2. Električni viri, osnovna vezja in merilni inštrumenti

Vsebina poglavja: idealni in realni napetostni in tokovni vir, osnovni elementi vezij (zaporedna in vzporedna vezava uporov, napetostni in tokovni delilnik, mostično vezje, potenciometer), temperaturna odvisnost uporov, nelinearni elementi, ampermeter, voltmeter, ohmmeter, vatmeter, fizikalne veličine, označevanje, enote.

ELEKTRIČNI VIRI

Idealni tokovni in napetostni vir. S prerazporeditvijo nabojev realiziramo električne vire. Ločimo dva vira tipa virov: napetostne vire in tokovne vire. Idealni napetostni vir je tak, ki zagotavlja na svojih sponkah konstantno napetost neodvisno od obremenitve. To je napetost odprtih sponk, včasih ji rečemo tudi napetost prostega teka. Matematično to zapišemo kot $U = U_0$.

SLIKA: Simbol za idealni napetostni vir, napetost odprtih sponk in karakteristika vira.

Idealni tokovni vir pa je tak, ki na svojih zunanjih sponkah zagotavlja tok, ki je neodvisen od priključitve bremena. Matematično: $I = I_0$. V primeru, da sponke takega vira kar kratko sklenemo, bo tekel tok kratkega stika, kar predstavlja tudi nazivni tok tega vira.

SLIKA: Simbol za idealni tokovni vir, tok kratkega stika in karakteristika vira.

Problem predstavitve (uporabe) idealnih virov je v tem, da je tok kratkega stika pri napetostnem viru neskončen (ker je notranja upornost idealnega vira enaka nič), prav tako je neskončna napetost na odprtih sponkah idealnega tokovnega vira (notranja upornost takega vira je neskončna). Zato je bolj korektno upoštevati še notranjo upornost tako tokovnega kot napetostnega vira. Za tak vir uporabimo izraz realen vir, kljub temu, da je v realnosti lahko električna karakteristika pravega vira še bolj zapletena.

Realni napetostni vir. Govorili smo že o idealnem napetostnem viru, za katerega smo rekli, da ima napetost na zunanjih sponkah konstantno in neodvisno od priključenega bremena. Takih virov seveda ni, če na slab napetostni vir priključimo preveliko breme (v resnici je to breme z majhno notranjo upornostjo), se na zunanjih sponkah vira napetost »sesede«. Vsak vir ima namreč določeno notranjo upornost in ob priključitvi vira na breme steče tok, ki povzroči padec napetosti na bremenu, pa tudi na notranji upornosti vira. Kar tudi pomeni, da na zunanjih sponkah vira nimamo več napetosti odprtih sponk pač pa neko manjšo napetost, ki je zmanjšana za padec napetosti na notranji upornosti vira. Poglejmo si razmere matematično in grafično:

SLIKA: realni napetostni vir.

Realni napetostni vir ponazorimo z zaporedno vezavo idealnega napetostnega vira in upora. Če na priključnih sponkah ni priključeno breme, je seveda tok enak nič in padca napetosti na upornosti vira ni. Napetost na priključnih sponkah je enaka napetosti odprtih sponk: $U = U_\mathrm{g} = U_\mathrm{o}$. Če pa priključimo breme, se napetost na priključnih sponkah zmanjša za padec napetosti na notranji upornosti generatorja: $U = U_\mathrm{g} - IR_\mathrm{g}$. To enačbo lahko prikažemo tudi grafično in ji rečemo *karakteristika vira*. Na X osi (abscisi) označimo napetost, na Y osi (ordinati) pa tok. Enačba predstavlja enačbo premice, ki jo najlažje določimo v točkah, kjer premica seka X in Y os, napetostno in tokovno os. Ko je tok enak nič, je $U = U_\mathrm{o} = U_\mathrm{g}$, to je stanje **odprtih sponk**. Ko pa je napetost enaka nič, je $I = U_\mathrm{g} / R_\mathrm{g}$. To pa je stanje **kratkega stika**. Med točkama kratkega stika in napetostjo odprtih sponk mora potekati premica, ki ji rečemo **karakteristika realnega vira.**
Samo karakteristika vira še ne zadostuje za določitev napetosti na bremenu. Potrebujemo še karakteristiko bremena. Ta je preprosta, saj ko na priključne sponke priključimo breme, je na bremenu napetost U in velja: $U = R_\mathrm{b} I$. Če narišemo še to enačbo v diagram, tudi ta predstavlja enačbo premice. Ena točka je v koordinatnem izhodišču, drugo pa določimo tako, da za določeno izbrano vrednost toka (napetosti) izračunamo vrednost napetosti (toka) in vrišemo še drugo točko ter potegnemo premico. Naklon premice predstavlja upornost. Velik naklon predstavlja majhno upornost, majhen naklon pa veliko upornost.
Premici imata presečišče, ki ga imenujemo **delovna točka**. To je namreč točka, ki ponazarja »delovno« stanje vezja. Odčitamo lahko tok in napetost delovne točke. To je tok, ki teče skozi breme, napetost pa je napetost na bremenu. Ta način določanja delovne točke imenujemo *grafičen način*.

Določimo delovno točko še matematično. To naredimo tako, da združimo enačbi bremena in vira. Dobimo $R_\mathrm{b} I = U_\mathrm{g} - IR_\mathrm{g}$. Tok v vezju bo torej $I = \dfrac{U_\mathrm{g}}{R_\mathrm{g} + R_\mathrm{b}}$, napetost na bremenu pa $U = \dfrac{U_\mathrm{g}}{R_\mathrm{g} + R_\mathrm{b}} R_\mathrm{b}$. To sta tudi tok in napetost v delovni točki, ki jih odčitamo tudi grafično.

Primer: Na 9 V baterijo z notranjo upornostjo 1 Ω priključimo breme z upornostjo 5 Ω. Določite napetost in tok na bremenu grafično in analitično.

Izračun: $I = \frac{U_g}{R_g + R_b} = \frac{9\,\mathrm{V}}{1\,\Omega + 5\,\Omega} = 1{,}5\,\mathrm{A}$, $U = 1{,}5\,\mathrm{A} \cdot 5\,\Omega = 7{,}5\,\mathrm{V}$.

Realni tokovni vir. Je sestavljen iz idealnega tokovnega vira s tokom I_g in vzporedno vezane upornosti R_g. Če ni priključenega bremena, je na zunanjih sponkah napetost enaka $U = R_g I_g$. Če je na zunanji sponki priključeno breme (upor R_b), se tok skozi breme zmanjša za tok skozi upornost vira: $I = I_g - U / R_g$. Ta enačba predstavlja karakteristiko realnega tokovnega vira, ki jo prav tako lahko grafično prikažemo. Pri kratkem stiku je napetost na bremenu enaka nič, tok pa je kar tok idealnega tokovnega vira in ga imenujemo tudi tok kratkega stika: $I(U=0) = I_k = I_g$, pri odprtih sponkah pa je tok I enak nič, napetost pa napetost odprtih sponk $U_o = I_g R_g$. Če karakteristiko narišemo kot *U-I* diagram, dobimo zopet premico. V presečišču s karakteristiko bremena pa delovno točko.

SLIKA: Realni tokovni vir.

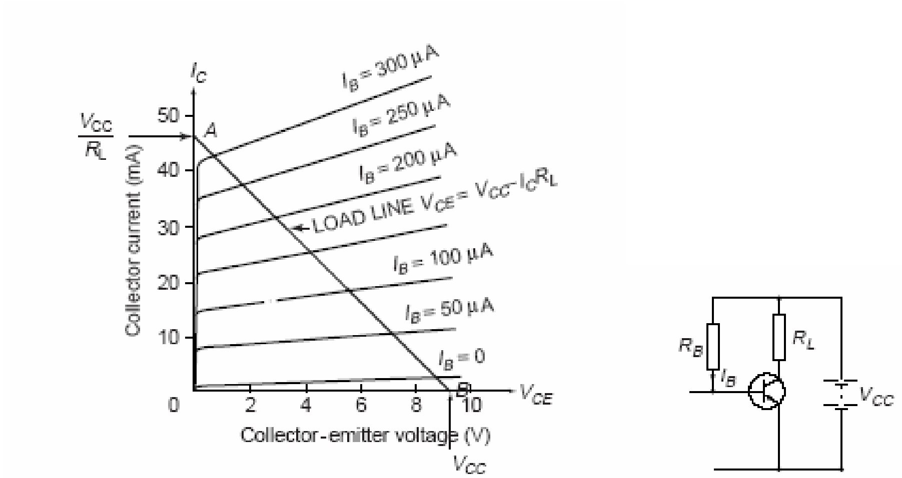
Ugotovimo lahko, da se ***karakteristika realnega tokovnega vira lahko prilega karakteristiki realnega napetostnega vira. V tem smislu sta to dva ekvivalentna vira.*** Če primerjamo karakteristiki ugotovimo, da bo analogija veljala tedaj, ko bo $U_g = I_g R_g$.

Vprašanje: Kdaj torej govorimo o napetostnem in kdaj o tokovnem viru? Ko imamo vir z zelo veliko notranjo upornostjo nam le ta zagotavlja konstanten tok (dokler je upornost bremena dosti manjša od notranje upornosti vira, če pa je notranja upornost vira zelo majhna, nam to na zunanjih sponkah zagotavlja konstantno napetost.

Vzporedna in zaporedna vezava virov. Enako kot upore, lahko zaporedno vežemo tudi napetostne vire in s tem dosežemo višjo skupno napetost na zunanjih sponkah. To je tudi običajno narejeno pri mnogih elektronskih aparatih, kjer je na primer za delovanje naprave pri 6 V potrebno povezati zaporedno štiri 1,5 V baterije.
Podobno lahko z vzporedno vezavo tokovnih virov dosežemo vir z večjim nazivnim tokom

SLIKA: Zaporedna vezava napetostnih virov in vzporedna vezava tokovnih virov.

Nelinearno breme. Grafični način je posebno primeren tedaj, ko je breme nelinearno. Ko je napetost na sponkah bremena neka nelinearna funkcija toka skozi breme. Na primer $U = kI^2$. Tak primer je na primer dioda, element, ki ima nizko upornost pri pozitivnih in zelo visoko pri negativnih napetostih (ali obratno, odvisno od priključitve). Pri diodi je v prevodni smeri tok eksponentno odvisen od napetosti: $I = I_0 e^{kU}$,v zaporni smeri pa je tok majhen, do določene napetosti, kjer pride do preboja. Ob preboju tok skozi diodo močno naraste in lahko pride do trajne poškodbe ali uničenja elementa. Delovno točko določimo grafično, tako, da določimo točko preseka nelinearne karakteristike bremena in linearne karakteristike realnega vira.



SLIKA: Primer določanja delovne točke pri tranzistorski vezavi. Nelinearne so karakteristike tranzistorja, ki so prikazane za različne vrednosti baznega toka. (samo informativno)

OSNOVNA ELEKTRIČNA VEZJA

1. Zaporedna vezava uporov.

Pogosto upore nizamo zaporedno. Če so priključeni na vir napetosti, se napetost porazdeli na posamezne upore: $U = U_1 + U_2 + ... + U_N = \sum_{i=1}^{N} U_i$. Ker pa skozi vse teče skupen tok, velja

$$U = IR_1 + IR_2 + ... + IR_N = I\left(R_1 + R_2 + .. + R_N\right) = I\sum_{i=1}^{N} R_i = IR_{nad}$$

Nadomestna upornost zaporedno vezanih uporov je seštevek posameznih upornosti: $R_{nad} = \sum_{i=1}^{N} R_i$.

SLIKA: Zaporedna vezava uporov.

Primer: Določimo nadomestno upornost zaporedne vezave uporov 30 Ω, 100 Ω in 1 kΩ.
Izračun: R_{nad} = 1130 Ω.

2. Vzporedna vezava uporov.

Upore vežemo vzporedno kadar želimo tok razdeliti v več vej. Skupni tok je torej $I = I_1 + I_2 + ... + I_N$. Če so vzporedno vezani upori priključeni na vir, je na vseh uporih skupna napetost. Dobimo $I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + .. + \frac{U}{R_N} = U\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{R_i} = \frac{U}{R_{nad}}$. Vzporedno vezane upore lahko torej nadomestimo z nadomestno upornostjo, za katero velja $\frac{1}{R_{nad}} = \sum_{i=1}^{N}\frac{1}{R_i}$. Če to izrazimo s prevodnostmi dobimo $G_{nad} = \sum_{i=1}^{N} G_i$. Pri vzporedni vezavi uporov tvorimo torej nadomestno upornost s seštevanjem njihovih prevodnosti, pri zaporednih pa upornosti.

SLIKA: Vzporedno vezane upornosti.

Primer: Določimo nadomestno upornost vzporedne vezave uporov 30 Ω, 100 Ω in 1 kΩ.
Izračun: G_{nad} = 1/30 S + 1/100 S +1/1000 S = 0,044 S, kar ustreza R_{nad} = 22,556 Ω.

.

3. Napetostni delilnik.

Upoštevaje oba Kirchoffova zakona in zveze med napetostjo in tokom (Ohmovim zakonom) lahko analiziramo poljubno enosmerno vezje. Potrebno je pač zapisati zadostno število enačb za neznane toke v vejah vezja in rešiti linearni sistem enačb. V kratkem si bomo podrobneje ogledali metode za reševanje (analizo) vezij, ki nam omogočajo sistematičen pristop k reševanju.

SLIKA: Napetostni delilnik. Zanima nas napetost na uporu R_2.

V skadu z 2. K.Z velja $U - U_1 - U_2 = 0$. Z upoštevanjem Ohmovega zakona $U_1 = R_1 I$ in $U_2 = R_2 I$ dobimo $I = \frac{U}{R_1 + R_2}$, od koder je $U_2 = IR_2 = \frac{U}{R_1 + R_2} R_2 = U \frac{R_2}{R_1 + R_2}$. Dobili smo rešitev, ki je v elektrotehniki zelo pogosto uporabljena. Napetost moramo pogosto zmanjšati oziroma »deliti« . Takemu preprostemu načinu rečemo **delilnik napetosti**, enačbo pa si velja vtisniti v spomin. Ponovimo končni rezultat:

$\boxed{U_2 = U \frac{R_2}{R_1 + R_2}}$.

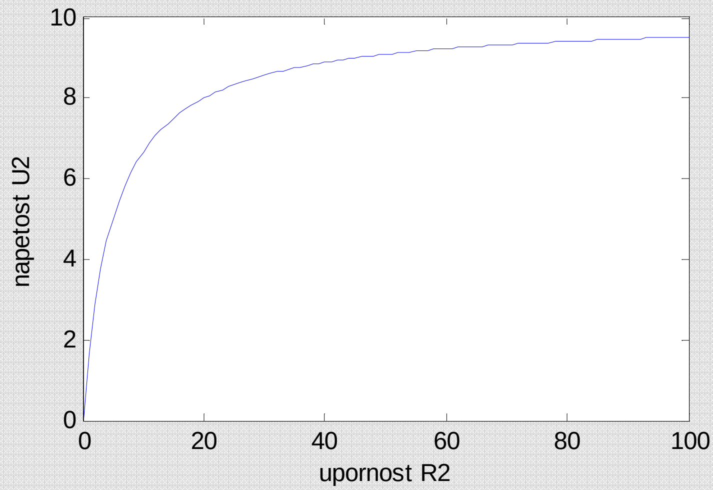
Primer: Vzemimo, da imamo podano breme z določeno zahtevano bremensko napetostjo in močjo: U_b/P_b = 9 V/ 30 W, ki ga želimo priključiti na napetost U = 12 V, pri čemer je R_2 = 10 Ω. Kolikšen mora biti R_1? Tok bremena bo 30 W / 9 V = 3,33 A, tok na uporu R_2 pa I_2 = 9 V/10 Ω = 0,9 A. Skupni tok je I_1 = 4,233 A. Zapišemo $12\,\text{V} = I_1 R_1 + 9\,\text{V}$ od koder sledi R_1 = 0,7087 Ω. Nekoliko bolj zapleteno je, če imamo določeno breme R_1 in želimo poiskati pravo vrednost R_2. Poiščite rešitev sami ali si jo preberite v ARS, Elektrotehnika 2.

Poleg matematične oblike je zelo pomembno, da si predstavljamo odvisnost napetosti na uporu od vrednosti uporov tudi grafično. Očitno napetost na uporu R_2 ni linearno odvisna od vrednosti upornosti R_2. Kako bi si lahko skicirali potek odvisnoti napetosti na R_2 od upornosti R_2? Tako, da poskušamo poenostaviti enačbo z razmislekom, kakšna bi bila oblika enačbe za zelo majhne R_2 in zelo velike R_2:

- pri R_2, ki so mnogo manjši od R_1 (matematično $R_2 \ll R_1$) bo R_2 zanemarljivo velik v primerjavi z R_1 in bo enačba približno enaka $U_2 \approx U \frac{R_2}{R_1}$. Pri majhnih vrednostih R_2 bo torej napetost na R_2 linearno odvisna od velikosti R_2.
- pri R_2, ki so mnogo večji od R_1 (matematično $R_2 \gg R_1$) bo R_1 zanemarljivo velik v primerjavi z R_2 in bo enačba približno enaka $U_2 \approx U \frac{R_2}{R_2} = U$. Pri velikih vrednostih R_2 bo torej vsa napetost generatorja na uporu R_2.

Pomagajmo si izrisati grafično odvisnost napetosti $U_2(R_2)$ z računalnikom. Programov, ki jih lahko v ta namen uporabimo je zelo veliko. Načeloma ni pomembno katerega uporabimo, sta pa se v (elektro)tehniki uveljavila predvsem dva profesionalna programa: Matlab in Matematica. Poglejmo si, kako bi uporabili program Matlab.
V ukazni vrstici programa vpišemo naslednje vrstice:

```
U=10 % izbrana napetost generatorja
R1=5 % izbrana upornost R1
R2=0:1:100 % tvorimo vrednosti uporov R2 od 0 po 1 do 100
U2=U*R2./(R1+R2) % enacba za izracun napetosti na R2 (deljenje z ./ )
plot(R2,U2) % ukaz za izris grafa U2(R2)
xlabel('upornost R2') % zapis osi X
ylabel('napetost U2') % zapis osi Y
```



SLIKA: Sprememba napetosti na bremenu v odvisnosti od upora R_2.

4. Tokovni delilnik.

Podobno kot napetostni delilnik, pogosta v elektrotehniki uporabljamo tudi **tokovni delilnik.**

SLIKA: Tokovni delilnik. Zanima nas tok skozi upor R_2.

Imamo dva vzporedno vezana upora s skupnim tokom I. Zanima nas tok skozi upor R_2: Velja: $I = I_1 + I_2$, kjer sta $I_1 = U/R_1$ in $I_2 = U/R_2$. Dobimo $I = U/R_1 + U/R_2 = U\left(1/R_1 + 1/R_2\right) = U\dfrac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2}$. Napetost je torej $U = I\dfrac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$, tok skozi upor R_2 pa $I_2 = U/R_2 = I\dfrac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot \dfrac{1}{R_2} = I\dfrac{R_1}{R_1 + R_2}$. Končni rezultat je podoben (vendar ne enak) kot pri napetostnem delilniku. Zaradi pogoste uporabe si ga tudi velja zapomniti. Zato ga ponovimo: $\boxed{I_2 = I\frac{R_1}{R_1+R_2}}$.

Samostojno delo: Izrišite potek vrednosti $I_2(R_2)$.

5. Napetostni delilnik s potenciometrom.

a) brez upoštevanja bremenske upornosti

Poznamo več različnih tipov potenciometrov, tu bomo obravnavali le linearne, take, katerih spremembo upornosti lahko zapišemo kot $R_x = \frac{x}{l}R$, kjer je R upornost potenciometra med skrajnima legama, l dolžina prevodne proge, x pa dolžinski del, katerega upornost je R_x (glej sliko). Če potenciometer priključimo na vir napetosti U_g, je napetost na uporu R_x enaka $U_x = IR_x = \frac{U_g}{R}R_x$. Z upoštevanjem zveze $R_x = \frac{x}{l}R$ pa dobimo

$U_x = \frac{U_g}{R}R_x = \frac{U_g}{R}\frac{x}{l}R = \frac{x}{l}U_g$.

Napetost na uporu R_x se linearno spreminja z lego drsnika.

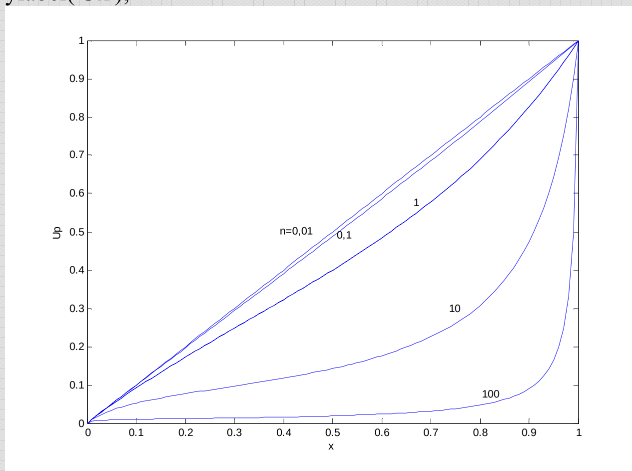
SLIKA: Priključen potenciometer in graf napetosti na drsniku linearnega potenciometra.

b) z upoštevanjem bremenske upornosti

Če upoštevamo še priključitev bremena na upor R_x, velja $\frac{U-U_x}{R_{l-x}} = \frac{U_x}{R_x} + \frac{U_x}{R_b}$. Po preureditvi dobimo (preverite še sami) $U_x = U\frac{x}{x(1-x/l)n+l}$, kjer je $n = R\ /R_b$.

Izrišimo nekaj krivulj vrednosti U_p za različna razmerja $n = R / R_b$. Vzemimo U = 1 in spreminjajmo x od 0 do 1 (l=1) in izrišimo vrednosti Ux za vrednosti n = 0,01, 0,1, 1, 10 in 100.
Matlabovi ukazi so

```
x=0:0.01:1;
for n=[0.01,0.1,1,10,100]  % zanka za 5 različnih vrednosti n
Ux=x./(1+x.*(1-x)*n)
plot(x,Ux)
hold on       % ohrani graf
end
xlabel('x');
ylabel('Ux');
```



SLIKA: Različne vrednosti U_x pri razmerjih n = 0,01, 0,1, 1, 10, 100. Večjo linearnost se doseže pri $n \ll 1$, torej tedaj, ko je bremenska upornost dosti večja od upornosti uporovnega delilnika.

WWW: Raziščite različne tipe potenciometrov, način izdelave in njihovo uporabo.

6. Mostično vezje.

SLIKA: Mostično vezje.

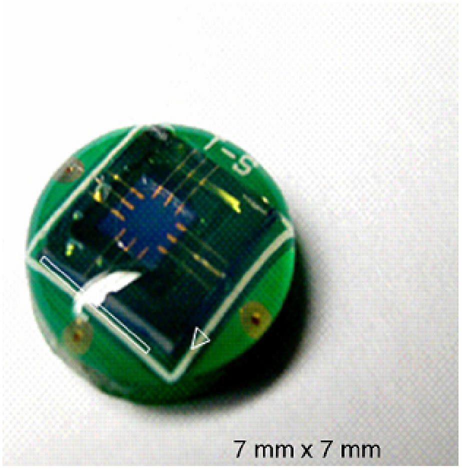
Eno zelo pogosto v praksi uporabljenih vezij je t.i. mostično vezje, ki ga pogosto imenujemo tudi **Wheatstonov** mostič. Zakaj most? Zato, ker premostimo dva napetostna delilnika in merimo napetost med upori. Zgradimo ga iz napetostnega delilnika z uporoma R_1 in R_2 ter delilnika z uporoma R_3 in R_4. Napetost na uporu R_2 je $U_2 = U\frac{R_2}{R_1+R_2}$, na R_4 pa $U_4 = U\frac{R_4}{R_3+R_4}$. Mostično napetost dobimo z uporabo 2 K.Z: $U_{\mathrm{most}} = U_2 - U_4 = U\frac{R_2}{R_1+R_2} - U\frac{R_4}{R_3+R_4} = U\left(\frac{R_2}{R_1+R_2} - \frac{R_4}{R_3+R_4}\right)$. Zanimiva situacija nastopi, ko je mostična napetost enaka nič. Tedaj rečemo, da je mostič *uravnotežen*, pri čemer mora veljati: $\frac{R_2}{R_1+R_2} = \frac{R_4}{R_3+R_4}$. Sledi $R_2\left(R_3+R_4\right) = R_4\left(R_1+R_2\right)$ oziroma $R_2R_3 = R_4R_1$, kar bolj pogosto zapišemo v obliki $\boxed{\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}}$.

Mostična vezja se v praksi zelo pogosto uporabljajo.Zelo pogosta uporaba mostiča je pri iskanju (merjenju) neznane upornosti, katero lahko zelo natančno določimo tako, da spreminjamo eno (ali več) vrednosti upora(ov) toliko časa, dokler ni napetost U_{most} enaka nič. Potem je upornost enostavno določljiva iz gornje enačbe, npr: $R_2 = R_1\frac{R_4}{R_3}$.

Wheastonovo mostično vezavo ne uporabljamo le v enosmernih razmerah pa tudi pri izmeničnih signalih. Poznamo različne tipe mostičev, npr. Wienov, Owenov, Maxwellov, itd.

WWW: Poiščite na spletu primere uporabe Wheatstoneovega mostiča.

http://www.crocodile-clips.com/absorb/AP5/sample/020202.html



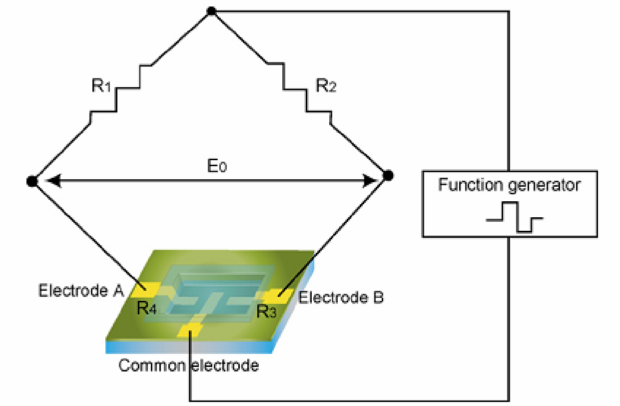
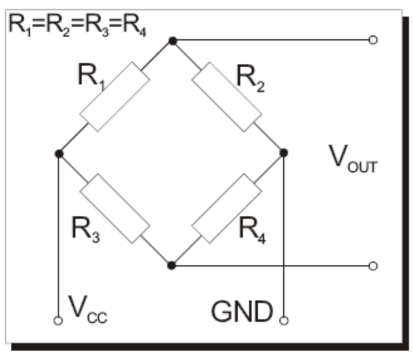
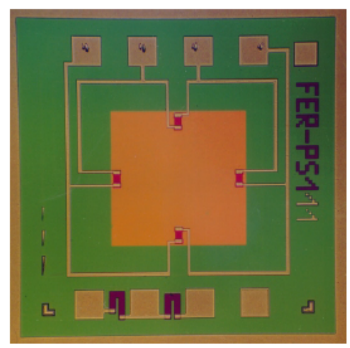


Fig. 10. The AC signal circuit to measure the output voltage of the fabricated tilt sensor.

SCHEMATIC DIAGRAM



SENSOR LAYOUT



SLIKA: Primer uporabe principa Wheatstonovega mostiča: Zgoraj mikromehansko izdelan senzor naklona. Vir: An optimized MEMS-based electrolytic tilt sensor. Jung et al.: Sensors and Actuators A139 (2007) stran 23–30. Spodaj: polprevodniški senzor tlaka. Vir: produkt Laboratorija za mikrosenzorske strukture in elektroniko na Fakulteti za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani.

7. Transformacija zvezda – trikot.

Pogosto se srečamo z vezavo uporov v obliko, ki ji rečemo trikot, saj so trije upori nameščeni v obliki trikotnika. Druga oblika vezave pa je taka, da so trije upori vezani v skupno spojišče – taki vezavi pravimo vezava v zvezdo. Pogosto si za lažjo analizo vezij pomagamo s transformacijo vezave trikot v zvezdo in obratno. Če imamo v vezavi zvezda tri spojišča z upori R_1, R_2 in R_3, potem ob transformaciji dobimo vezavo trikot z upori R_{12}, R_{23} in R_{32}, katerih vrednosti so

$$R_{12} = \frac{R^2}{R_3} \quad R_{23} = \frac{R^2}{R_1} \quad \text{in } R_{31} = \frac{R^2}{R_2},$$

pri čemer je $R^2 = R_1R_2 + R_2R_3 + R_3R_1$.

SLIKA: Transformacija vezja oblike zvezda v obliko trikot.

Zapišimo še obratno pot: če želimo iz vezave trikot preiti v vezavo zvezda, bomo upore določili iz

$R_1 = \dfrac{R_{12}R_{31}}{R_{12}+R_{23}+R_{31}}$, podobno pa tudi R_2 in R_3.*

Temperaturne lastnosti uporov.

Ko skozi upor teče tok, se nosilci naboja (v uporih običajno elektroni) ne gibljejo premočrtno od ene do druge sponke, pač pa »trkajo« z atomi v snovi. Kljub trkanju z atomi prevodnika pa se pod vplivom priključene napetosti (električnega polja) v povprečju gibljejo v eni smeri: elektroni v smeri pozitivne sponke. V tem smislu se gibljejo z neko povprečno hitrostjo (rečemo tudi hitrost drifta), ki pa je odvisna od temperature. Pri višji temperaturi je namreč nihanje atomov večje in s tem tudi število trkov, torej se povprečna hitrost nabojev zmanjša. S tem se tudi zmanjša tok, posredno pa se poveča električna upornost. Meritve pokažejo, da se temperaturna odvisnost upornosti spreminja skoraj linearno s temperaturo, kar lahko zapihttp://ed.fnal.gov/pdf/ertchr.pdfšemo v obliki

$R(T) = aT + b$,

kjer sta a in b konstanti, ki ju moramo določiti z meritvijo. Običajno nas zanima sprememba upornosti glede na temperaturo okolice (20 ^{0}C), kjer bo $R(T_{20}) = aT_{20} + b$. Če enačbi odštejemo, dobimo

$R(T) = R(T_{20})\left(1 + a\dfrac{T - T_{20}}{R(T_{20})}\right)$. Vpeljemo konstanto α, ki jo imenujemo temperaturni koeficient in pišemo

$\boxed{R(T) = R(T_{20})\left(1+\alpha\left(T - T_{20}\right)\right)}$.

SLIKA: Temperaturna odvisnost upornosti.

Tipične vrednosti temperaturnih koeficientov so (v K^{-1}):

Železo 0,006
Aluminij 0.0041
Baker 0,0039

---

* Poskusite sami izpeljati te enačbe. Pot je ta, da mora biti nadomestna upornost med dvema sponkama enaka v obeh vezavah. Veljati mora: $R_1 + R_3 = R_{12} \| \left(R_{31} + R_{23}\right)$, $R_2 + R_3 = R_{23} \| \left(R_{12} + R_{13}\right)$ in še ena zveza za $R_1 + R_2$, ki jo zapišite sami. Nato seštejte prvo in tretjo enačbo ter odštejte drugo in dobili boste enačbo za R_1.

Konstantan 0,00003

Vse zapisane vrednosti koeficientov so pozitivne, torej bo upornost železa, aluminija, bakra in konstantana večja pri višjih temperaturah. Okrajšava za pozitivni temperaturni koeficient je PTK, za negativnega pa NTK (ang. PTC in NTC).

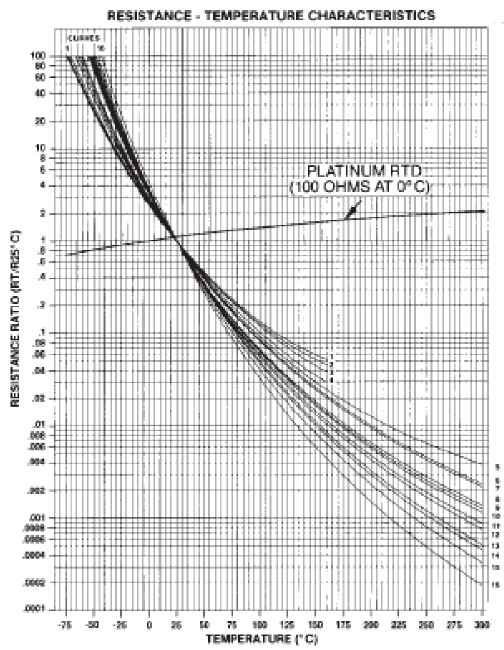
SLIKA: Pozitivni in negativni koeficient upora.

Primer: Kolikšna je upornost bakrene žice pri 80 ^{0}C, če je njena upornost pri upornost pri 20 ^{0}C enaka10 Ω.

Izračun:

$R(80^0\mathrm{C}) = 10\,\Omega\left(1{+}0{,}0039\ \mathrm{K}^{-1}\cdot 60\mathrm{K}\right) = 12{,}34\,\Omega$.

Obstaja vrsta elementov, katerim se upornost izrazito spreminja s temperaturo. Tem elementom pravimo termistorji (ang. thermistor = thermal resistor). Njihova uporaba v elektrotehniki je zelo pogosta, od merjenja temperature do kompenzacije temperaturnih lastnosti drugih elementov v vezju, regulacija amplitude, napetosti, alarm, ...



SLIKA: Upornost NTC termistorja se manjša z višanjem temperature. Za primerjavo je na sliki prikazana tudi odvisnost upornosti platine od temperature. Vir: katalog firme Murata.

Nelinearni elementi. Linearni element je samo poenostavitev, ki nam olajša analizo vezij. V osnovi so vsi elementi vsaj do določene mere nelinearni. Za upore navadno smatramo, da so linearni, čeprav poznamo tudi vrsto nelinearnih uporov. Najbolj znan nelinearni element je prav gotovo dioda. Dioda je običajno izdelana iz polprevodniškega materiala, ki omogoča prevajanje v eni smeri, v drugi pa ne. To povzroči izrazito nelinearno karakteristiko, ki jo v elektrotehniki s pridom uporabljamo. Bolj zapleteni so tranzistorji, ki so elementi z najmanj tremi kontakti od katerih je en običajno namenjen za kontrolo prevajanja toka med drugima kontaktoma.

Pogosto se uporablja grafičen način za določanje delovne točke tudi pri uporabi nelinearnih elementov. Če si zamislimo, da priključimo nelinearen element na sponki v vezju, lahko posebej narišemo karakteristiko vezja brez priključenega elementa in dodamo karakteristiko nelinearnega elementa. V presečišču je delovna točka. Pogosto rišemo grafično karakteristiko nelinearnega elementa za več parametrov, na primer pri bipolarnem tranzistorju za različne bazne toke, pri MOS tranzistorju za različne vrednosti napetosti vrat itd.

Kirchoffova zakona sta splošno veljavna, tudi za vezja z nelinearnimi elementi. Večji problem je pri izračunavanju, saj je sistem linearnih enačb dosti lažje rešiti od nelinearnega. Pri slednjem se moramo poslužiti numeričnih metod, pa še v tem primeru ni uspeh zagotovljen.

Merilni inštrumenti.
Poznamo vrsto merilnih inštrumentov, ki nam omogočajo meritve električnih veličin: voltmeter, ampermeter, ohmeter, vatmeter in drugi. Običajno so bili ti inštrumenti analogni in so bili zasnovani na osnovnih principih lastnosti električnega polja. Večinoma so uporabljali vrtljive tuljavice. Sodobni inštrumenti so večinoma digitalni, izdelani z uporabo elektronskih elementov. Največji problem merilnih inštrumentov je njihova omejena točnost merjenja, ki je pogosto določena s ceno naprave. Omejeno točnost naprav je potrebno upoštevati pri natančnejših meritvah. S problemi merjenja se ukvarja posebno področje elektrotehnike – metrologija.

WWW: Kako je označena točnost določenega inštrumenta? Kaj pomeni razred 1, ...?

Voltmeter. Voltmeter je inštrument za merjenje napetosti. Simbol je krog s črko V v sredini kroga. Idealni voltmeter bi bil tak, ki bi ga priključili med merilni sponki in se razmere v vezju ne bi spremenile. V resnici ima vsak voltmeter določeno notranjo upornost, ki je velika, ni pa neskončna. Zamislimo si, da merimo napetost odprtih sponk. S priključitvijo voltmetra bomo spremenili razmere v vezju, saj bo skozi voltmeter stekel določen tok, ki pri odprtih sponkah ne bi.

WWW: Poiščite informacije o prvih ampermetrih in voltmetrih. Poskušajte razumeti princip delovanja. Kolikšna je tipična notranja upornost voltmetra in ampermetra?

SLIKA: Voltmeter: priključitev, razlika med idealnim in realnim voltmetrom.

Razširitev merilnega območja voltmetra je mogoča z dodanim preduporom, ki ga vežemo **zaporedno** voltmetru. S tem izvedemo že omenjen napetostni delilnik.

Primer: Vzemimo, da voltmeter meri do 5 V (merilno območje), želimo pa meriti do 100 V, pri čemer je notranja upornost voltmetra 100 kΩ. Določimo predupor tako, da bo voltmeter kazal 5 V tedaj, ko bo na zaporedno vezavo voltmetra in predupora priključena napetost 100 V.

Izračun: $100\,\mathrm{V} = IR_\mathrm{p} + 5\,\mathrm{V}\,;\; I = \dfrac{5\ \mathrm{V}}{100\,\mathrm{k\Omega}} \;\Rightarrow\; R_\mathrm{p} = 1900\,\mathrm{k\Omega} = 1{,}9\,\mathrm{M\Omega}$.

SLIKA: Povečanje (razširitev) merilnega območja voltmetra.

Ampermeter. Ampermeter je inštrument za merjenje toka. Umestimo ga v vejo, v kateri želimo meriti tok. Simbol za ampermeter je krogec s črko A v sredini krogca. Tudi ampermeter ni idealen inštrument. V idealnih razmerah naj bi bila notranja upornost ampermetra čim manjša, torej taka, ki ne bi povzročila dodatnega padca napetosti na inštrumentu. V resnici ima neko malo notranjo upornost.

SLIKA: Ampermeter, priključitev

Prav tako kot voltmetru, lahko tudi ampermetru povečamo merilno območje, vendar sedaj tako, da upor vežemo vzporedno z ampermetrom , ki ga imenujemo tudi soupor ali kar po angleško »šant« (ang. shunt). S tem del toka, ki bi ga sicer meril ampermeter preusmerimo v vzporedno vejo.

Primer: Želimo meriti tok 30 A, pri čemer nam inštrument kaže največ 10 A. Notranja upornost ampermetra v tem merilnem območju je 0,2 Ω. Določimo upornost soupora.
Izračun: Ker ampermeter meri največ 10 A, moramo predvideti, da bi pri toku 30 A v vzporedni veji tekel tok 20 A. Napetost na ampermetru pri 10 A je 2 V, ta napetost mora biti tudi na souporu v vzporedni veji. Veljati mora torej $R_s = \frac{2\,\mathrm{V}}{20\,\mathrm{A}} = 0{,}1\ \Omega$.
Vprašanje: Kako realiziramo tako male vrednosti souporov?

SLIKA: Razširitev merilnega območja ampermetra s souporom.

Vatmeter je inštrument za merjenje moči. Ima dva para sponk. Z enim parom merimo napetost, z drugim pa tok. Simbol je krogec s črko W. Odčitek vatmetra bi bil ob upoštevanju neidealnosti vatmetra različen glede na priključitev sponk. Zakaj?

SLIKA: Priključitev vatmetra.

Ohmmeter. Je naprava za merjenje upornosti. V osnovi je inštrument, ki pri znani vzbujalni napetosti meri tok skozi breme in iz razmerja določi upornost bremena.

Univerzalni inštrument običajno vključuje tako ampermeter, voltmeter kot ohmeter, običajno pa je z njim mogoče meriti tudi kapacitivnosti, določene parametre nelinearnih elementov (tranzistorjev, diod), induktivnosti, pogosto pa tudi omogočajo priklop določenih senzorjev (temperature, svetilnosti), brezkontaktno merjenje toka (s tokovnimi kleščami) in tudi priklop na računalnik za sprotno odčitavanje in kasnejšo analizo podatkov.

Fizikalne veličine (količine), merske enote in pisanje enačb.
V (elektro)tehniki običajno govorimo o veličinah, fiziki pa raje uporabljajo termin količina. Veličina je recimo napetost, tok, čas, temperatura itd. Za vsako veličino uporabljamo določen simbol, običajno eno črko abecede, pogosto tudi grške. Simbol za napetost je U, za tok I, temperaturo T itd. Opazili ste že, da pišemo simbole za veličine poševno. To pa zato, da jih ločimo od merskih enot, kratko kar enot, ki jih pišemo pokončno. Kot primer zapišimo $U = 5\,\mathrm{V}$. Med številsko vrednostjo in enoto je presledek. Mersko enoto predstavimo z imenom in simbolom. Ime enote za napetost je volt, simbol pa V.

V svetu se je uveljavil sistem merskih enot, ki ga s kratico imenujemo SI. Obsega sedem osnovnih enot in vrsto izpeljanih. Osnovne enote so kilogram (kg), meter (m), sekunda (s), amper (A), kelvin (K), kandela (cd), mol (mol), radian (rad) in steradian (sr). Izpeljane enote pa so na primer m/s za hitrost itd.

Druge merske enote. Pogosto v literaturi zasledimo uporabo drugih merskih enot, kot smo jih navajeni. Pogosto so posledica uporabe drugega merskega sistema (npr. CGS –centimeter-gram-sekunda), kjer se na primer namesto enote tesla za gostoto magnetnega polja uporablja enota gauss. V konkretnem primeru je pretvorba direktna 1 T = 10^4 gaussa.

Označevanje: V elektrotehniki pogosto uporabljamo predpone k merskim enotam. To je potrebno zato, ker je red velikosti veličin zelo različen. Kapacitivnosti so pogosto reda mikro, nano ali piko faradov (μF, nF, pF), uporabljajo se napetosti se od mikro voltov do mega voltov itd. Zveze nam prikazuje preglednica:

vrednost	ime	predpona
10^{-12}	piko	p
10^{-9}	nano	n
10^{-6}	mikro	μ
10^{-3}	mili	m
10^{3}	kilo	k
10^{6}	mega	M
10^{9}	giga	G
10^{12}	tera	T

Vprašanja za obnovo:

1) Razložite Ohmov zakon. Kakšne so omejitve tega zakona?
2) Razložite idealni in realni napetostni vir matematično in grafično (I-U karakteristika).
3) Razložite idealni in realni tokovni vir matematično in grafično (I-U karakteristika).
4) Kaj je delovna točka, kako jo določimo?
5) 1. in 2. Kirchoffov zakon.
6) Tokovni in napetostni delilnik.
7) Zaporedna in vzporedna vezava uporov.
8) Voltmeter. Razširjanje merilnega območja s preduporom.
9) Ampermeter. Razširjanje merilnega območja s souporom.
10) Temperaturne lastnosti uporov.

WWW: V tekstu smo uporabili izraze coulomb, amper, volt, vat. Po komu se te enote imenujejo in kakšne zasluge imajo ti ljudje za razvoj elektrotehniške znanosti? Poskušajte najti tudi definicijo za vsako enoto.

WWW: Poiščite na internetu strani, ki uporabljajo napetostni ali tokovni delilnik v konkretni aplikaciji in opišite osnovni princip delovanja.

WWW: Kako je J.P. Joule prišel do svojih ugotovitev o toploti, ki je proporcionalna kvadratu toka?

Samostojno delo: Napišite program, ki bo zrisal karakteristiko vira in karakteristiko bremena. Izrišite več karakteristik bremena na isto sliko. Kako se spreminja delovna točka?

WWW: Preverite svoje znanje na spletu:
http://www.physics.uoguelph.ca/tutorials/ohm/Q.ohm.quizzes.html

Primeri kolokvijskih in izpitnih nalog

Izpit, 10. marec 2006 (naloga 5)
Izpit, 20. aprila 2005 (naloga 1)
Izpit, 28. 01. 2005 (naloga 4)