



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

Merenje električnih veličina II deo

Dr Nadica Miljković, redovna profesorka, kabinet 68,
nadica.miljkovic@etf.bg.ac.rs

Prezentacija za ovo predavanje je skoro u potpunosti
pokrivena MIEM udžbenikom prof. Miljković:
<https://doi.org/10.5281/zenodo.1335249>. Takođe,
korišćene su i beleške za Merne mostove prof.
Pejovića: <http://tnt.etf.rs/~oe2em/mostovi.pdf>.

I - intenzitet struje kroz kalem
 N - broj navoja kalem - tj. namotaja
 l - dužina kalem
 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
kalem

$$M_1 + M_2 = 0$$

$$N I l B l = K \alpha$$

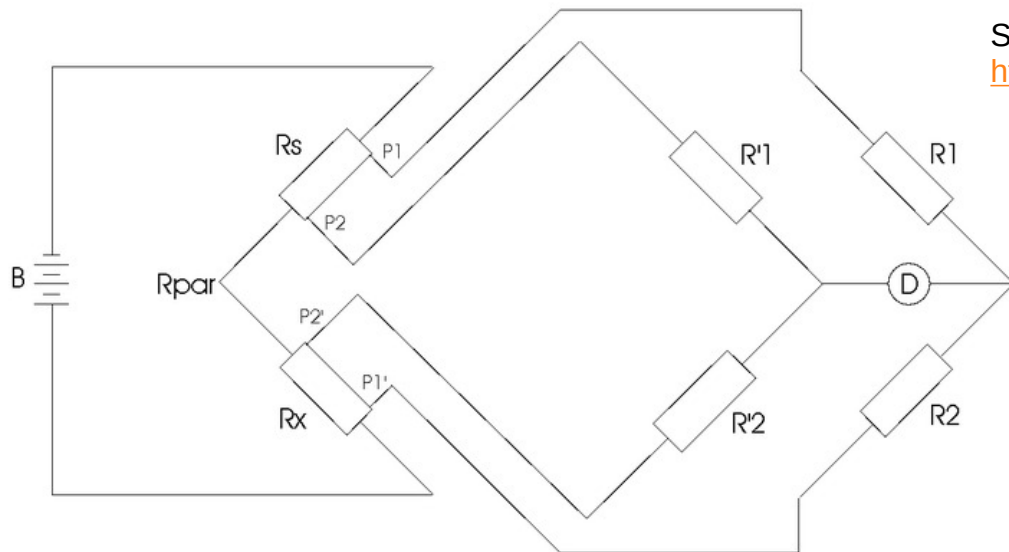
$$\alpha = \frac{N I l B l}{K} \cdot I \Rightarrow \alpha \text{ i } I \text{ su}$$

direktno
proporcionalne

Instrument sa pokretnim kalemom

- Tražili su studenti i studentkinje 2018. godine:
 - Za skretanje kazaljke, odnosno računanje ugla α , tačan proračun je prikazan na ovom slajdu.
 - Konačni izrazi su dati u MIEM udžbeniku.

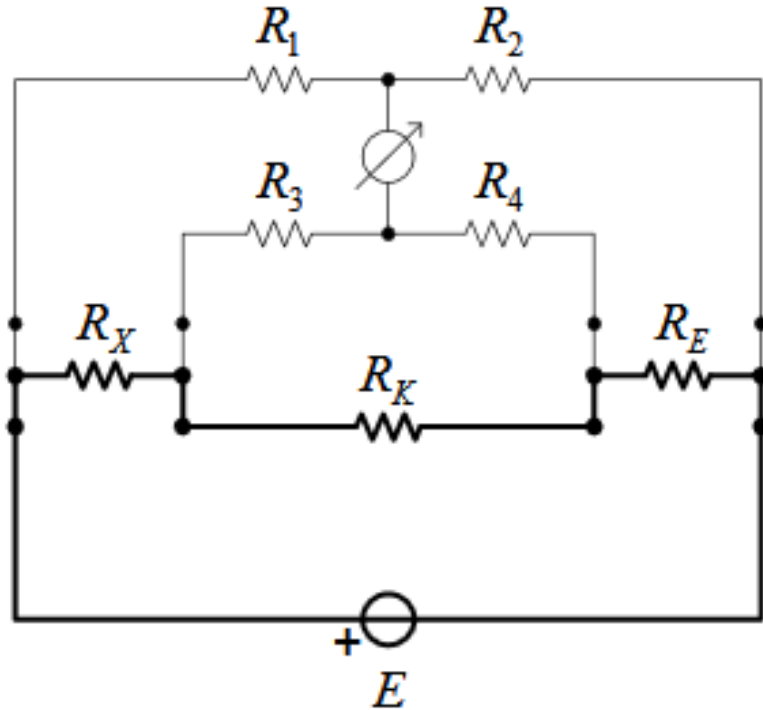
Precizni otpornici ($<1\ \Omega$)



Slika, By DieSwartzPunkt at English Wikipedia, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=38909138>

- Za merenje malih otpornosti ($<1\ \Omega$), koristi se Tomsonov/Kelvinov most, https://en.wikipedia.org/wiki/Kelvin_bridge.
- Otpornost pristupnih vodova (na laboratorijskim vežbama 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.

Tomsonov (Kelvinov) most

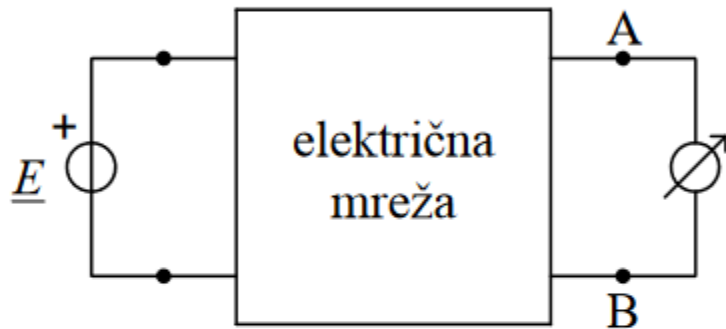


$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

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

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

Mostovi za naizmeničnu struju



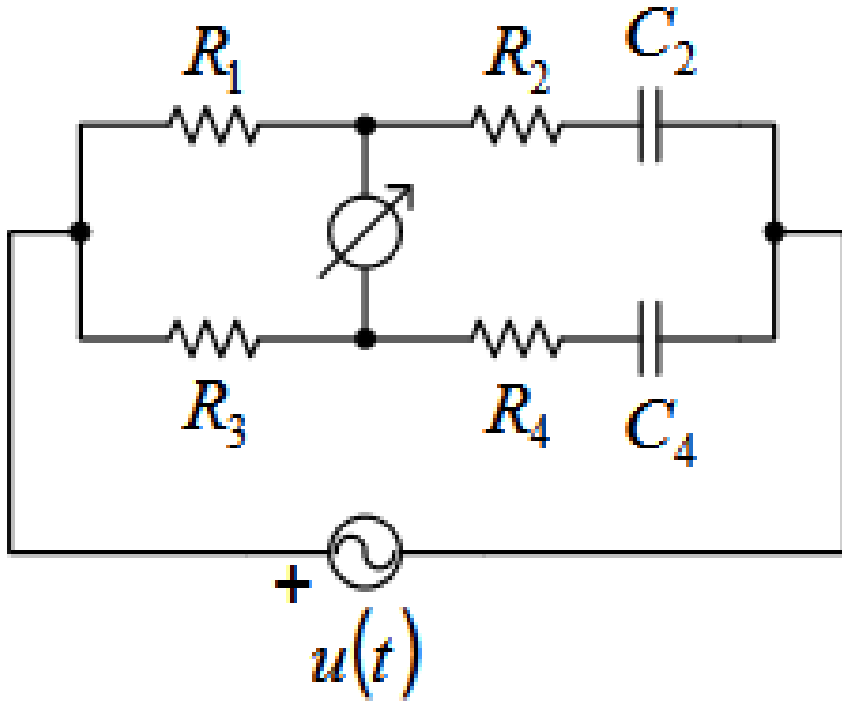
$$\underline{U}_{AB} = f(\underline{E}, \underline{Z}_1, \dots, \underline{Z}_n)$$

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

Na slici, opšta šema iz
<http://tnt.etf.bg.ac.rs/~oe2em/mostovi.pdf>,
pristupljeno 04.12.2024.

- 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?
- M ispod slike predstavlja međusobnu induktivnost kod spregnutih kalemova.

Most za poređenje redne C

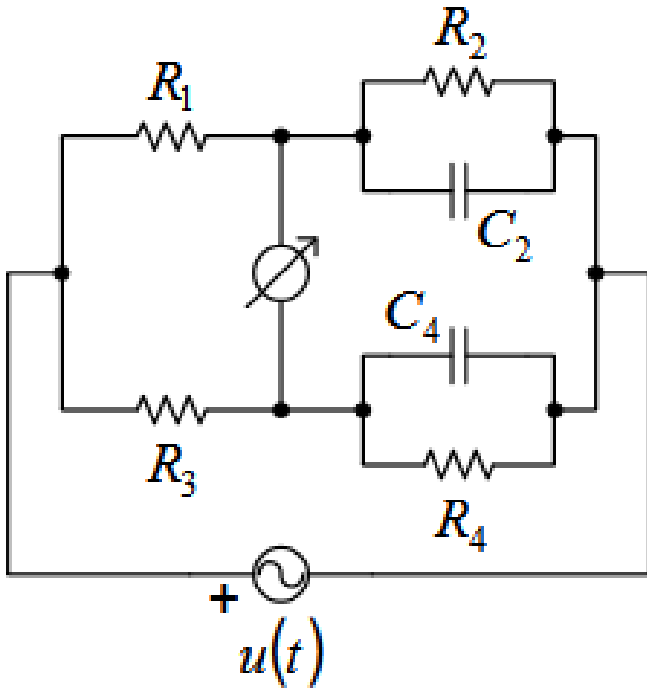


$$C_X = C_4 = C_2 \frac{R_1}{R_3}$$

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

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

Most za poređenje paralelne C

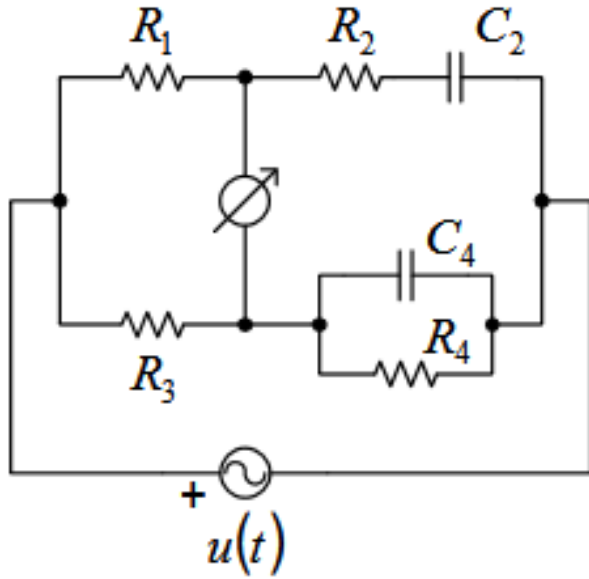


$$C_X = C_4 = C_2 \frac{R_1}{R_3}$$

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

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

Vinov most



- Moguće ga je koristiti za merenje redne ili paralelne C,
https://en.wikipedia.org/wiki/Wien_bridge
- Ravnoteža mosta zavisi od frekvencije!
Moguće je i meriti frekvenciju.

merenje paralelne kapacitivnosti:

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

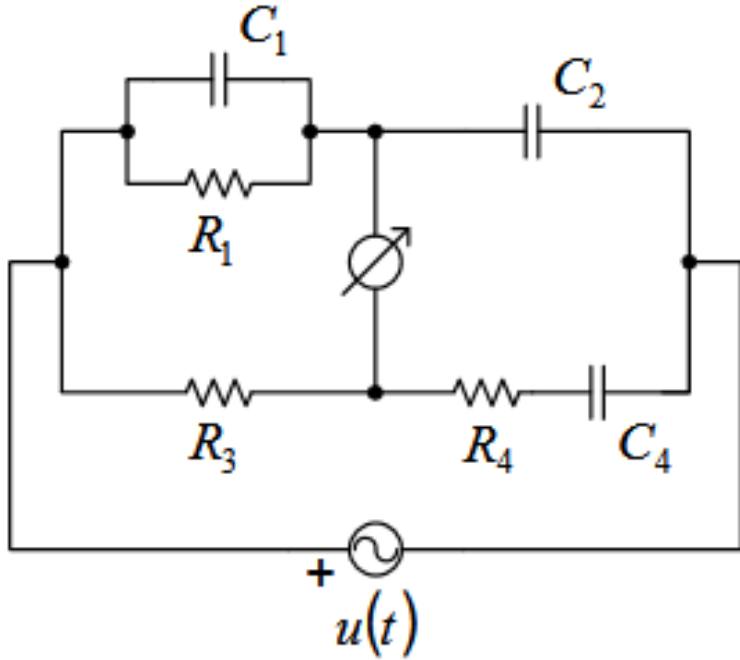
$$R_X = R_4 = \frac{R_3}{R_1} \left(1 + \frac{1}{(\omega R_2 C_2)^2} \right) R_2$$

merenje redne kapacitivnosti:

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

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

Šeringov most

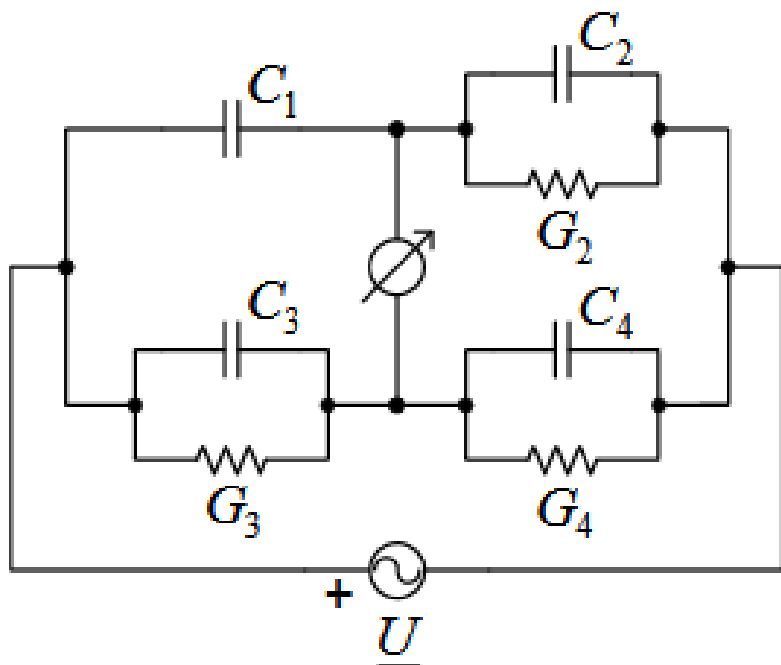


$$C_4 = \frac{R_1}{R_3} C_2$$

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

- 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.

Ogavinov most



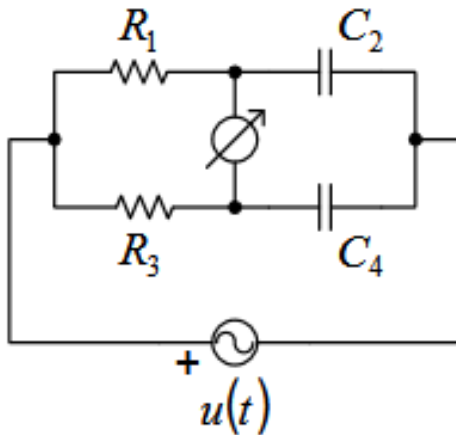
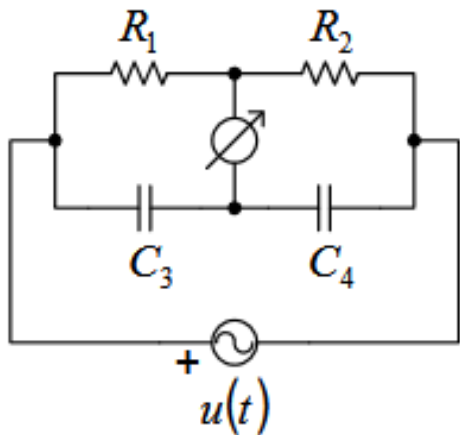
$$G_2 G_3 = \omega^2 (C_2 C_3 - C_1 C_4)$$

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

$$G_k = 1/R_k$$

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

Sotijev most

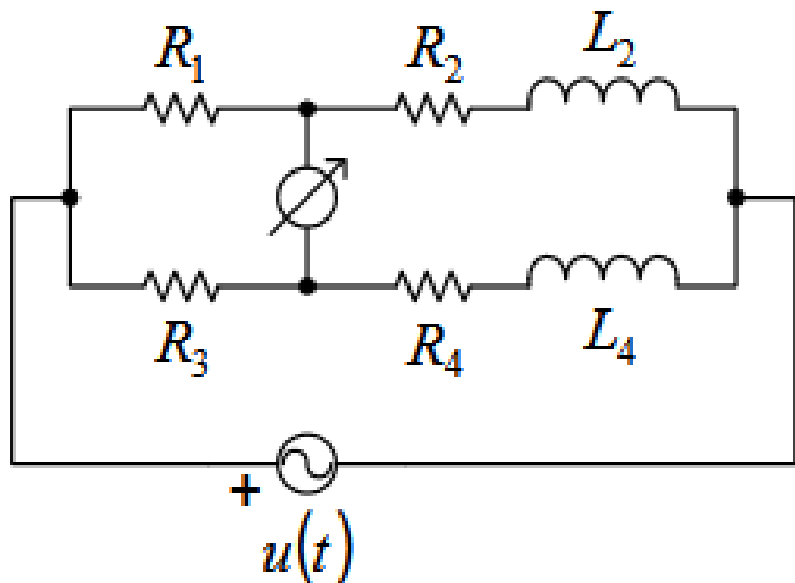


$$C_X = C_4 = C_3 \frac{R_1}{R_2}$$

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

- Postoje dve verzije Sotijevog mosta.
- Primenom teoreme po kojoj se uslovi 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

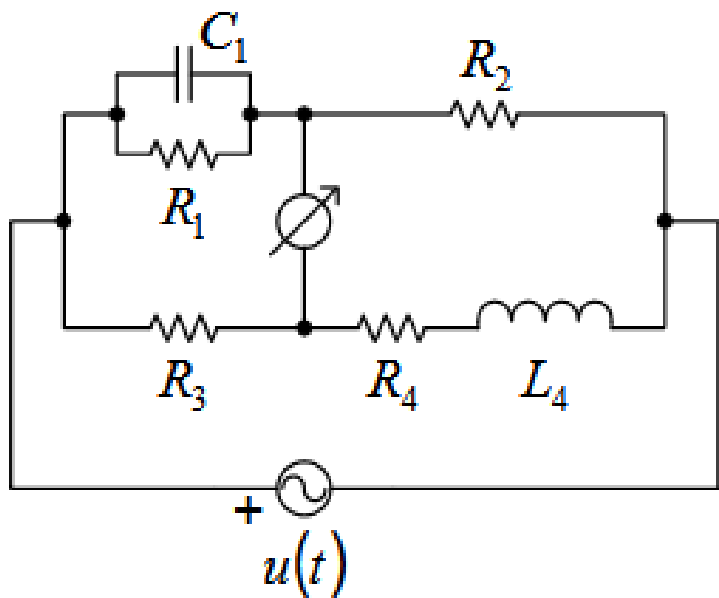


$$L_X = L_4 = L_2 \frac{R_3}{R_1}$$

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

- Problem kod ovog mosta je međusobno sprežanje kalemova.
 - Struja je promenljiva kroz kalemove.
 - Stvara se promenljivo magnetno polje i fluks u svakom od kalema.
 - U drugom kalemu uzrokuje indukovanu elektromotornu silu.
- Analogno, važi i za paralelnu induktivnost.

Maksvelov most

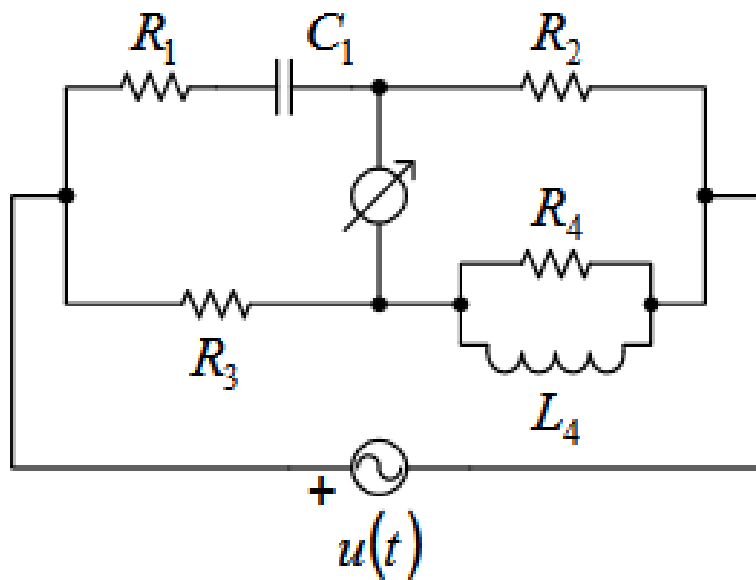


$$L_X = L_4 = R_2 R_3 C_1$$

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

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

Hejov most

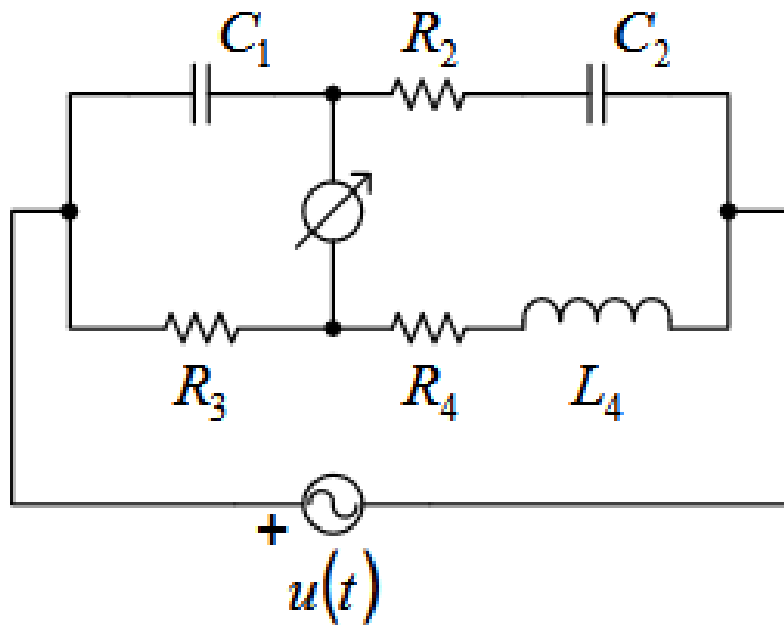


$$L_X = L_4 = R_2 R_3 C_1$$

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

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

Ovenov most

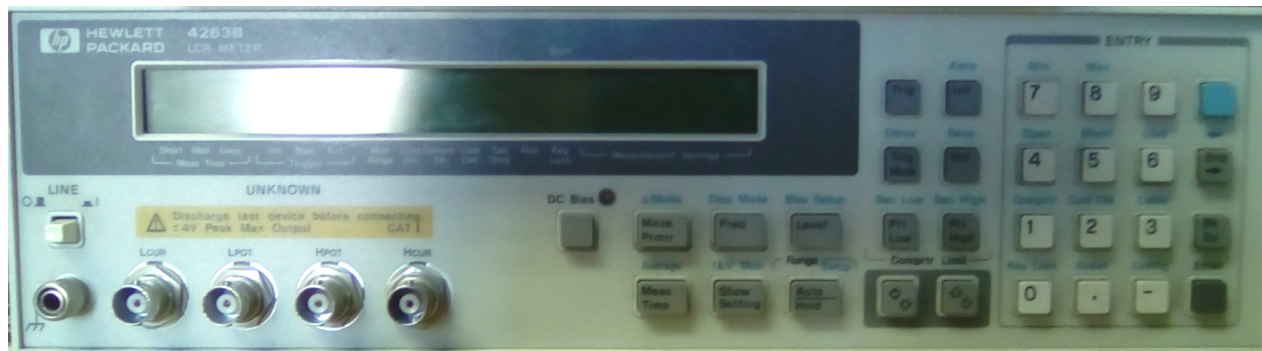


$$L_X = L_4 = R_2 R_3 C_1$$

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

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

LCR metar



HP 4263B LCR metar na Elektrotehničkom fakultetu, Univerziteta u Beogradu.

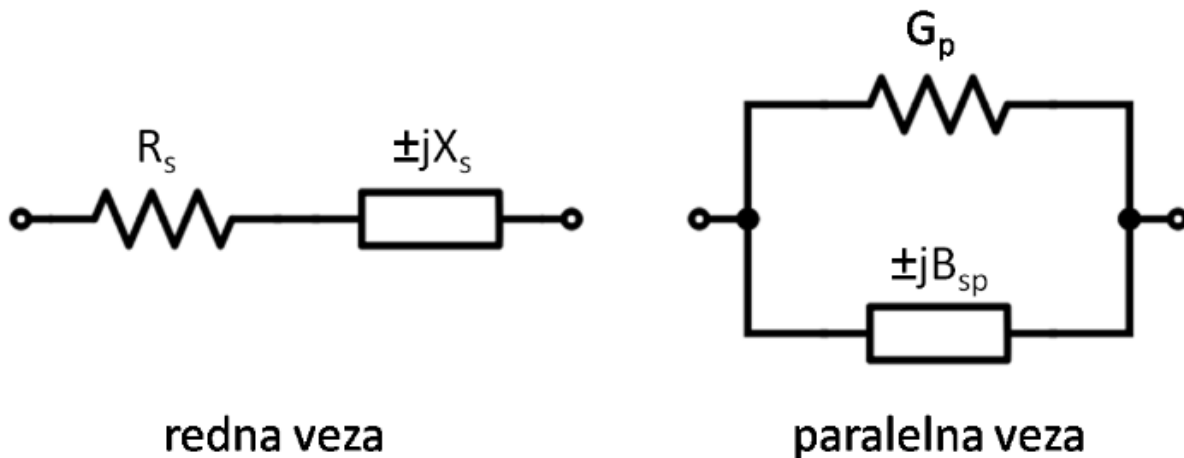
LCR metar (https://en.wikipedia.org/wiki/LCR_meter) je instrument koji se koristi za merenje impedanse.

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



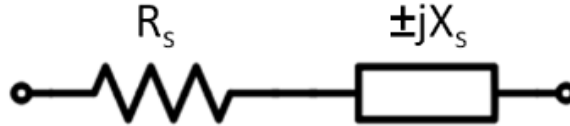
Sl. 70, Redna i paralelna veza sa označenim realnim i imaginarnim elementima.

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

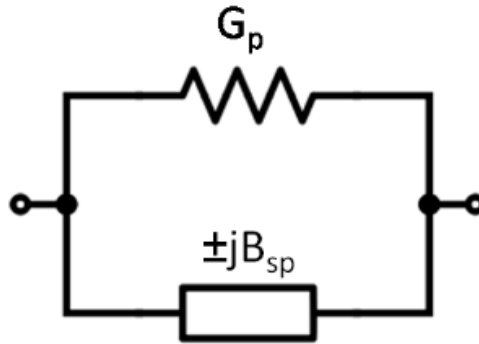
$$Z = R_s + jX_s$$



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

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

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



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

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).

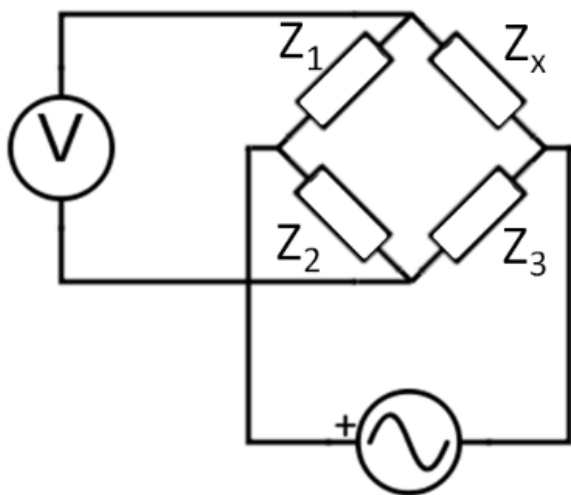
Kako je veza između serijskih i paralelnih elemenata u funkciji od D^2 , kada je D manje od 0.03, onda je razlika između C_p i C_s (L_p i L_s) manja od 0.1%. D i Q ne zavise od odabranog kola. Koliko je C_s na slici?



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

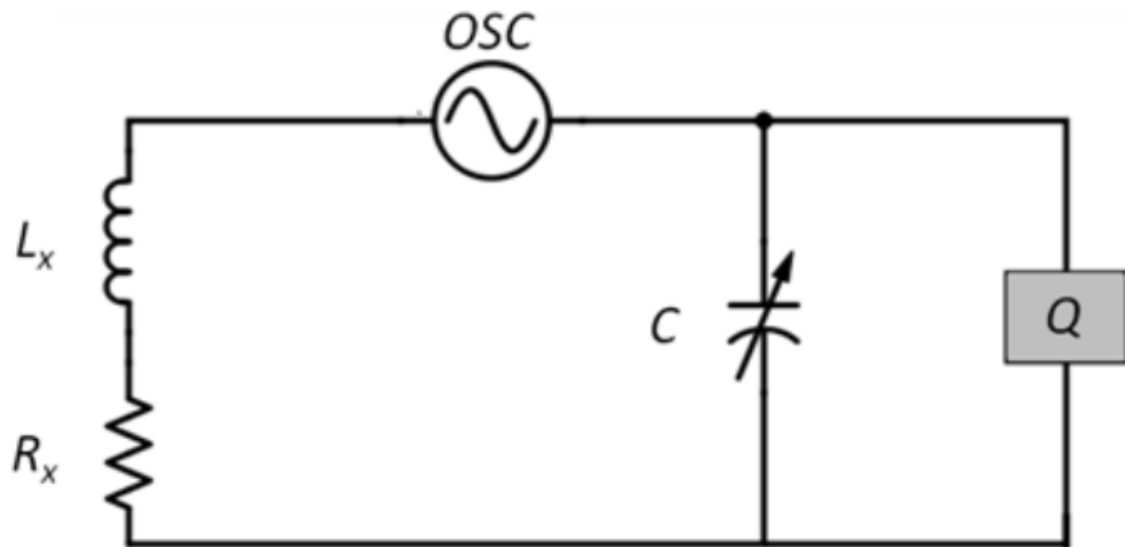


merni most za naizmeničnu struju

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 – rezonantna metoda



rezonantna 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 rezonantna frekvencija, kapacitivnost C i merena veličina Q .

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

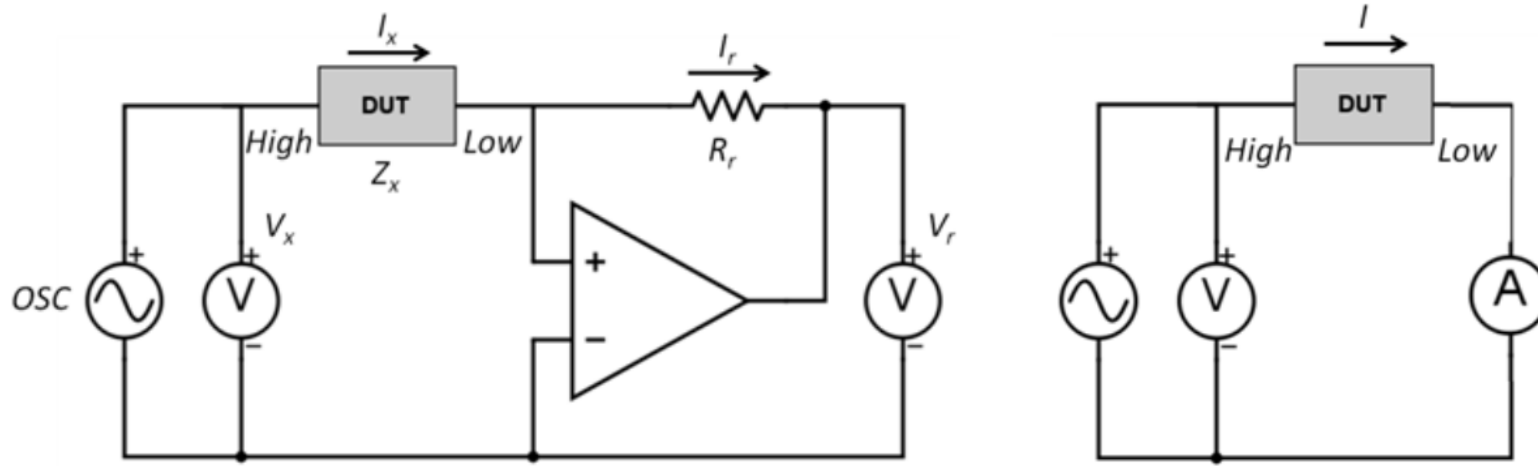
Princip rada LCR metra – merenje struje i napona

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, a koje se koriste za merenje relativno velikih i relativno malih vrednosti nepoznate impedanse Z_x .

Neke smo radili!

Princip rada LCR metra – automatizovani most

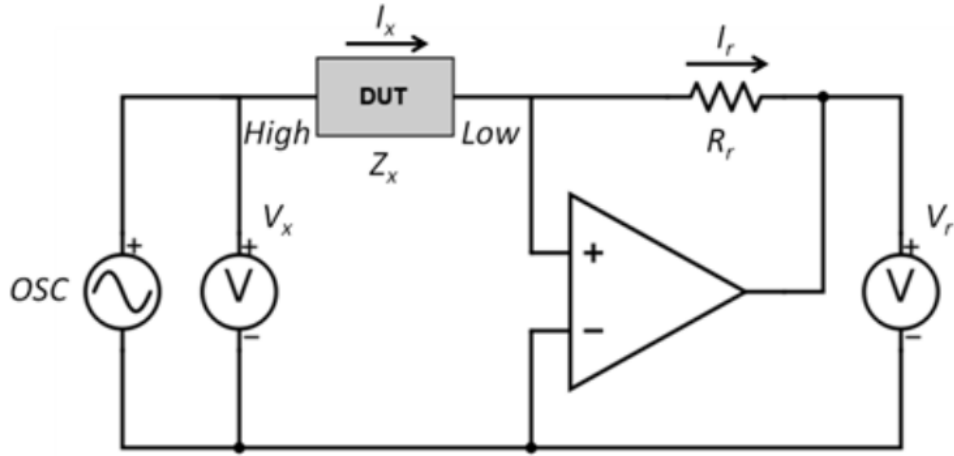


Automatizovani most na levom panelu i najjednostavniji model automatizovanog mosta na desnom panelu
DUT – eng. *device under test*

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

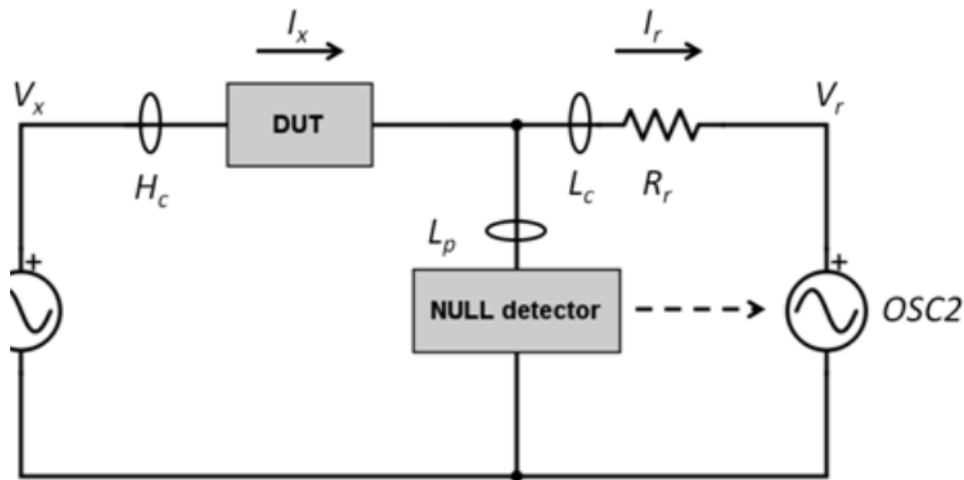


Za LCR metar u niskom frekvencijskom opsegu merenja (tipično ispod 100 kHz) koristi se operacioni pojačavač kao I / V konvertor. Strujom I_x se podešava struja I_r koja prolazi kroz otpornik R_r (eng. *range resistor*), preko I / V konvertora.

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



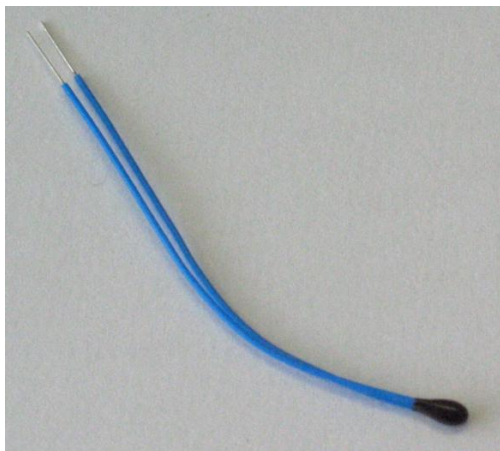
Primer primene senzora rastojanja u automobilima (izvor: Volkswagen, <http://www.volkswagen.co.uk/technology/proximity-sensing>). With thanks to Volkswagen.

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.

Pasivni i aktivni senzori



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

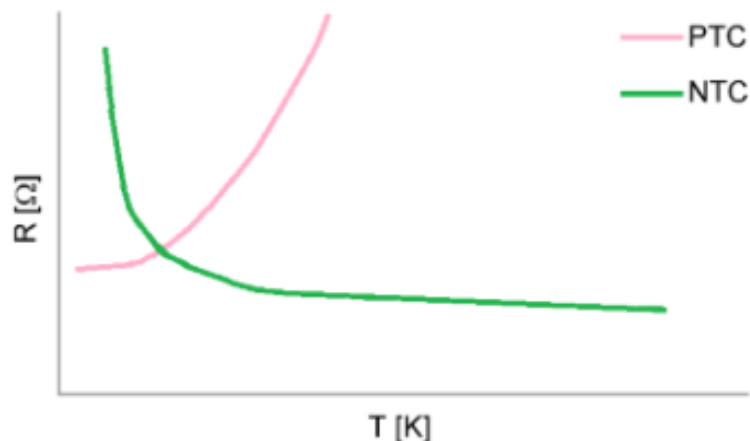
Neke osnovne statičke karakteristike senzora su:

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 bita, a naponski opseg merenog signala 0-5 V, tada je rezolucija merenja tim senzorom $5/2^{12} = 0.0012$ V.

Termistor

NTC i PTC karakteristika senzora



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:

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

gde je R_t otpornost (u Ω) 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

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

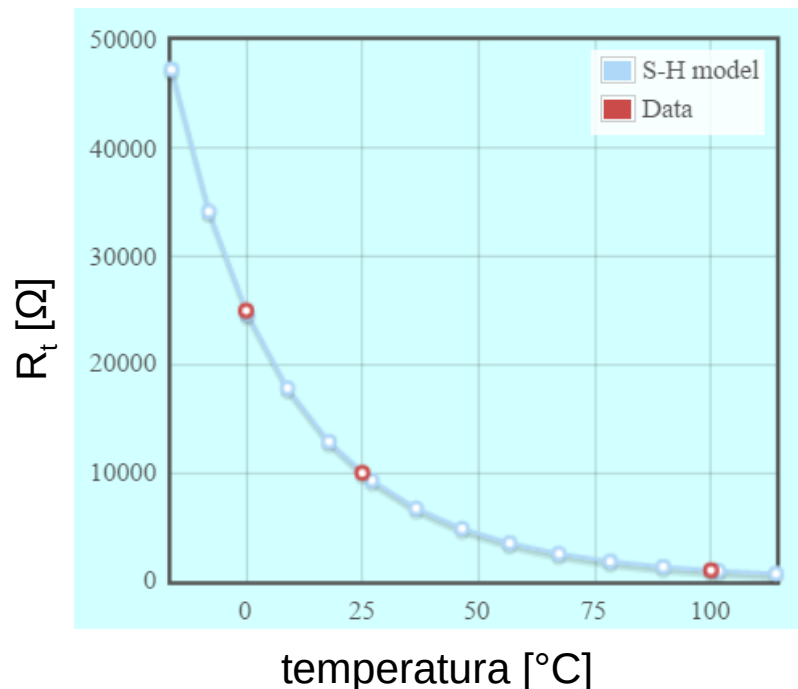
SH jednačina je oblika:

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

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, Staford Research Systems Inc. (pristupljeno 21.01.2026. godine):

<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 – β model

Moguće je predstaviti zavisnost otpornosti od temperature i preko β (ili B) modela:

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

gde je R_t otpornost termistora (Ω), T temperatura (K), β (K) i A su konstante termistora. Za referentnu temperaturu T_0 , važi da je:

$$\ln R_{t0} = A + \frac{\beta}{T_0}$$

Oduzimanjem ova dva izraza dobija se:

$$\ln R_t - \ln R_{t0} = \ln \frac{R_t}{R_{t0}}$$

$$\ln \frac{R_t}{R_{t0}} = \beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

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

$$R_t = R_{t0} e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

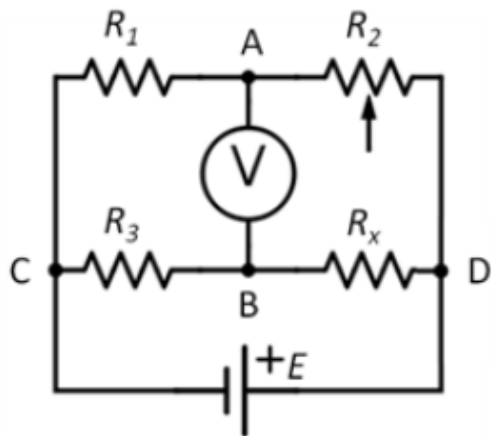
$$\frac{1}{T} = \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{R_t}{R_{t0}} \right) + \frac{1}{T_0}$$

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)

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 R_2 je potencijometar koji služi za uravnoteženje mosta. Ako su: $R_1 = R_3 = R = 10 \text{ k}\Omega$, $E = 5 \text{ V}$ i $R_{2max} = 30 \text{ k}\Omega$, uraditi sledeće zadatke:

1. Nacrtati zavisnost napona U_{AB} u funkciji od ΔR , 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.



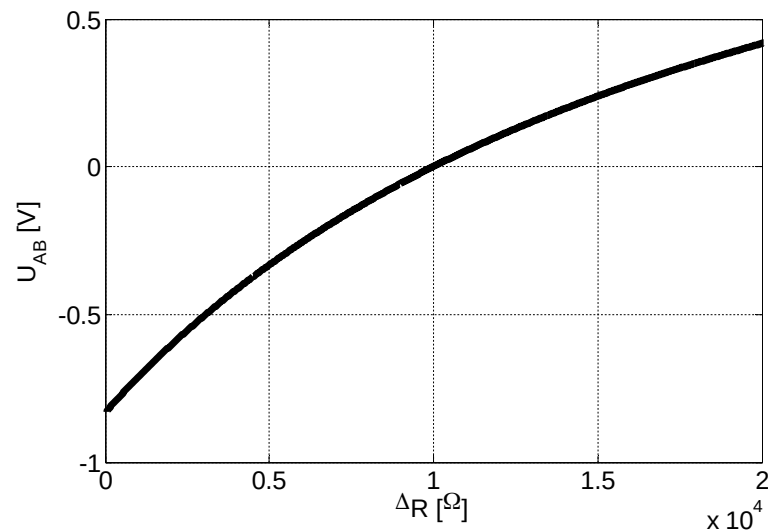
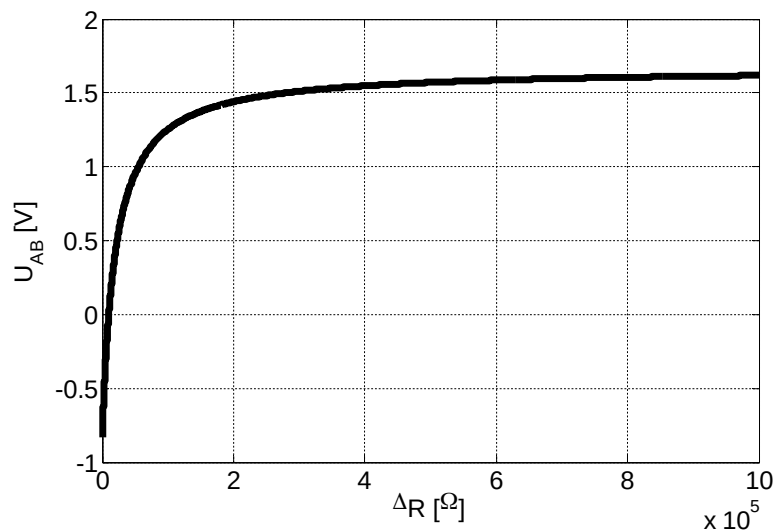
Temperaturna zavisnost PTC otpornika:

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

PTC termistor – rešenje

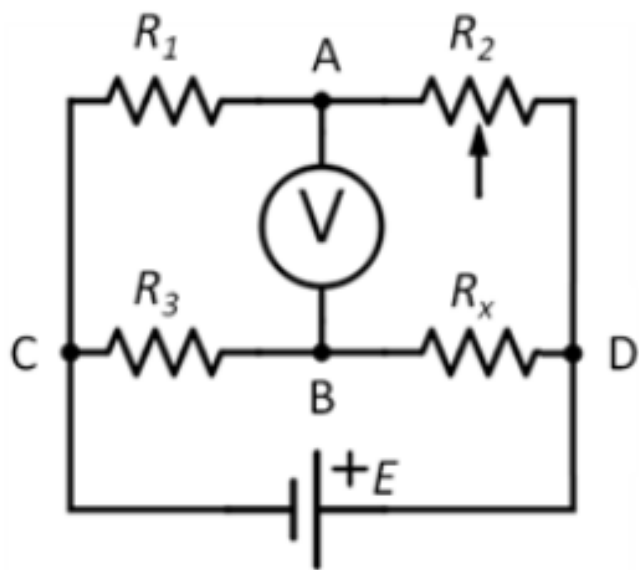
Nacrtati zavisnost napona U_{AB} u funkciji od ΔR , ako je $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$ i ako su $R_x = R + \Delta R$, $R_1 = R_3 = R = 10 \text{ k}\Omega$ i $E = 5 \text{ V}$.

Pogledati detaljno rešenje za ovaj deo zadatka u materijalima za vežbe i u udžbeniku.



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 $R_{2\max} = 30 \text{ k}\Omega$.



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

Za most u ravnoteži važi:

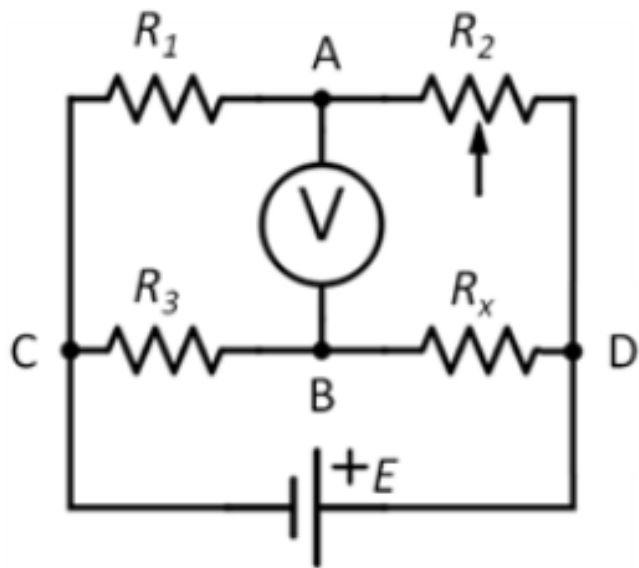
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_x}$$

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

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 $R_{2\max} = 30 \text{ k}\Omega$.



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

Iz prethodnog izraza, moguće je izračunati promenu temperature ΔT :

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

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

Rezistivni senzor sile

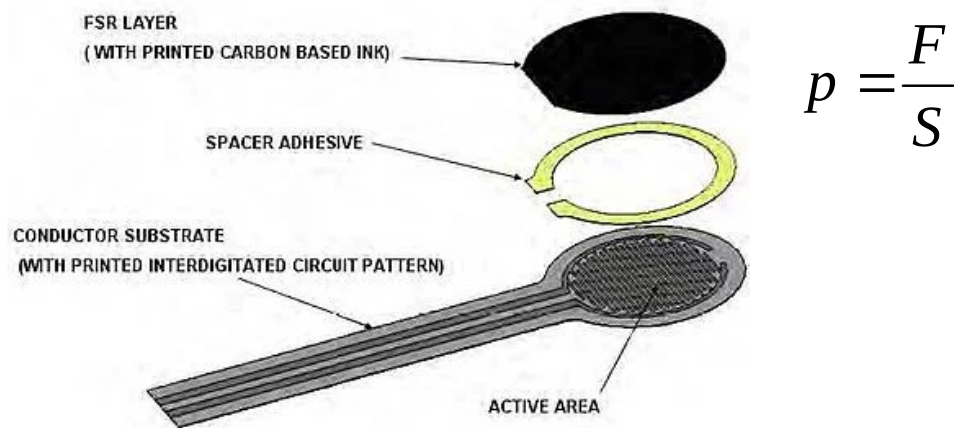


By oomlout - Force Sensing Resistor Interlink 402 - FSRE-01, CC BY-SA 2.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=20629529>

Rezistivni senzor sile (eng. *Force Sensing Resistor*, skraćeno FSR, 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 ≈ 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



Slika: Fair Use, Iterlink, <https://www.interlinkelectronics.com/force-sensing-resistor>, pristupljeno 21.01.2026. godine

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).

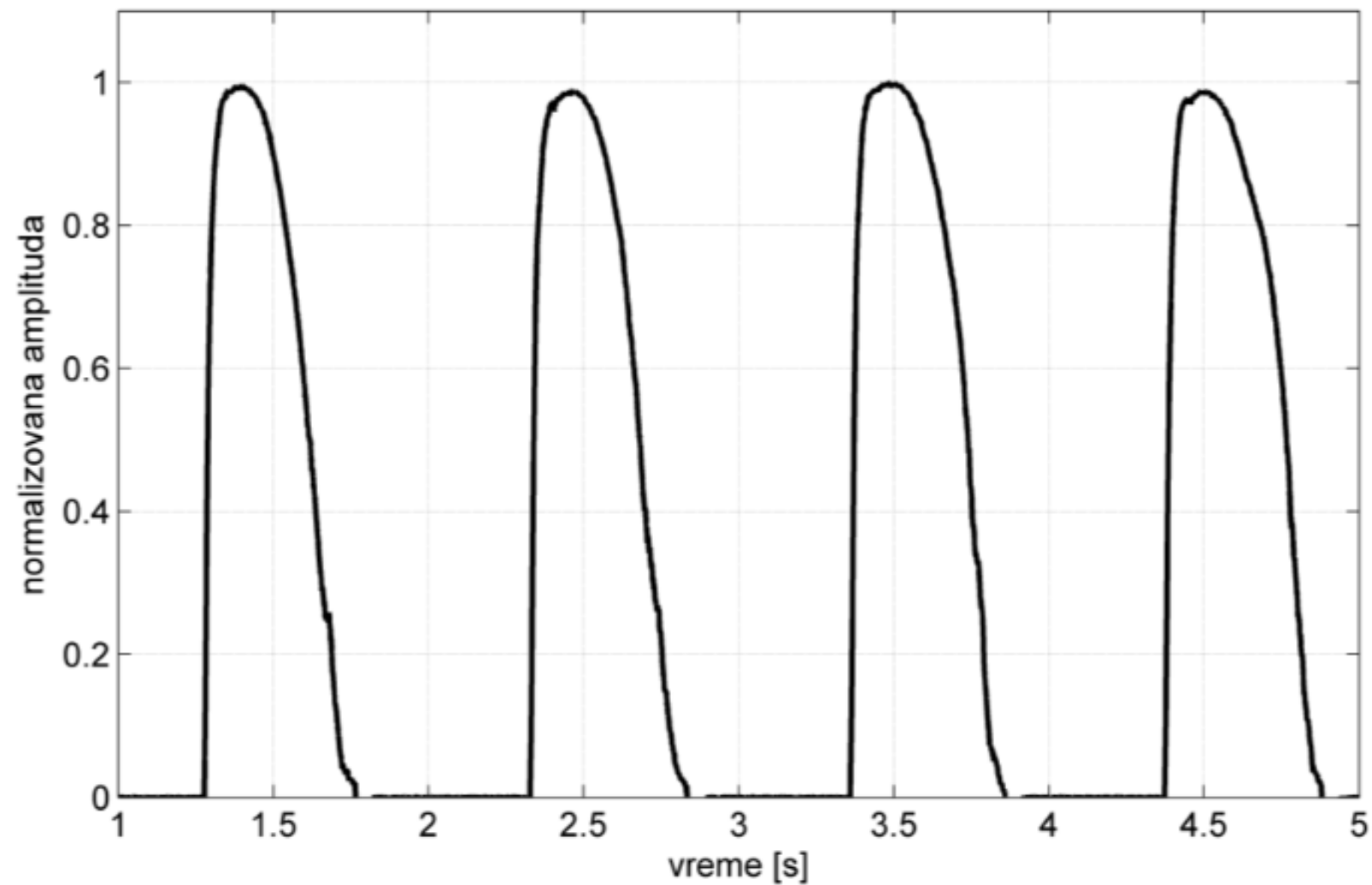
Senzor meri silu (F) i uobičajen naziv za ovaj senzor je otpornik osetljiv na promenu sile (FSR). Međutim, izmerena otpornost će zavisiti od pritiska (p) koji je primenjen na neku površinu (S).

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.

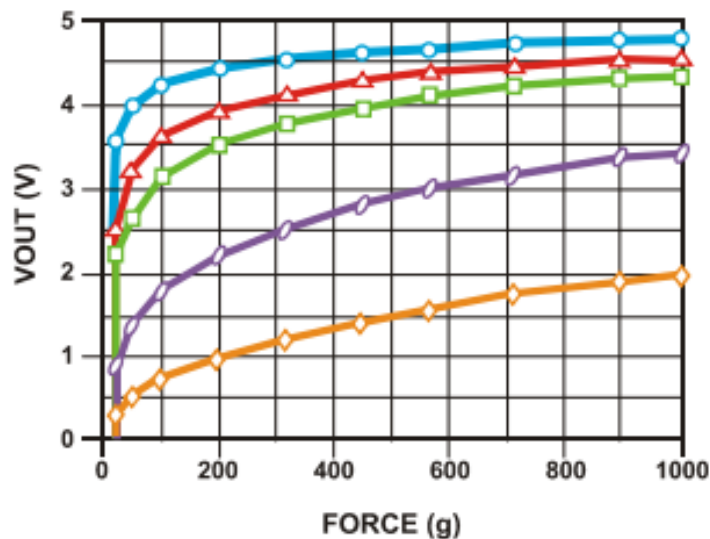
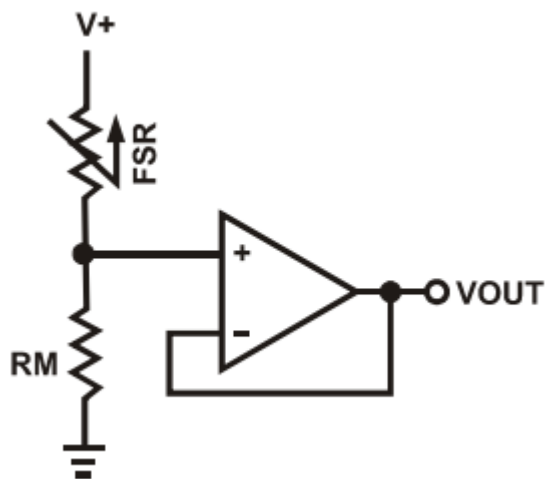


PRIMENA?

Podaci mereni sa FSR senzora tokom hoda



FSR – naponski razdelnik



RM VALUES

- 100k
- 47k
- 30k
- 10k
- 3k

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

FSR senzor – naponski razdelnik i zavisnost izlaznog napona od sile, Interlink Electronics, <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Pressure/fsrguide.pdf>, Fair Use, pristupljeno 21.01.2026. godine

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 data na slici za različite vrednosti otpornika R_M , za $V^+ = 5V$. Bafer služi za prilagođenje impedanse, jer bafer ima veliku ulaznu impedansu, malu izlaznu impedansu, to je razdvojni stepen → u novijim A/D konvertorima nije potreban.