

3. Merjenje upornosti

3.1 Splošno o merjenju upornosti

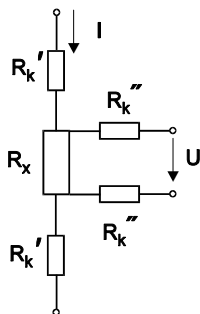
Ohmska upornost R je definirana kot recipročna vrednost ohmske prevodnosti G , ki je snovno geometrijska lastnost vodnika po katerem teče tok. Enota ohmske upornosti 1Ω ($\text{ohm} = \text{V/A}$) je upornost, ki jo ima ohmski upor, skozi katerega napetost 1V požene tok 1A . Upornost idealnega upora je torej razmerje trenutne napetosti in trenutnega toka. Realni upori vsebujejo še kapacitivnost in induktivnost in je zato upornost odvisna od oblike toka in napetosti. Zaradi upornosti se električna energija pretvarja v toplotno energijo. Količina toplotne energije je odvisna od oblike toka. Na upornost vplivajo tudi ostali pojavi, kot so odvisnost upornosti od

- specifične upornosti materiala,
- geometrijskih lastnosti,
- temperature (termistor),
- napetosti (varistor),
- osvetljenosti (fotoupor),
- frekvence (kožni pojav) in
- polarizacije elektrod (elektroliti).

Na te pojave moramo biti pozorni pri izbiri metode in izvedbe meritve upornosti. Meritve upornosti izvajamo z enosmernim ali izmeničnim tokom praviloma sinusne oblike. Realne upore nadomestimo z nadomestnimi vezji, z vzporedno vezavo ali zaporedno vezavo idealnih elementov (Tabela 3.1). Ohmsko upornost merimo z meritvijo delovne komponente napetosti (ali toka), oziroma z merjenjem delovne moči in napetosti (toka), odvisno od zaporedne ali vzporedne nadomestne vezave.

3.2 Upornost priključnih vodnikov in stične upornosti

Pri merjenju malih upornosti moramo upoštevati upornost priključnih vodnikov in stične upornosti. Ločimo tokovne in napetostne priključne sponke. Slika 3.1 prikazuje nadomestne upornosti vodnikov in stičnih mest.



Slika 3.1: Upoštevanje upornosti vodnikov in stičnih mest.

Voltmeter je vezan na stične površine neznanega upora in ne meri padca napetosti zaradi upornosti priključnih vodov tokovne zanke R'_k . Stične upornosti napetostnih sponk R''_k so zanemarljive proti notranji upornosti voltmetra.

	Nadomestno vezje	Kazalčni diagram	Ohmska upornost, izgubni faktor $\text{tg}\delta$ in faktor kvalitete Q
a.			$R_s = \frac{U \cdot \cos \varphi}{I} = \frac{P}{I^2}$ $L_s = \frac{U \cdot \sin \varphi}{\omega \cdot I} = \frac{\sqrt{(U \cdot I)^2 - P^2}}{\omega \cdot I^2}$ $Q = \frac{\omega \cdot L_s}{R_s} = \frac{1}{\text{tg}\delta}$
b.			$R_s = \frac{U \cdot \cos \varphi}{I} = \frac{P}{I^2}$ $C_s = \frac{I}{\omega \cdot U \cdot \sin \varphi} = \frac{I^2}{\omega \cdot \sqrt{(U \cdot I)^2 - P^2}}$ $\text{tg}\delta = \omega \cdot R_s \cdot C_s$
c.			$R_p = \frac{U}{I \cdot \cos \varphi} = \frac{U^2}{P}$ $L_p = \frac{U}{\omega \cdot I \cdot \sin \varphi} = \frac{U^2}{\omega \cdot \sqrt{(U \cdot I)^2 - P^2}}$ $Q = \frac{R_p}{\omega \cdot L_p} = \frac{1}{\text{tg}\delta}$
d.			$R_p = \frac{U}{I \cdot \cos \varphi} = \frac{U^2}{P}$ $C_p = \frac{I \cdot \sin \varphi}{\omega \cdot U} = \frac{\sqrt{(U \cdot I)^2 - P^2}}{\omega \cdot U^2}$ $\text{tg}\delta = \frac{1}{\omega \cdot R_p \cdot C_p}$

Tabela 3.1: Nadomestna vezja realnega upora. Zaporedna vezava idealnih elementov (a in b) in vzporedna vezava idealnih elementov (c in d).

3.3 Merjenje notranje upornosti aktivnih dvopolov

Pri aktivnih dvopolih (primer: baterija) notranjo upornost definiramo kot razmerje med spremembo napetosti na sponkah in ustrezno spremembo toka.

$$R_n = \frac{\Delta U}{\Delta I} \tag{3.1}$$

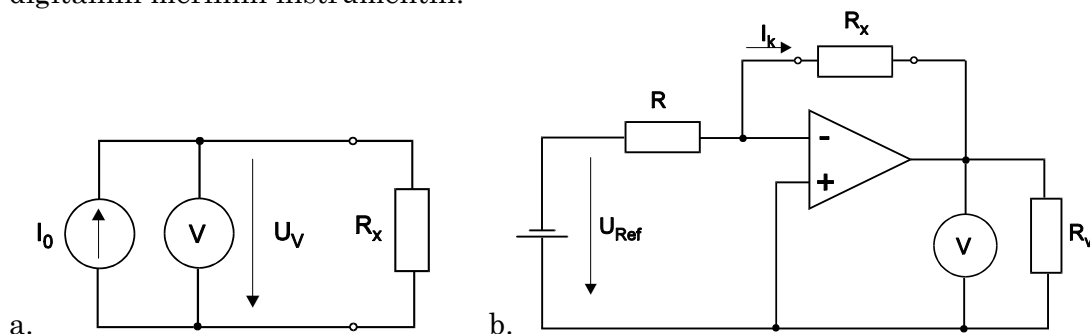
Notranja upornost je lahko konstantna ali pa se spreminja z obremenitvijo aktivnega dvopola. V tem drugem primeru moramo izmeriti odvisnost napetosti od toka in narisati njeno karakteristiko.

3.4 Merilne metode za merjenje upornosti.

Obstaja veliko metod merjenja upornosti. Izbira metode je odvisna od dosegljive instrumentacije, velikosti upornosti in merilnega pogreška posameznih metod.

3.4.1 Merjenje upornosti z voltmetrom in tokovnim virom

Slika 3.2 prikazuje princip in izvedbo ohmmeta s tokovnim virom, ki se uporablja v digitalnih merilnih instrumentih.



Slika 3.2: Merjenje upornosti s tokovnim virom (a) in izvedba z op. ojač. (b)

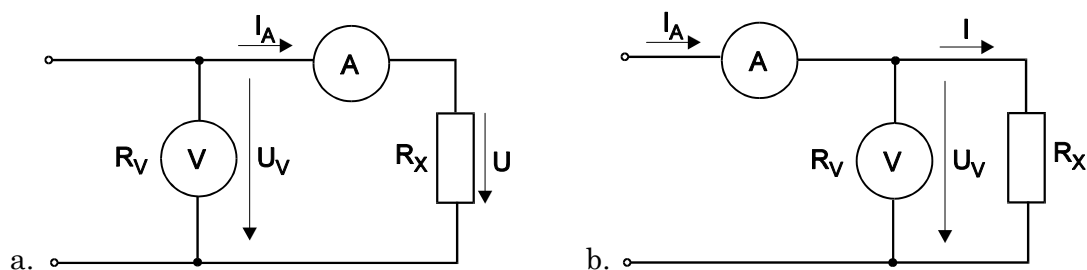
Ob upoštevanju $R_v \gg R_x$ in konstantnem toku I_0 , je U_V sorazmerna R_x .

$$U_V = I_0 \cdot \frac{R_x \cdot R_v}{R_x + R_v} = I_0 \cdot R_x \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_x}{R_v}} \approx I_0 \cdot R_x \quad (3.2)$$

Merilna območja takšnega ohmmeta izbiramo z izbiro velikosti konstantnega toka, saj je merilno območje V-metra običajno konstantno.

3.4.2 U-I metoda merjenja upornosti

Upornost merimo s posredno meritvijo toka in napetosti. Položaj instrumentov v vezju (Slika 3.3) je odvisen od velikosti merjene upornosti.



Slika 3.3: U-I metoda merjenja upornosti

Slika 3.3.a predstavlja vezavo za merjenje velikih upornosti, iz katere dobimo:

$$R = \frac{U_V}{I_A} = \frac{U + I_A \cdot R_A}{I_A} = R_x + R_A \quad \text{in je sistematski pogrešek:} \quad (3.3)$$

$$e = \frac{R - R_x}{R_x} = \frac{\frac{U_V}{I_A} - R_x}{R_x} = \frac{R_A}{R_x} \quad (3.4)$$

Pri merjenju večjih upornosti je sistematski pogrešek manjši. Točnost metode je

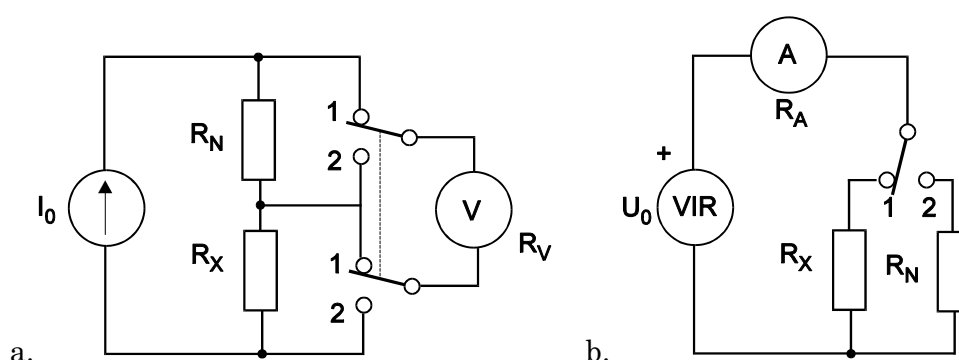
odvisna od točnosti ampermetra in voltmetra. Pri velikih upornostih je problematično merjenje malih tokov. Slika 3.3.b predstavlja vezavo, ki je primerna za merjenje malih upornosti, kar je razvidno iz enačb:

$$R = \frac{U_V}{I_A} = \frac{U_V}{U_V} \cdot \frac{R_x \cdot R_V}{R_x + R_V} = \frac{R_x \cdot R_V}{R_x + R_V} \quad \text{in} \quad e = \frac{R - R_x}{R_x} = \frac{\frac{U_V}{I_A} - R_x}{R_x} = -\frac{R_x}{R_x + R_V} \quad (3.5)$$

Padeč napetosti sicer lahko povečamo z večanjem toka, vendar ne smemo prekoračiti dovoljene obremenitve upora.

$$P = I^2 \cdot R_x = \frac{U^2}{R_x} \quad (3.6)$$

3.4.3 Primerjalni metodi merjenja upornosti



Slika 3.4: Napetostna (a) in tokovna (b) primerjalna metoda.

Ko je pri napetostni primerjalni metodi (Slika 3.4.a) stikalo v položaju 1, merimo z voltmetrom napetost na vzporedni vezavi R_N in notranje upornosti voltmetra R_V :

$$U_N = I_0 \cdot \frac{R_N \cdot R_V}{R_N + R_V} \quad (3.7)$$

in padeč napetosti na vzporedni vezavi upornosti R_x in upornosti voltmetra R_V :

$$U_x = I_0 \cdot \frac{R_x \cdot R_V}{R_x + R_V}, \quad (3.8)$$

ko je stikalo v položaju 2. Iz enačb izračunamo neznanu upornost R_x :

$$R_x = \frac{R_V}{R_N \cdot \left(1 - \frac{U_x}{U_N}\right) + R_V} \cdot R_N \cdot \frac{U_x}{U_N} \cong R_N \cdot \frac{U_x}{U_N} \quad (3.9)$$

Enačba se poenostavi, če predvidimo zelo veliko notranjo upornost voltmetra. Pri tem smo napravili sistematski pogrešek velikosti

$$e = \frac{R_N - R_x}{R_x + R_V}, \quad (3.10)$$

ki ga lahko zmanjšamo z večanjem notranje upornosti voltmetra R_V ali pa z izbiro znanega upora R_N , ki naj bo približno enak neznanu upornosti R_x .

Podobna izvajanja veljajo za tokovno primerjalno metodo (Slika 3.4.b) in dobimo:

$$R_x = (R_N + R_A) \cdot \frac{I_N}{I_x} - R_A \cong R_N \cdot \frac{I_N}{I_x} . \quad (3.11)$$

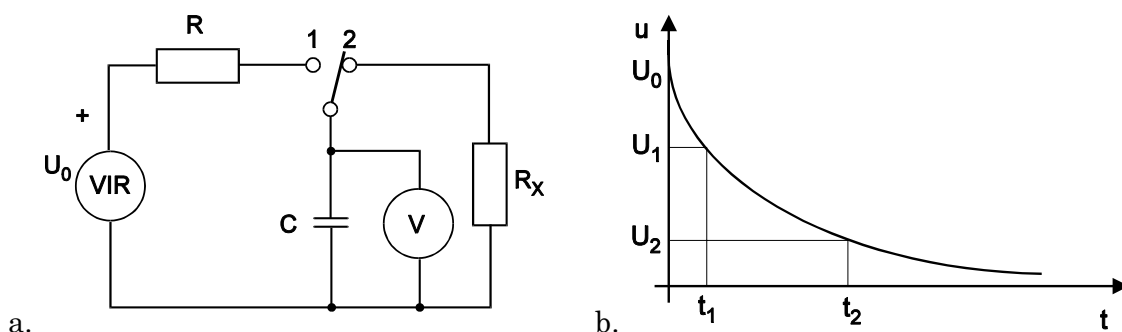
Pri računanju s poenostavljeno enačbo, kjer zanemarimo notranjo upornost ampermetra, smo napravili sistematski pogrešek:

$$e = \frac{R_A}{R_x} \cdot \frac{R_N - R_x}{R_N - R_A} . \quad (3.12)$$

Iz enačbe se vidi, da sistematski pogrešek zmanjšamo z izbiro znane upornosti R_N .

3.4.4 Merjenje velikih upornosti

Zelo velike upornosti merimo po metodi praznjenja kondenzatorja. Slika 3.5 prikazuje vezavo (a) in časovni potek praznjenja (b).



Slika 3.5: Metoda praznjenja kondenzatorja

V položaju 1 se kondenzator nabije na začetno napetost U_0 in se po preklopu stikala v položaj 2 prazni preko neznanega upora. V času t_1 je na njem napetost:

$$U_1 = U_0 \cdot e^{-\frac{t_1}{R_x C}} \quad \text{v času } t_2 \text{ pa napetost: } \quad U_2 = U_0 \cdot e^{-\frac{t_2}{R_x C}} \quad (3.13)$$

Iz enačb (3.13) izračunamo neznanu upornost:

$$R_x = \frac{t_2 - t_1}{C \cdot \ln \frac{U_1}{U_2}} \quad (3.14)$$

Pri tem nismo upoštevali izolacijske upornosti kondenzatorja in upornosti voltmetra. Ta problem rešimo z izvedbo dveh meritev. V prvi praznimo kondenzator samo čez vzporedno vezavo notranje upornosti voltmetra in izolacijske upornosti kondenzatorja $R_1 = R_i || R_V$, v drugi pa čez vzporedno vezavo voltmetra, izolacijske upornosti kondenzatorja in neznanega upora $R_2 = R_1 || R_x$. Neznano upornost dobimo po enačbi:

$$R_x = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 - R_2} \quad (3.15)$$

Mostične metode, predvsem Wheatstonov in Thomsonov ter izmenične merilne mostiče, bomo spoznali v poglavju *Merilni mostiči*.