

2. Osnovna električna vezja in merilni inštrumenti

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

Z upoštevanjem obeh Kirchoffovih zakonov in zveze med napetostjo in tokom na uporih (Ohmovim zakonom) lahko analiziramo poljubno enosmerno vezje. Potrebno je pač zapisati zadostno število enačb za neznane toke v vejah vezja in rešiti sistem linearnih enačb. V kratkem si bomo podrobneje ogledali metode za reševanje (analizo) vezij, ki nam omogočajo sistematičen pristop k reševanju.

1. Zaporedna vezava uporov

Pogosto upore priključimo (vežemo) zaporedno. Če so priključeni na vir napetosti, se napetost porazdeli na posamezne upore: $U = U_1 + U_2 + \dots + U_N = \sum_{i=1}^N U_i$. Ker pa je skozi vse upore isti tok, velja $U = IR_1 + IR_2 + \dots + IR_N = I(R_1 + R_2 + \dots + R_N) = I \sum_{i=1}^N R_i = IR_{\text{nad}}$

Nadomestna upornost zaporedno vezanih uporov je seštevek posameznih upornosti:

$$R_{\text{nad}} = \sum_{i=1}^N R_i.$$

SLIKA: Zaporedna vezava uporov.

Primer: Določimo nadomestno upornost zaporedne vezave uporov 30Ω , 100Ω in $1 \text{ k}\Omega$.

Izračun: $R_{\text{nad}} = 1130 \Omega$.

2. Vzporedna vezava uporov

Upore vežemo vzporedno, ko želimo tok razdeliti v več vej. Celotni tok je vsota tokov posameznih vej: $I = I_1 + I_2 + \dots + I_N$. Če so upori priključeni na vir, je na vseh uporih enaka napetost. Velja $I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \dots + \frac{U}{R_N} = U \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i} = \frac{U}{R_{\text{nad}}}$. Vzporedno vezane upore lahko torej

nadomestimo z nadomestnim upornom, za katerega velja $\frac{1}{R_{\text{nad}}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i}$. Če to izrazimo s

prevodnostmi dobimo $G_{\text{nad}} = \sum_{i=1}^N G_i$.

Pri vzporedni vezavi uporov tvorimo torej nadomestno upornost s seštevanjem njihovih prevodnosti, pri zaporednih pa upornosti.

SLIKA: Vzoredna vezava uporov.

Primer: Določimo nadomestno upornost vzoredne vezave uporov $30\ \Omega$, $100\ \Omega$ in $1\ \text{k}\Omega$.

Izračun: $G_{\text{nad}} = 1/30\ \text{S} + 1/100\ \text{S} + 1/1000\ \text{S} = 0,044\ \text{S}$, kar ustreza $R_{\text{nad}} = 22,556\ \Omega$.

3. Napetostni delilnik

Napetostni delilnik realiziramo z zaporedno vezavo dveh ali več uporov priključenih na vir napetosti.

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

V skladu z 2. KZ 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:

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

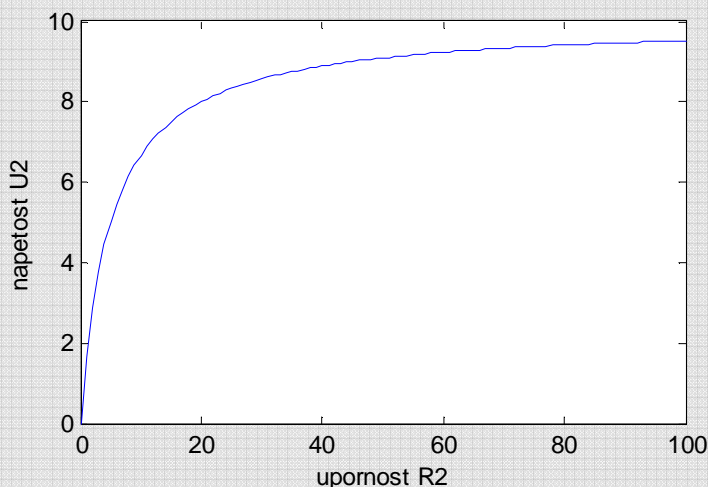
Poleg matematične oblike je zelo pomembno, da si predstavljamo odvisnost napetosti na uporu od vrednosti uporov tudi grafično. Očitno napetost na uporu R_2 ni linearno odvisna od vrednosti upornosti R_2 . Kako bi si lahko skicirali potek odvisnosti napetosti na R_2 od upornosti R_2 ? Tako, da poskušamo 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 Mathematica. 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

$I = U / R_1 + U / R_2 = U (1 / R_1 + 1 / R_2) = U \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2}$. Napetost je torej $U = I \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$, tok skozi

upor R_2 pa $I_2 = U / R_2 = I \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{R_2} = I \frac{R_1}{R_1 + R_2}$. Končni rezultat je podoben (vendar ne enak) kot pri napetostnem delilniku. Zaradi pogoste uporabe si ga tudi velja zapomniti. Zato

ga ponovimo: $I_2 = I \frac{R_1}{R_1 + R_2}$.

5. Napetostni delilnik s potenciometrom

a) brez upoštevanja bremenske upornosti

Poznamo več različnih tipov potenciometrov. Mi 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

$$U_x = IR_x = \frac{U_g}{R} R_x. \text{ Z upoštevanjem zveze } R_x = \frac{x}{l}R \text{ pa dobimo}$$

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

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

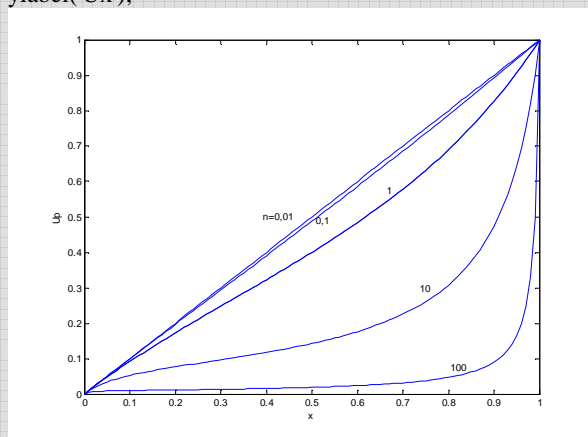
Če upoštevamo še priključitev bremena na upor R_x , velja

$$\frac{U - U_x}{R_{l-x}} = \frac{U_x}{R_x} + \frac{U_x}{R_b}. \text{ Po preureditvi dobimo (preverite še sami) } U_x = U \frac{x}{x(1-x/l)n+l}, \text{ kjer je}$$

$$n = R / R_b.$$

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 U_x 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.

6. Mostično vezje

SLIKA: Mostično vezje.

Eno v praksi zelo pogosto 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:

$U_{\text{most}} = U_2 - U_4 = U \frac{R_2}{R_1 + R_2} - U \frac{R_4}{R_3 + R_4} = U \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right)$. 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 $R_2(R_3 + R_4) = R_4(R_1 + R_2)$ oziroma $R_2R_3 = R_4R_1$, kar bolj

pogosto zapišemo v obliki $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$.

Mostična vezja se v praksi zelo pogosto uporabljajo. Zelo pogosta uporaba mostiča je pri iskanju (merjenju) neznanne 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: $R_2 = R_1 \frac{R_4}{R_3}$.

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

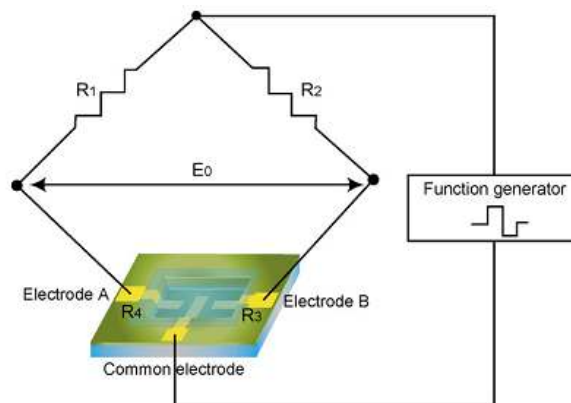
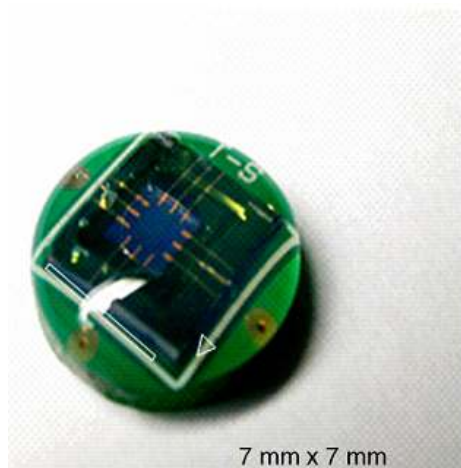
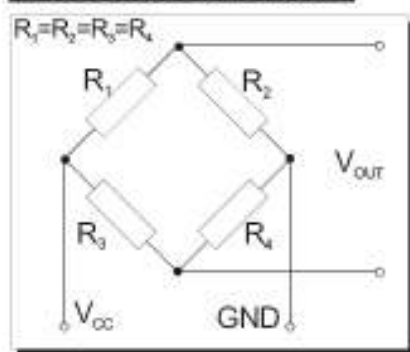
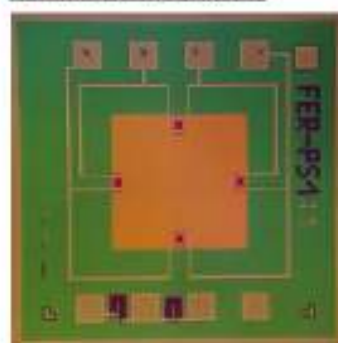


Fig. 10. The AC signal circuit to measure the output voltage of the fabricated tilt sensor.

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 pri analizi vezij zasledimo vezavo uporov v obliki, 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 s transformacijo dobimo vezavo trikot z upori R_{12} , R_{23} in R_{32} , katerih vrednosti so

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

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

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

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 zapišemo 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°C), kjer bo $R(T_{20}) = aT_{20} + b$. Če enačbi odštejemo, dobimo

* Poskusite sami izpeljati te enačbe. Pot je ta, da mora biti nadomestna upornost med dvema sponkama enaka v obeh vezavah. Npr. veljati mora: $R_1 + R_3 = R_{12} \parallel (R_{31} + R_{23})$, $R_2 + R_3 = R_{23} \parallel (R_{12} + R_{13})$ 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 .

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

$$R(T) = R(T_{20}) (1 + \alpha (T - T_{20}))$$

SLIKA: Temperaturna odvisnost upornosti.

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

Železo	0,006
Aluminij	0,0041
Baker	0,0039
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).

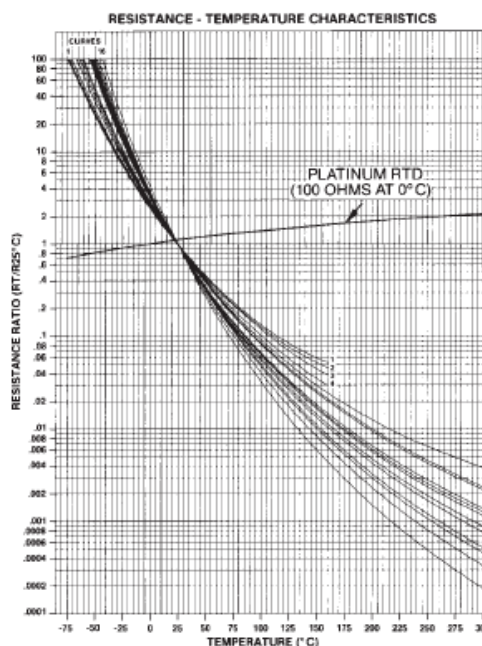
SLIKA: Pozitivni in negativni koeficient upora.

Primer: Kolikšna je upornost bakrene žice pri $80^{\circ}C$, če je njena upornost pri upornost pri $20^{\circ}C$ enaka 10Ω ?

Izračun:

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

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 ampliture, 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 tuljavnice. 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.

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.

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: $100\text{ V} = IR_p + 5\text{ V}; I = \frac{5\text{ V}}{100\text{ k}\Omega} \Rightarrow R_p = 1900\text{ k}\Omega = 1,9\text{ M}\Omega.$

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 kroga. 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 $R_s = \frac{2V}{20A} = 0,1 \Omega$.

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 vzbujaalni 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.

Vprašanja za obnovo:

- 1) Tokovni in napetostni delilnik.
- 2) Zaporedna in vzporedna vezava uporov.
- 3) Voltmeter. Razširjanje merilnega območja s preduporom.
- 4) Ampermeter. Razširjanje merilnega območja s souporom.
- 5) Temperaturne lastnosti uporov.

Za doma:

1. Odgovorite na vprašanja za obnovo
2. Rešite TEST2.htm
3. Rešite katero od kolokvijskih ali izpitnih nalog

**Za raziskovalce:**

1. 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?
2. Poiščite na internetu strani, ki uporabljajo napetostni ali tokovni delilnik ali mostično vezje v konkretni aplikaciji in opišite osnovni princip delovanja.
3. Preverite svoje znanje na spletu:
<http://www.physics.uoguelph.ca/tutorials/ohm/Q.ohm.quizzes.html>
4. Napišite program, ki bo zrisal karakteristiko vira in karakteristiko bremena. Izrišite več karakteristik bremena na isto sliko. Kako se spreminja delovna točka?
5. Raziščite različne tipe potenciometrov, način izdelave in njihovo uporabo.
6. Poiščite na spletu primere uporabe Wheatstoneovega mostiča.
<http://www.crocodile-clips.com/absorb/AP5/sample/020202.html>
7. Kako je označena točnost določenega inštrumenta? Kaj pomeni razred 1, ...?
8. Poiščite informacije o prvih ampermetrih in voltmetrih. Poskušajte razumeti princip delovanja. Kolikšna je tipična notranja upornost voltmetra in ampermetra?

Primeri kolokvijskih in izpitnih nalog

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