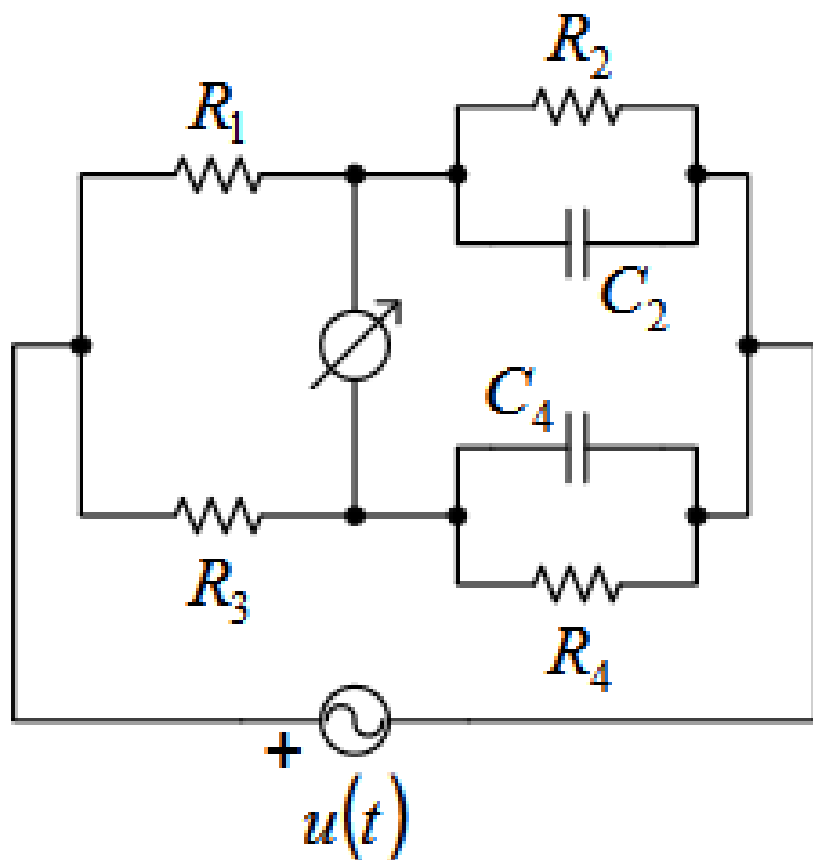


$$C_X = C_4 = C_2 \frac{R_1}{R_3}$$

$$R_X = R_4 = R_2 \frac{R_3}{R_1}$$

- Prikazan je uslov ravnoteže za most na slici.
- Ravnoteža mosta NE zavisi od frekvencije!

# Most za poređenje paralelne C



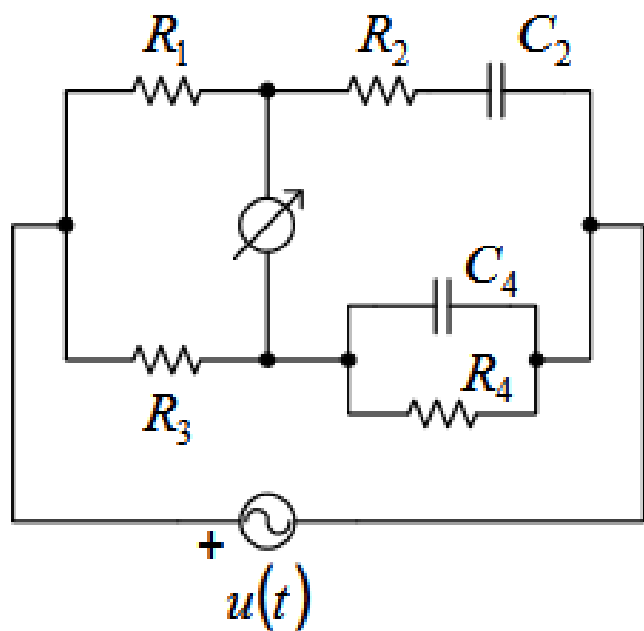
$$C_X = C_4 = C_2 \frac{R_1}{R_3}$$

$$R_X = R_4 = R_2 \frac{R_3}{R_1}$$

- Prikazan je uslov ravnoteže za most na slici.
- Ravnoteža mosta NE zavisi od frekvencije!



# Vinov most



merenje paralelne kapacitivnosti:

$$C_X = C_4 = \frac{R_1}{R_3} \frac{C_2}{1 + (\omega R_2 C_2)^2}$$

$$R_X = R_4 = \frac{R_3}{R_1} \left( 1 + \frac{1}{(\omega R_2 C_2)^2} \right) R_2$$

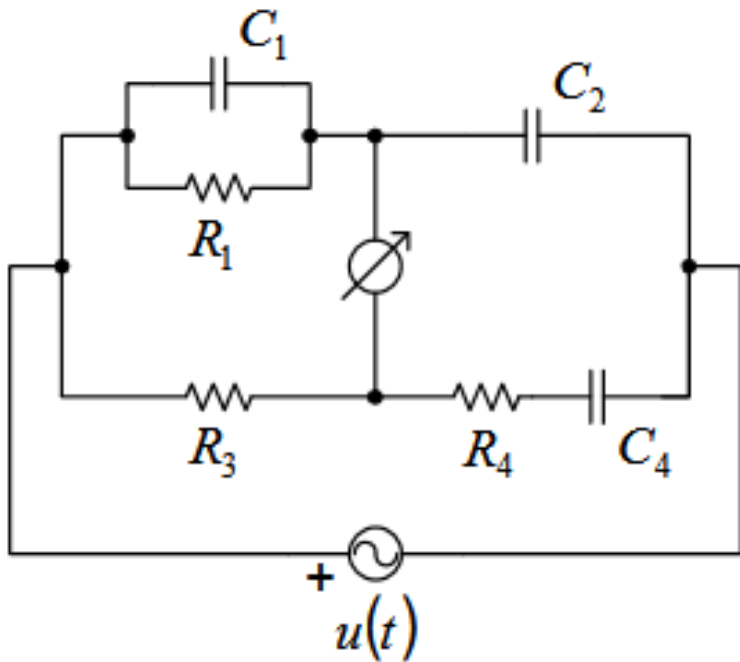
merenje redne kapacitivnosti:

$$C_X = C_2 = \frac{R_3}{R_1} \left( 1 + \frac{1}{(\omega R_4 C_4)^2} \right) C_4$$

$$R_X = R_2 = \frac{R_1}{R_3} \frac{R_4}{1 + (\omega R_4 C_4)^2}$$

- Moguće ga je koristiti za merenje redne ili paralelne C ([https://en.wikipedia.org/wiki/Wien\\_bridge](https://en.wikipedia.org/wiki/Wien_bridge)).
- Ravnoteža mosta zavisi od frekvencije! Moguće je i meriti frekvenciju.

# Šeringov most

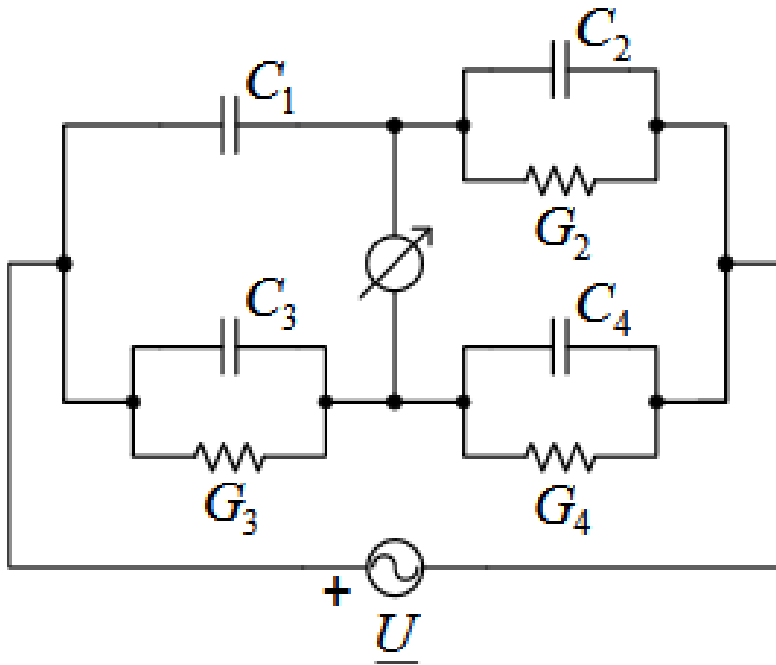


$$C_4 = \frac{R_1}{R_3} C_2$$

$$R_4 = \frac{C_1}{C_2} R_3$$

- Koristi se za merenje nepoznate  $C$ .
- Ravnoteža mosta NE zavisi od frekvencije!
- Najčešće se koristi za merenje izolacionih svojstava električnih kablova i opreme, [https://en.wikipedia.org/wiki/Schering\\_Bridge](https://en.wikipedia.org/wiki/Schering_Bridge).

# Ogavinov most



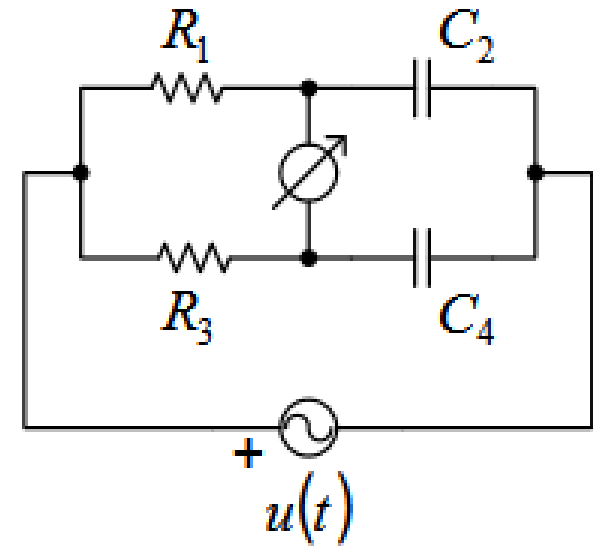
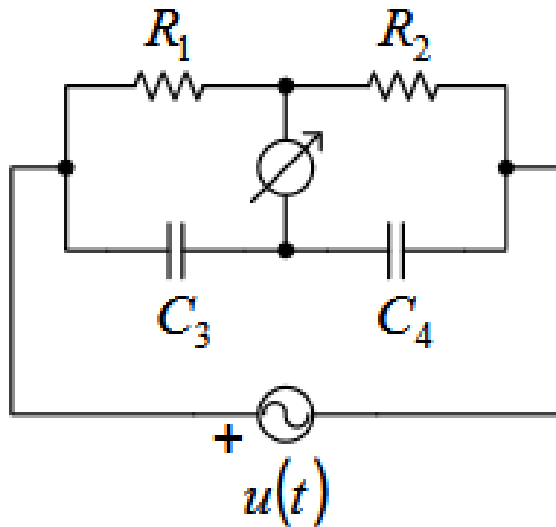
$$G_2 G_3 = \omega^2 (C_2 C_3 - C_1 C_4)$$

$$C_2 G_3 = C_1 G_4 - C_3 G_2$$

$$G_k = 1/R_k$$

- Prikazan je uslov ravnoteže za most na slici.
- Ravnoteža mosta zavisi od frekvencije!

# Sotijev most

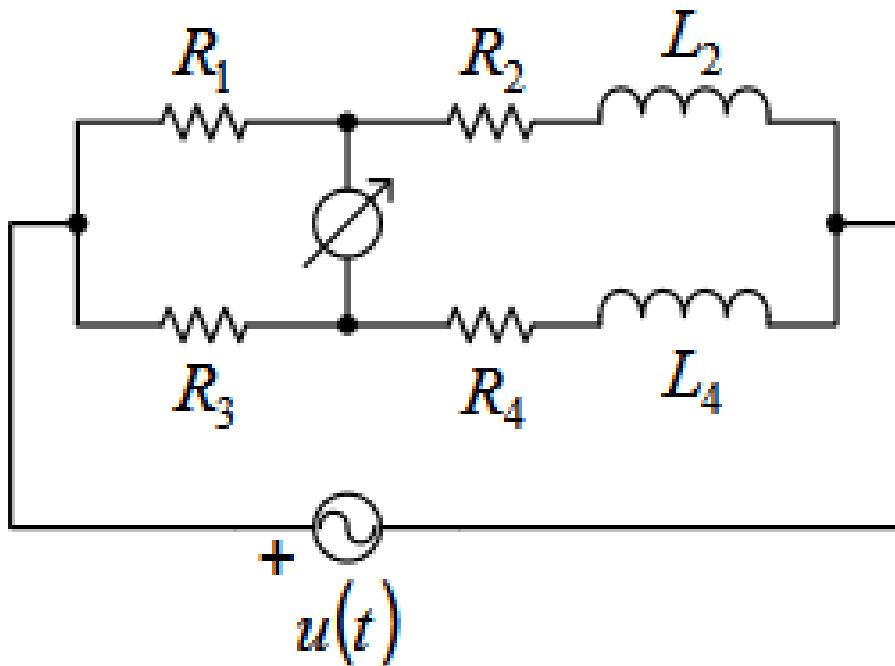


$$C_X = C_4 = C_3 \frac{R_1}{R_2}$$

$$C_X = C_4 = C_2 \frac{R_1}{R_3}$$

- Postoje dve verzije Sotijevog mosta.
- Primenom teoreme po kojoj se sulovi ravnoteže mosta ne menjaju, ako indikator i generator zamene mesta može se izvesti druga verzija Sotijevog mosta.
- Pretpostavka je da su kondenzatori bez gubitaka.

# Most za poređenje redne $L$

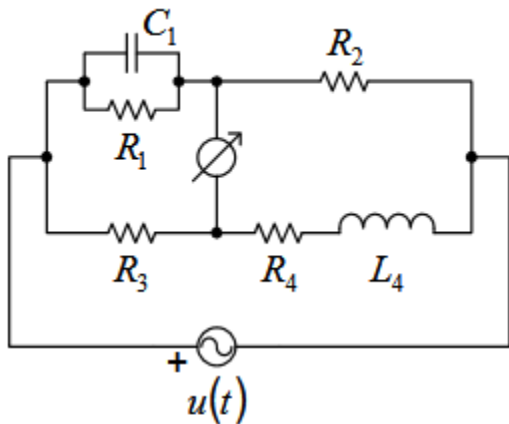


$$L_X = L_4 = L_2 \frac{R_3}{R_1}$$

$$R_X = R_4 = R_2 \frac{R_3}{R_1}$$

- Problem kod ovog mosta je međusobno sprežanje kalemova.
- Analogno, važi i za paralelnu induktivnost.

# Maksvelov most

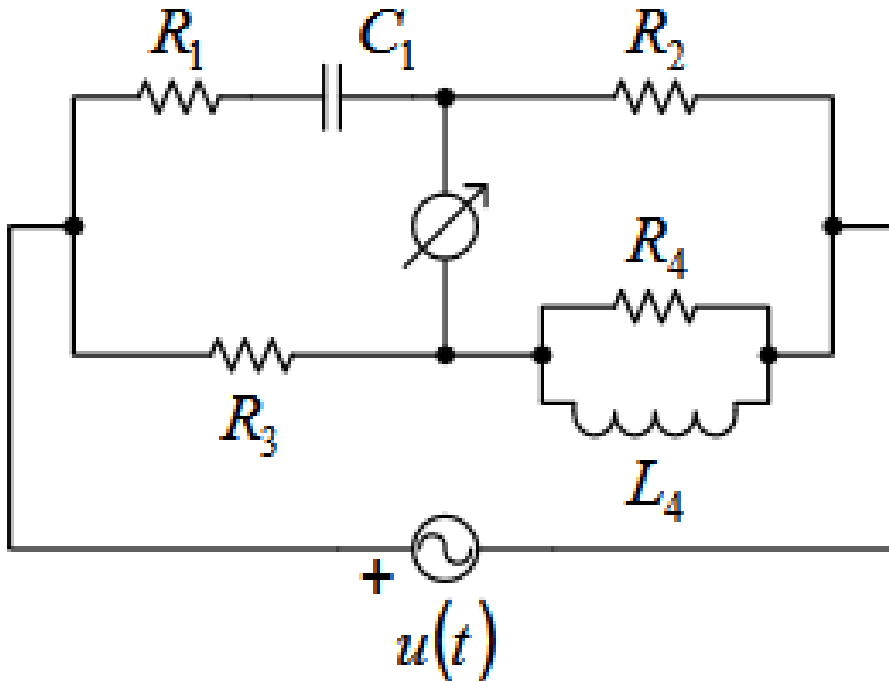


$$L_X = L_4 = R_2 R_3 C_1$$

$$R_X = R_4 = \frac{R_2 R_3}{R_1}$$

- To je most koji se koristi za merenje nepoznate induktivnosti (najčešće sa malom  $Q$  vrednošću), [https://en.wikipedia.org/wiki/Maxwell\\_bridge](https://en.wikipedia.org/wiki/Maxwell_bridge).
- Sličan je Vinovom mostu za merenje nepoznate kapacitivnosti.
- Da li ravnoteža ovog mosta zavisi od frekvencije napajanja  $u(t)$ ?

# Hejov most

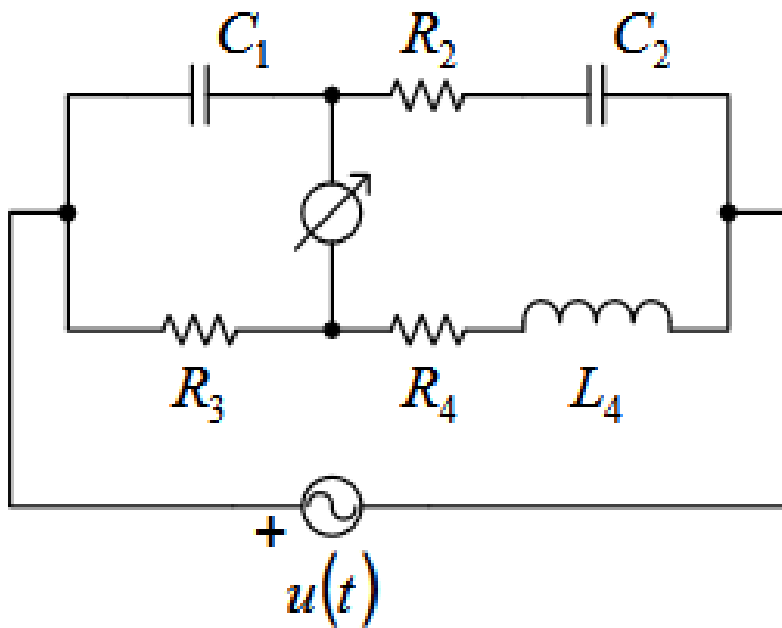


$$L_X = L_4 = R_2 R_3 C_1$$

$$R_X = R_4 = \frac{R_2 R_3}{R_1}$$

- Koristi se za merenje nepoznate induktivnosti.
- Frekvencijski je nezavistan.

# Ovenov most



$$L_X = L_4 = R_2 R_3 C_1$$

$$R_X = R_3 \frac{C_1}{C_2}$$

- Koristi se za merenje nepoznate induktivnosti.
- Frekvencijski je nezavistan.





# LCR metar



HP 4263B LCR metar u laboratoriji 69 na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu.

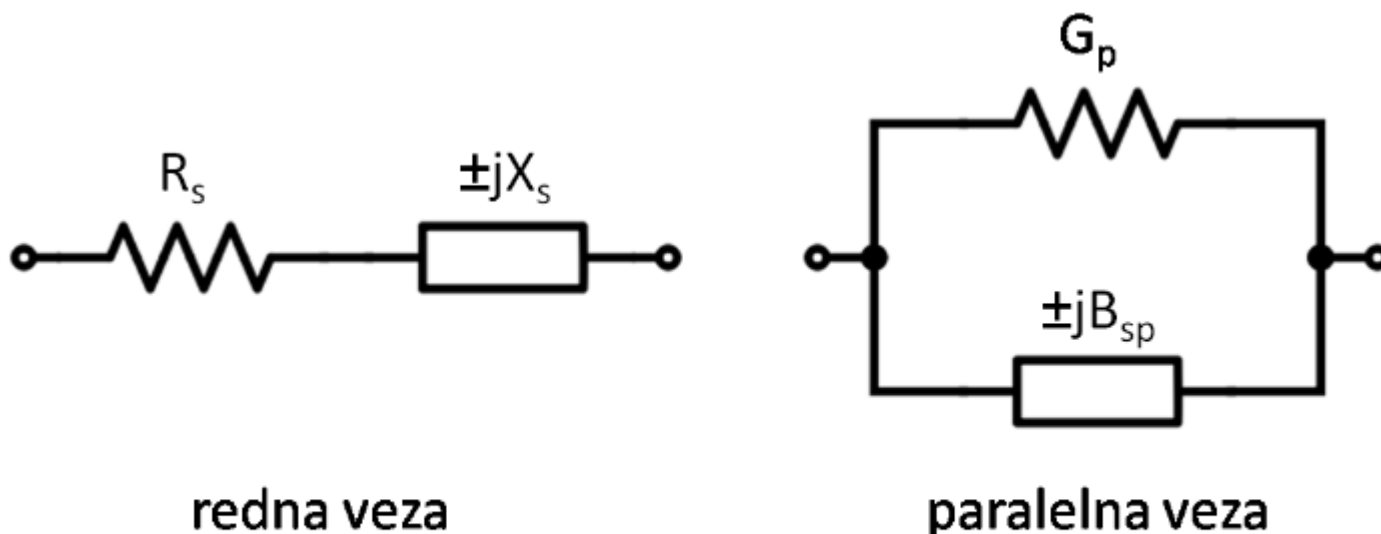
LCR metar ([https://en.wikipedia.org/wiki/LCR\\_meter](https://en.wikipedia.org/wiki/LCR_meter)) je instrument koji se koristi za merenje impedanse.

Impedansa je važan parametar u svim električnim kolima i može se definisati kao ukupan otpor propagaciji AC (eng. *alternating current*) za datu frekvenciju kroz električno kolo.

Impedansa je svojstvo električnih kola, ali i komponenti i materijala.

U ovoj prezentaciji korišćen je materijal iz Agilent Impedance Measurement Handbook (dostupan 2015. godine na <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5950-3000.pdf>).

# Serijsko i paralelno ekvivalentno kolo



Sl. 70, Redna i paralelna veza sa označenim realnim i imaginarnim elementima.

U svakom LCR metru postoje dva režima rada (eng. *mode*): serijski i paralelni. Pre svakog merenja, od značaja je (za tačnost merenja) odabir odgovarajućeg režima rada.

Sa  $X$  je predstavljen imaginarni redni deo REAKTANSA, a sa  $B$  je označen imaginarni paralelni deo SUSCEPTANSA.

# Serijsko i paralelno ekvivalentno kolo

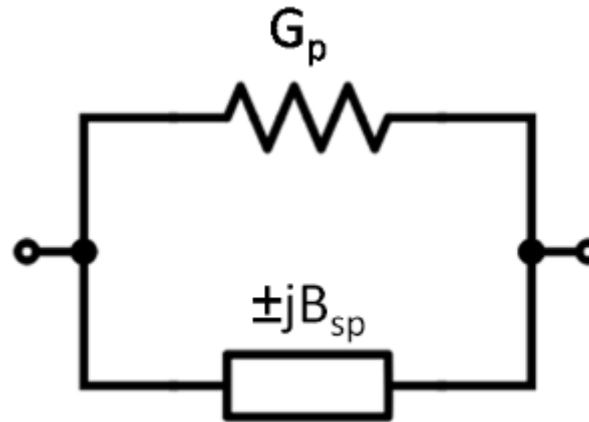
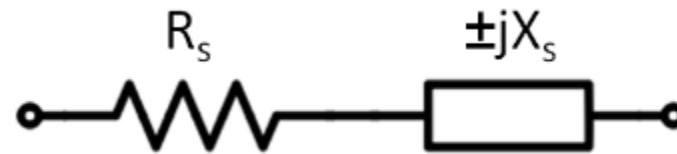
$$Z = R_s + jX_s$$

$$R_s = R_p \frac{D^2}{1 + D^2}$$

$$R_p = R_s \left(1 + \frac{1}{D^2}\right)$$

$$X_s = \frac{X_p}{1 + D^2}$$

$$X_p = \frac{X_s}{1 + D^2}$$



Moguće je izraziti realne i imaginarne delove impedanse i za paralelno i za redno kolo preko faktora gubitaka  $D$ .

Moguće je definisati i vezu između elemenata paralelnog i rednog kola.

# Serijsko i paralelno ekvivalentno kolo

Za veliki faktor gubitaka  $D$  (mali faktor dobrote  $Q$  – dominantan realni deo impedanse) važan je izbor ekvivalentnog kola.

Za mali faktor gubitaka  $D$  (veliki faktor dobrote  $Q$  – dominantan imaginarni deo impedanse), ne postoji velika razlika za merenje  $C$  i  $L$  u zavisnosti od odabira veze (serijska ili paralelna veza).

Kako je veza između serijskih i paralelnih elemenata u funkciji od  $D^2$ , kada je  $D$  manje od 0.03, onda je razlika između  $C_p$  i  $C_s$  ( $L_p$  i  $L_s$ ) manja od 0.1%.  $D$  i  $Q$  ne zavise od odabranog kola.



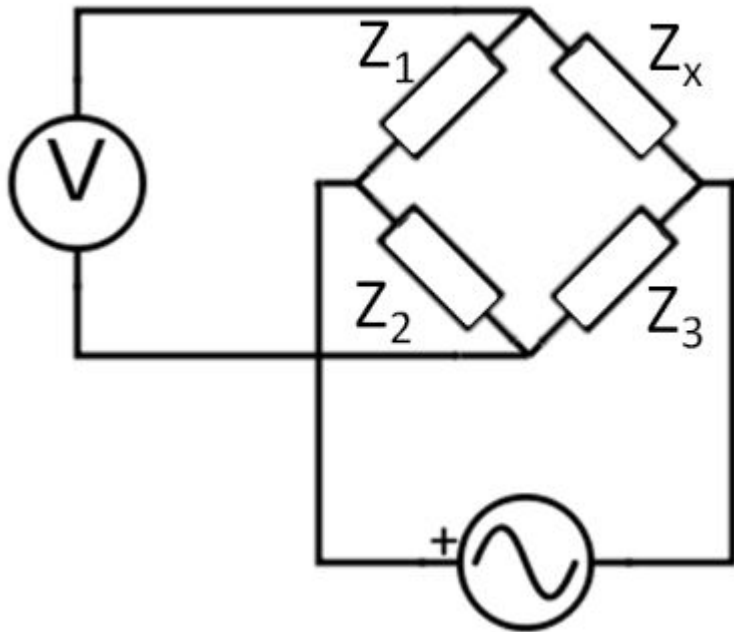
Koliko je  $C_s$ ?

HP 4263B LCR meter

# Princip rada LCR metra

- Merni most
- Rezonantna metoda
- Merenje struje i napona ( $I / U$  metoda)
- Automatizovani most (eng. *autobalancing bridge*)

# Princip rada LCR metra – merni most

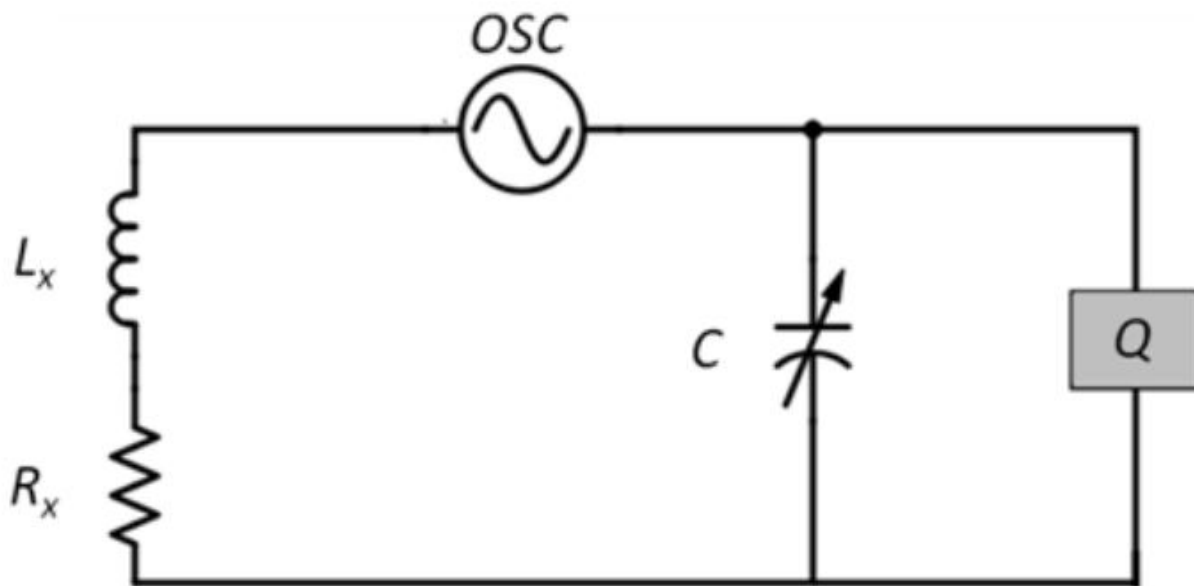


merni most za naizmeničnu struju

Kada ne postoji protok struje kroz detektor  $D$  sa slike, onda se može odrediti vrednost nepoznate impedanse  $Z_x$  preko poznatih vrednosti ostalih impedansi u kolu.

Postoji veliki broj mostova koji koriste različite kombinacije elemenata električnih kola ( $R$ ,  $C$  i  $L$ ) i koji imaju razne praktične namene.

# Princip rada LCR metra – rezonatna metoda



rezonatna metoda

Kada se kolo sa slike dovede u rezonanciju podešavanjem promenljivog kondenzatora  $C$ , moguće je izmeriti nepoznatu induktivnost  $L_x$  i otpornost  $R_x$ , ako su poznati rezonatna frekvencija, kapacitivnost  $C$  i merena veličina  $Q$ .

Veličina  $Q$  se meri direktno pomoću voltmetra koji je povezan paralelno sa kondenzatorom  $C$ .



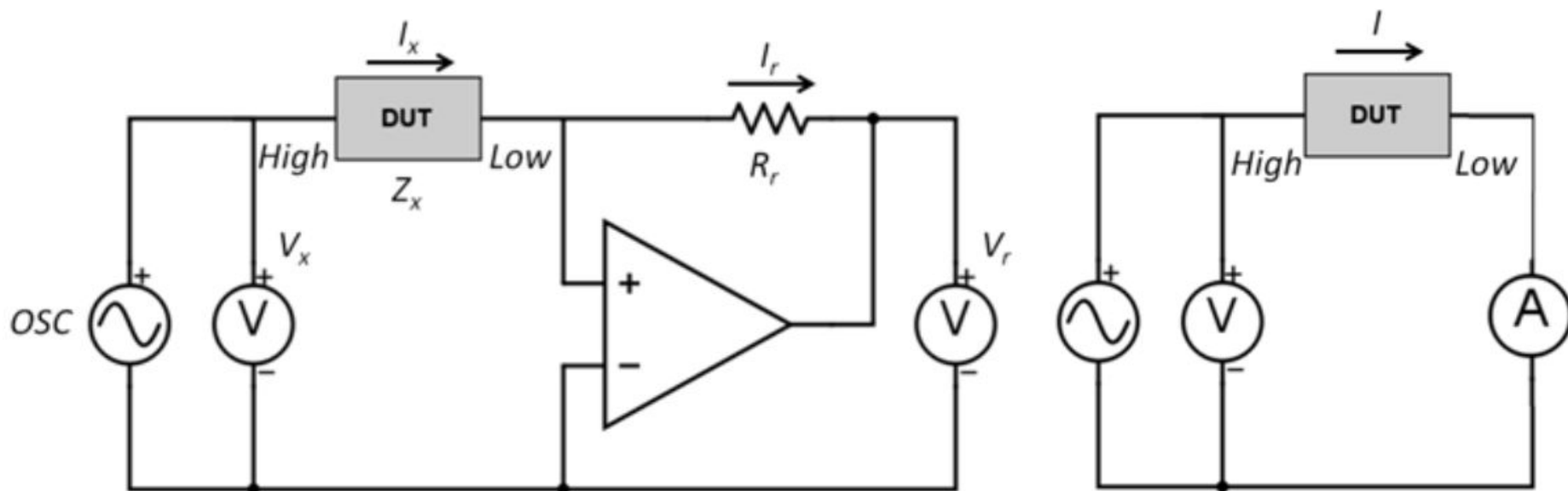
# Princip rada LCR metra – merenje struje i napona

Nepoznatu impedansu  $Z_x$  je moguće odrediti merenjem napona  $V_1$  i  $V_2$ . Vrednost struje  $I$  se određuje pomoću izmerene vrednosti  $V_2$  i otpornika poznate otpornosti  $R$ .

Postoje i druge metode koje se zasnivaju na merenju struje i napona i koje se koriste za merenje velikih i malih vrednosti nepoznate impedanse  $Z_x$ .

Neke smo radili!

# Princip rada LCR metra – automatizovani most

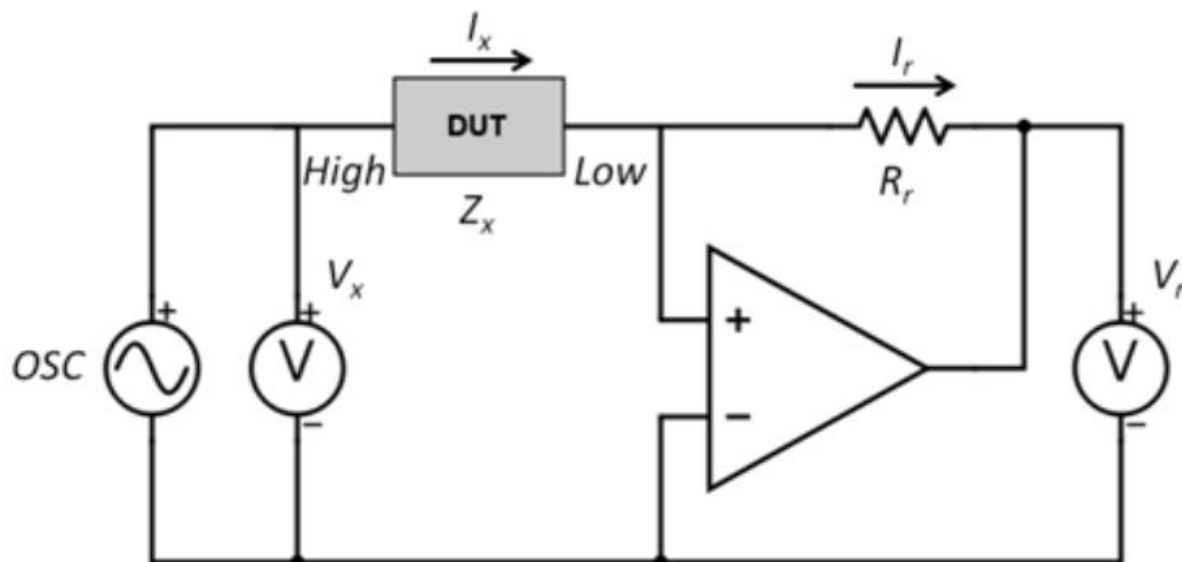


Automatizovani most na levom panelu i najjednostavniji model automatizovanog mosta na desnom panelu  
DUT – eng. *device under test*

Kako bi se izmerila impedansa, neophodno je meriti napon koji je doveden na krajeve elementa čija se impedansa meri (DUT) i struju koja kroz njega protiče.

Šema uključuje voltmetar i ampermetar.

# Princip rada LCR metra – automatizovani most

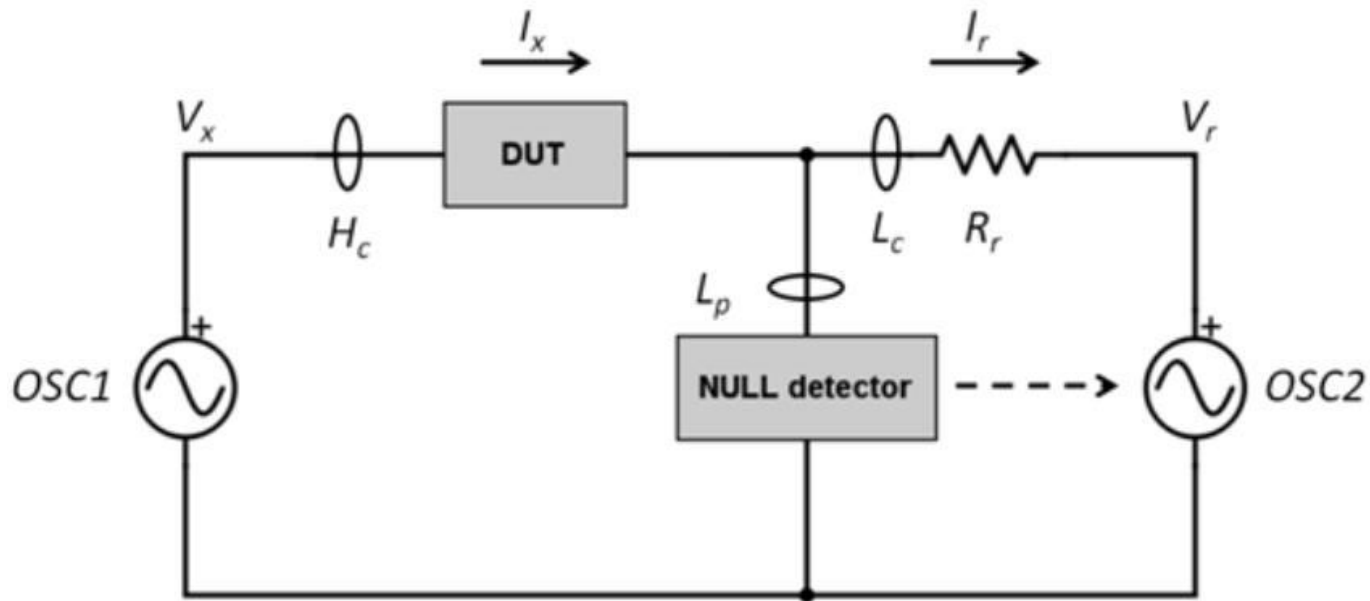


Za LCR metar u niskom frekvencijskom opsegu merenja (tipično ispod 100 kHz) koristi se operacioni pojačavač ([https://en.wikipedia.org/wiki/Operational\\_amplifier](https://en.wikipedia.org/wiki/Operational_amplifier)) kao  $I / V$  konvertor. Strujom  $I_x$  se podešava struja  $I_r$  koja prolazi kroz otpornik  $R_r$  (eng. *range resistor*), preko  $I / V$  konvertora.

Potencijal tačke “Low” se održava na 0 V (zato se često naziva i virtuelna masa).

Impedansa DUT-a se meri pomoću napona na “High” terminalu ( $V_x$ ) i napona na otporniku  $R_r$  ( $V_r$ ).

# Automatizovani most



Za merenje na većim frekvencijama ( $> 1$  MHz), kao  $I / V$  konvertori se koriste detektori nule (eng. *null detector*), fazni detektori, integratori i modulatori vektora kako bi se obezbedila odgovarajuća tačnost merenja.

Najčešće ovakvi instrumenti mogu da mere do maksimalno 110 MHz.



# Senzor



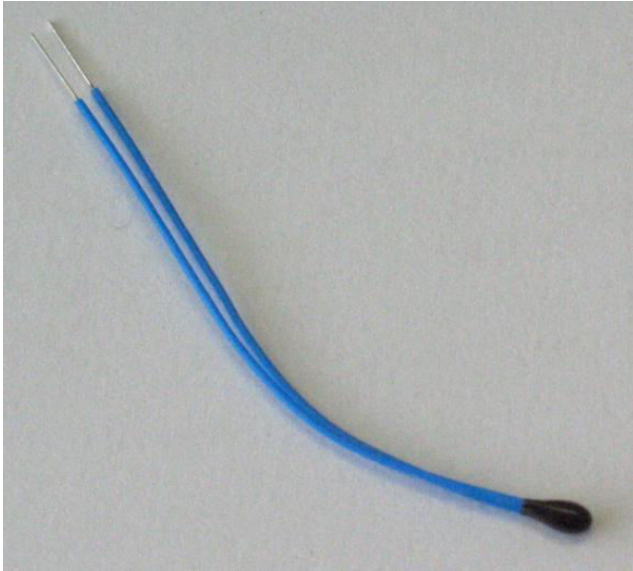
Primer primene senzora rastojanja u automobilima (izvor: Volkswagen, <http://www.volkswagen.co.uk/technology/proximity-sensing>). With thanks to Volkswagen.

Pretvarač (<https://en.wikipedia.org/wiki/Transducer>) je uređaj koji omogućava konverziju jedne u drugu fizičku veličinu.

Senzor (<https://en.wikipedia.org/wiki/Sensor>) je pretvarač koji omogućava pretvaranje neke fizičke veličine u električnu. Da bi se izmerila fizička veličina, neophodno je primeniti metode merenja električnih veličina i odgovarajuće transformacije koje su rezultat odabira senzora.

Postoji **relativno veliki broj senzora** koji se koriste u različitim primenama i koji se zasnivaju na različitim principima detekcije.

# Senzor



Autor: Ansgar Hellwig - photo taken with Canon PowerShot G3, CC BY-SA 2.0 de, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=242719>

Ako za funkcionisanje senzora (pretvaranje neke fizičke veličine u električnu) nije potrebno dodatno ulaganje energije, tada se takav senzor naziva pasivni senzor. Ako je potrebno dodatno ulaganje energije (izvor napajanja), onda je senzor aktivan.

Pasivni senzori mogu biti i neki od osnovnih pasivnih elemenata električnih kola (na primer: otpornik).

# Karakteristike senzora

Neke osnovne statičke karakteristike senzora su:

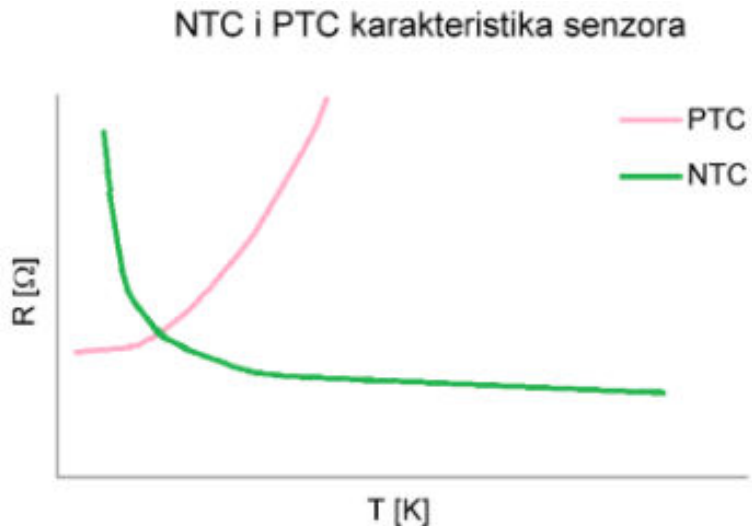
1. Radni opseg (minimalna i maksimalna vrednost koju senzor može da meri)
2. Stabilnost
3. Tačnost i preciznost
4. Histerezis
5. Rezolucija (najmanja promena veličine koju je moguće detektovati)\*
6. Ponovljivost
7. Linearnost (izlazni signal je linearna funkcija ulaznog sistema)

\* Za digitalne senzore je određena rezolucijom A / D konverzije. Ako je rezolucija 12 bit-a, a naponski opseg merenog signala 0-5 V, tada je rezolucija merenja tim senzorom  $5/2^{12} = 0.0012$  V.



SENZORI ZASNOVANI NA PROMENI OTPORNOSTI

# Termistor



Zavisnost otpornosti NTC i PTC termistora od temperature.

Termistor (eng. *thermally sensitive resistor*, <https://en.wikipedia.org/wiki/Thermistor>) je otpornik čija se otpornost menja u zavisnosti od temperature. Koristi se za merenje temperature, ali i za temperaturnu kompenzaciju u električnim kolima.

Postoje NTC i PTC termistori. NTC termistor (eng. *negative temperature coefficient*) je otpornik kod koga se otpornost smanjuje sa povećanjem temperature. PTC termistor (eng. *positive temperature coefficient*) je otpornik kod koga se otpornost povećava sa povećanjem temperature. Češće je u upotrebi NTC termistor.

# Termistor – SH model

Osnovna prednost termistora u odnosu na druge senzore temperature je relativno visoka osetljivost i relativno niska cena.

Na primer, osetljivost može biti i do  $200 \Omega / ^\circ\text{C}$ .

Otpornost termistora je nelinearna funkcija temperature. Najčešće se zavisnost otpornosti od temperature modelira sa Steinhart-Hart jednačinom ([https://en.wikipedia.org/wiki/Steinhart%E2%80%93Hart equation](https://en.wikipedia.org/wiki/Steinhart%E2%80%93Hart_equation)):

$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R_t) + C(\ln(R_t))^3$$

gde je  $R_t$  otpornost (u  $\Omega$ ) termistora na temperaturi  $T$  (u K), a  $A$ ,  $B$  i  $C$  su konstante termistora i važi  $A > B > C$ . Uobičajeno, uputstvo proizvođača sadrži vrednosti za  $A$ ,  $B$  i  $C$ .

Moguće je i eksperimentalno odrediti ove parametre.

# NTC termistor – primer

## Zadatak:

Izračunati konstante NTC termistora  $A$ ,  $B$  i  $C$  i odrediti nelinearnu zavisnost otpornosti termistora od temperature u formi Steinhart-Hart (SH) jednačine.

NTC termistor je postavljen na temperaturu od  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , na sobnu temperaturu ( $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) u kipuću vodu ( $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Za sve tri vrednosti temperature, izmerena je otpornost ommetrom (sa Kelvinovim kontaktima) od  $25\text{ k}\Omega$ ,  $10\text{ k}\Omega$  i  $1\text{ k}\Omega$ .

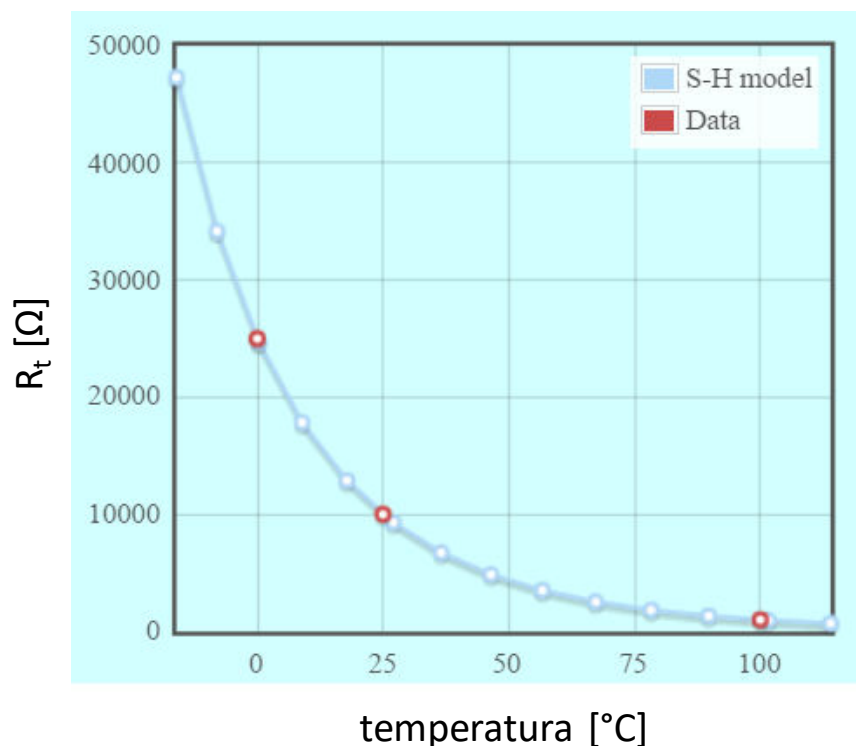
SH jednačina je oblika:

$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R_t) + C(\ln(R_t))^3$$

Za izvršena tri merenja, jednačina se može zapisati u matričnoj formi:

$$\begin{bmatrix} 1 & \ln(25000) & (\ln(25000))^3 \\ 1 & \ln(10000) & (\ln(10000))^3 \\ 1 & \ln(1000) & (\ln(1000))^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{0 + 273.15} \\ \frac{1}{25 + 273.15} \\ \frac{1}{100 + 273.15} \end{bmatrix}$$

# NTC termistor – rešenje



Na grafiku su naznačene merne tačke u eksperimentu (eng. *Data*). Korišćen je Thermistor Calculator, Stafford Research Systems Inc.,

<http://www.thinksrs.com/downloads/programs/Therm%20Calc/NTCCalibrator/NTCcalculator.htm>.

Rešavanje prethodne matrične jednačine (odnosno sistema od tri jednačine sa tri nepoznate), dobija se da su:  $A = 1.17 \times 10^{-3}$ ,  $B = 1.95 \times 10^{-4}$  i  $C = 5.00 \times 10^{-7}$ .

Na osnovu, ovako određenog modela, moguće je proceniti nelinearnu zavisnost otpornosti  $R_t$  od temperature  $T$ .

# NTC termistor – $\beta$ model

Moguće je predstaviti zavisnost otpornosti od temperature i preko  $\beta$  (ili B) modela:

$$\ln R_t = A + \frac{\beta}{T}$$

gde je  $R_t$  otpornost termistora ( $\Omega$ ),  $T$  temperatura (K),  $\beta$  (K) i  $A$  su konstante termistora. Za referentnu temperaturu  $T_0$ , važi da je:

$$\ln R_{t_0} = A + \frac{\beta}{T_0}$$

Oduzimanjem ova dva izraza dobija se:

$$\ln R_t - \ln R_{t_0} = \ln \frac{R_t}{R_{t_0}}$$

$$\ln \frac{R_t}{R_{t_0}} = \beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

Na osnovu prethodnog izrada, moguće je, napisati izraze za  $R_t$  i za  $T$ :

$$R_t = R_{t_0} e^{\beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{\beta} \ln \left( \frac{R_t}{R_{t_0}} \right) + \frac{1}{T_0}$$

Prednost ovog modela u odnosu na prethodni je što su potrebna dva umesto tri merenja temperature kako bi se odredila zavisnost otpornosti od temperature.

Mana je što ovaj odnos važi za uži opseg temperatura u odnosu na SH model.

# PTC termistor – primer (Vitstonov most)

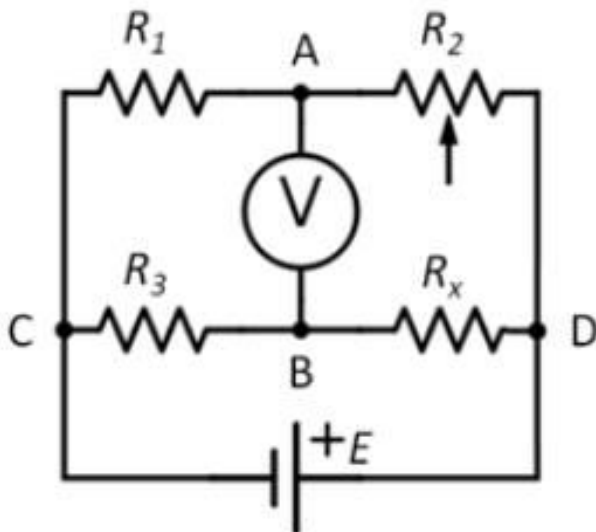
## Zadatak

Na slici je dat neuravnotežen Vitstonov most koji se koristi za merenje nepoznate temperature  $T$ .  $R_x$  je temperaturno osetljivi (PTC) otpornik čija se promena otpornosti ispituje  $R_x = R + \Delta R$ , a je potenciometar koji služi za uravnoteženje mosta.

Ako su:

$R_1 = R_3 = R = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $E = 5 \text{ V}$  i  $R_{2max} = 30 \text{ k}\Omega$ :

1. Nacrtati zavisnost napona  $U_{AB}$  u funkciji od  $\Delta R$ , ako je  $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$ .
2. Ako je temperaturna zavisnost PTC otpornika data, i ako su  $R_0 = 2 \text{ k}\Omega$  i  $T_0 = 300 \text{ K}$  izračunati maksimalnu promenu temperature koju je moguće izmeriti ovom metodom.

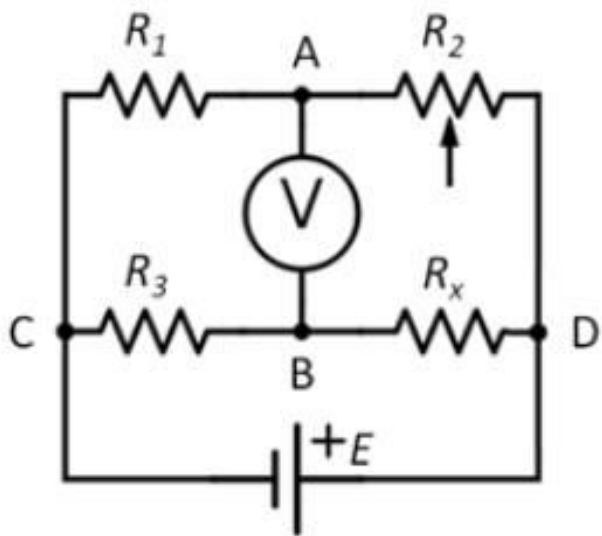


Temperaturna zavisnost PTC otpornika:

$$\Delta R = R_0 e^{\frac{\Delta T}{T_0}}$$

# PTC termistor – rešenje

Nacrtati zavisnost napona  $U_{AB}$  u funkciji od  $\Delta R$ , ako je  $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$ , ako su  $R_x = R + \Delta R$ , a  $R_1 = R_3 = R = 10 \text{ k}\Omega$  i  $E = 5 \text{ V}$ .



Sa  $I_x$  je obeležena struja kroz granu CBD i sa  $I_2$  struja kroz granu CAD.

$$U_{AB} = U_{AD} + U_{DB}$$

$$U_{AB} = U_{AD} - U_{BD}$$

$$U_{AB} = I_2 R_2 - I_x R_x$$

$$I_x = \frac{E}{R_x + R_3}$$

$$I_2 = \frac{E}{R_1 + R_2}$$

$$U_{AB} = E \frac{R_x}{R_x + R_3} - E \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_{AB} = E \left( \frac{R + \Delta R}{2R + \Delta R} - \frac{2}{3} \right)$$

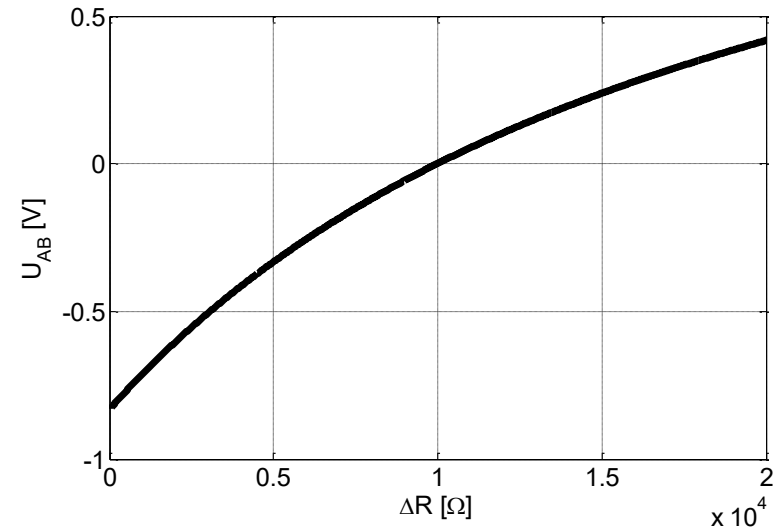
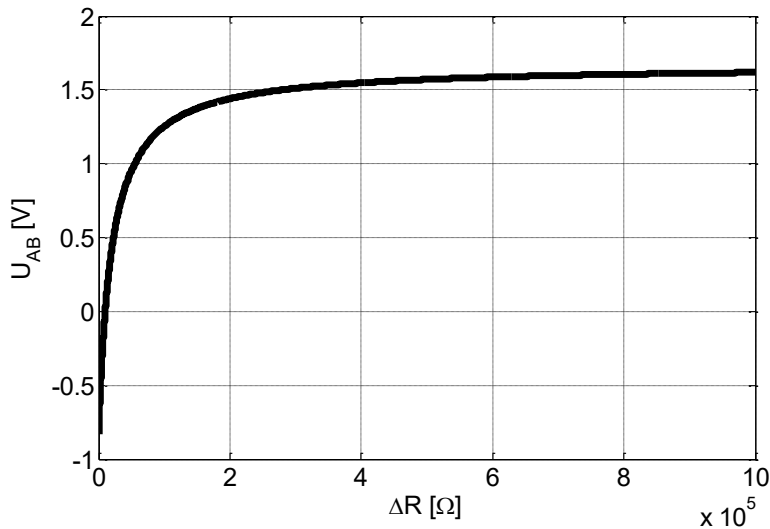


# PTC termistor – rešenje

Nacrtati zavisnost napona  $U_{AB}$  u funkciji od  $\Delta R$ , ako je  $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$ , ako su  $R_x = R + \Delta R$ , a  $R_1 = R_3 = R = 10 \text{ k}\Omega$  i  $E = 5 \text{ V}$ .

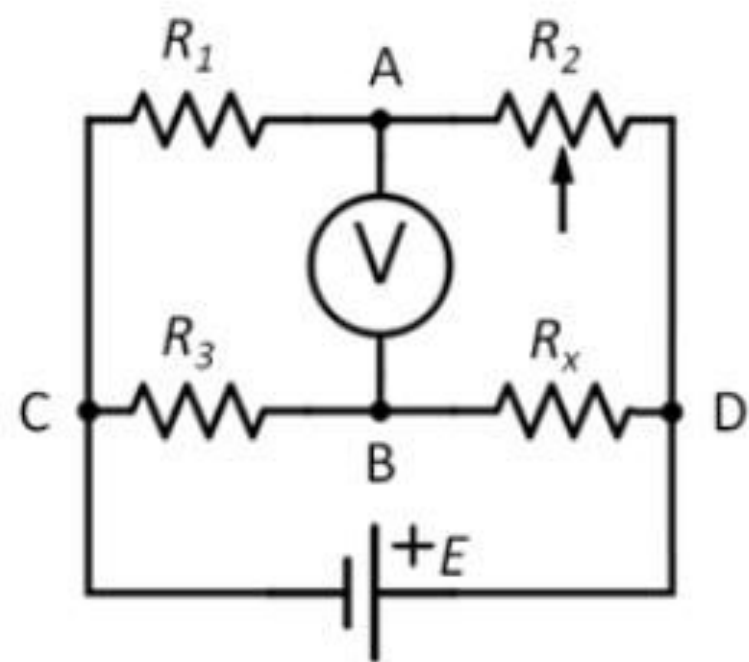
$$U_{AB}(\Delta R) = E \left( \frac{R + \Delta R}{2R + \Delta R} - \frac{2}{3} \right)$$

$$U_{AB}(\Delta R) = 5 \left( \frac{10 + \Delta R}{20 + \Delta R} - \frac{2}{3} \right)$$



# PTC termistor – rešenje

Ako je temperaturna zavisnost PTC otpornika data, i ako su  $R_0 = 2 \text{ k}\Omega$  i  $T_0 = 300 \text{ K}$  izračunati maksimalnu promenu temperature koju je moguće izmeriti ovom metodom.  $R_x = R + \Delta R$ , a  $R_1 = R_3 = R = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $E = 5 \text{ V}$  i  $R_{2max} = 30 \text{ k}\Omega$ .



$$\Delta R = R_0 e^{\frac{\Delta T}{T_0}}$$

Za most u ravnoteži važi:

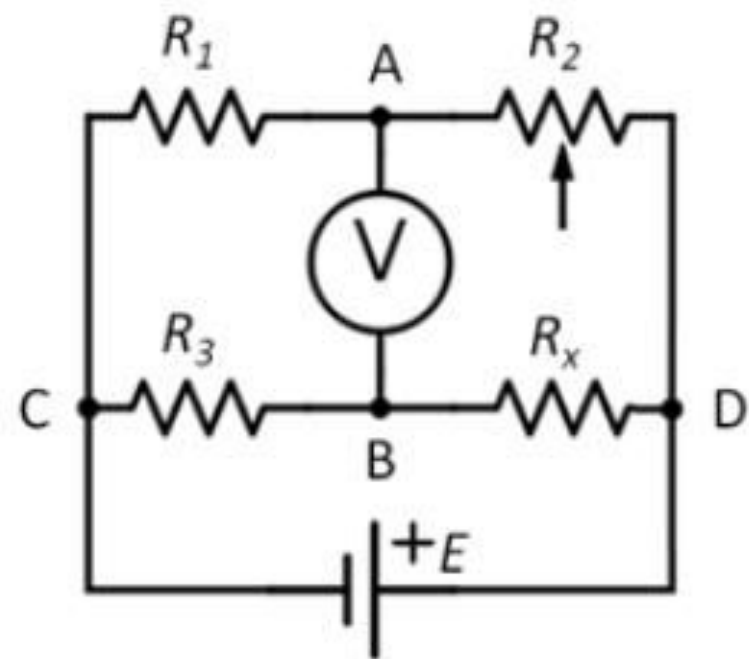
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_x}$$

$$\frac{R_1}{R_{2max}} = \frac{R_3}{R + \Delta R_{max}}$$

Iz prethodnog izraza, može se izračunati da je  $\Delta R_{max} = 20 \text{ k}\Omega$ .

# PTC termistor – rešenje

Ako je temperaturna zavisnost PTC otpornika data, i ako su  $R_0 = 2 \text{ k}\Omega$  i  $T_0 = 300 \text{ K}$  izračunati maksimalnu promenu temperature koju je moguće izmeriti ovom metodom.  $R_x = R + \Delta R$ , a  $R_1 = R_3 = R = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $E = 5 \text{ V}$  i  $R_{2max} = 30 \text{ k}\Omega$ .



$$\Delta R = R_0 e^{\frac{\Delta T}{T_0}}$$

Iz prethodnog izraza, moguće je izračunati promenu temperature  $\Delta T$ :

$$\Delta T = T_0 \ln \frac{\Delta R}{R_0}$$

$$\Delta T_{\max} = T_0 \ln \frac{\Delta R_{\max}}{R_0} = 690.78 \text{ K}$$

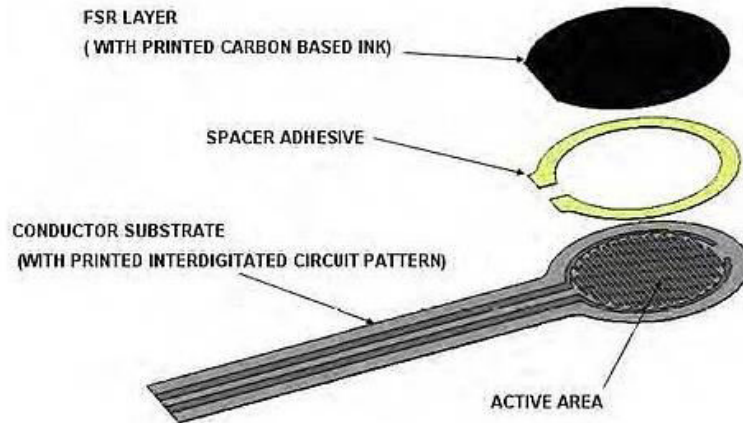
# Rezistivni senzor sile



By oomlout - Force Sensing Resistor Interlink 402 - FSRE-01, CC BY-SA 2.0,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=20629529>

Rezistivni senzor sile (eng. *force sensing resistor*, [https://en.wikipedia.org/wiki/Force-sensing\\_resistor](https://en.wikipedia.org/wiki/Force-sensing_resistor)) je otpornik čija se otpornost menja u zavisnosti od sile ili pritiska. Prednost ovih senzora je što su relativno malih dimenzija (debljina  $\approx 0.5$  mm), relativno niske cene i imaju relativno veliku otpornost na mehaničke deformacije. Međutim mana im je mala preciznost (rezultati dva ponovljena merenja mogu da se razlikuju do 10%).

# Rezistivni senzor sile



$$p = \frac{F}{S}$$

FSR (eng. *Force Sensing Resistor*) senzor ima osobinu da može da menja otpornost u zavisnosti od promenjene sile. Promenu otpornosti je moguće meriti na terminalima senzora i ona nastaje kada usled pritiska sa slojem ugljeničnog mastila dođe do kratkog spoja na provodnim štampanim provodnim kontaktima (slika).

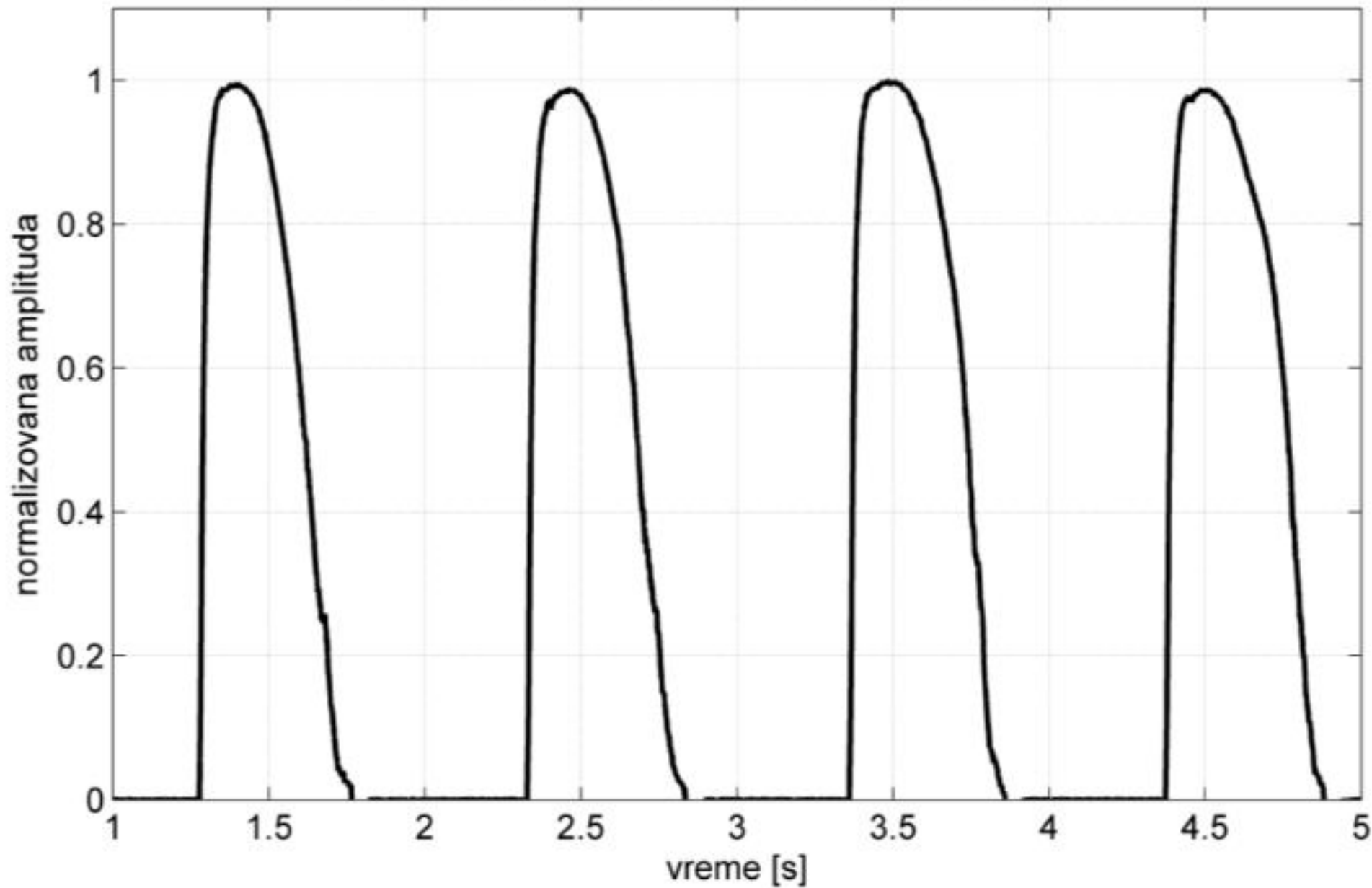
Senzor meri silu ( $F$ ) i uobičajen naziv za ovaj senzor je otpornik osetljiv na promenu sile (FSR). Međutim, izmerena otpornost će zavisiti od pritiska ( $p$ ) koji je primenjen na neku površinu ( $S$ ). Što je  $S$  manje, to je pritisak (promena otpornosti senzora) veći. Što je  $S$  veće, to je pritisak manji. Postoje FSR senzori različitih dimenzija koji se koriste za različite opsege primenjenog pritiska.

Slika: Fair Use, Iterlink, <https://www.interlinkelectronics.com/force-sensing-resistor>

**PRIMENA?**

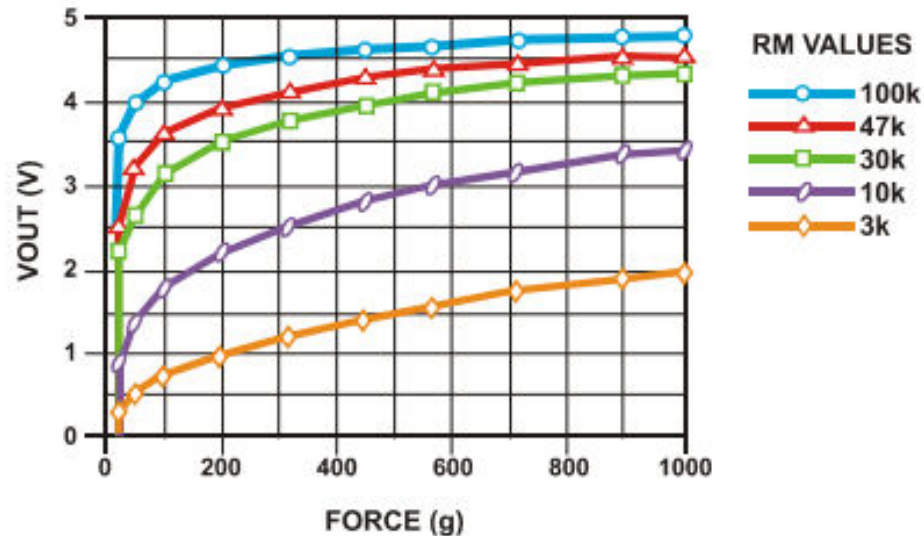
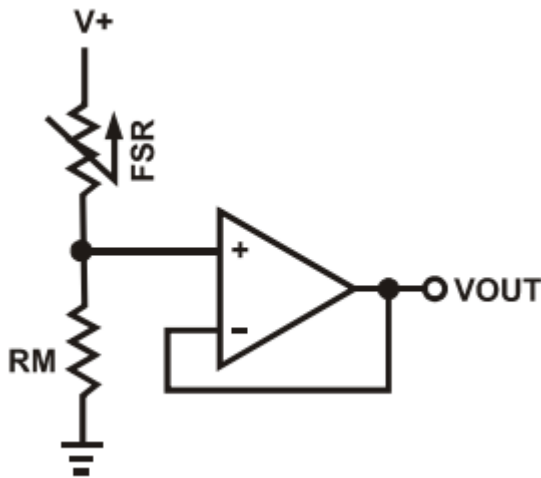


Podaci mereni sa FSR senzora tokom hoda



# FSR – naponski razdelnik

$$V_{OUT} = V^+ \frac{RM}{R_{FSR} + RM}$$



FSR senzor – naponski razdelnik i zavisnost izlaznog napona od sile, Interlink Electronics, <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Pressure/fsrguide.pdf>. Fair use.

FSR senzor je moguće povezati u jednostavno kolo – naponski razdelnik (slika).  $V_{out}$  se povećava sa povećanjem sile. Otpornik  $R_M$  se bira tako da maksimizuje silu i da ograniči struju kroz FSR senzor ( $R_{FSR}$ ). Zavisnost napona  $V_{OUT}$  od sile je dat na slici za različite vrednosti otpornika  $R_M$ , za  $V^+ = 5\text{ V}$ .

Bafer služi za prilagođenje impedanse, jer bafer ima veliku ulaznu impedansu, malu izlaznu impedansu, to je razdvojni stepen.