

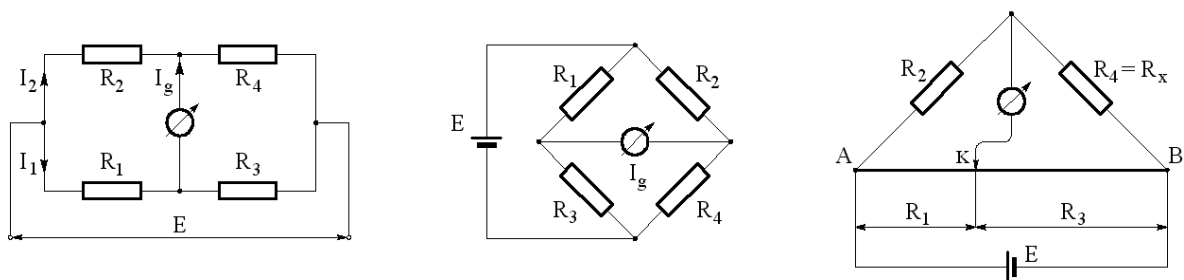
## Vježba M-10: ISTOSMJERNI MJERNI MOST

### 1. Svrha vježbe

Mjerenje Wheatstoneovim istosmjernim mostom. Upoznavanje s primjenom Wheatstoneovog mosta, a posebice s uporabom neuravnoteženog mosta kao spoja mjernog pretvornika s otporničkim osjetilom temperature i osjetilom napreznja.

### 2. Teorijska osnova

Wheatstoneov most klasičan je i dobro poznat mjerni spoj. Sastoji se od dva usporedno vezana razdjelnika napajana iz istosmjernog izvora i premoštena s nulindikatorom - mjernim instrumentom koji u sredini mjernog područja ima ništicu.



Slika 1 Uobičajeni načini prikazivanja Wheatstoneovog mosta

Kad je vrijednost otpornika razdjelnika takva da vrijedi:

$$I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_2 \quad \text{i} \quad I_1 \cdot R_3 = I_2 \cdot R_4$$

nulinstrument pokazuje ništicu,  $I_g = 0$ , kažemo da je most u ravnoteži. Tada vrijedi i jednačba koja pokazuje odnos vrijednosti otpornika u mostu:

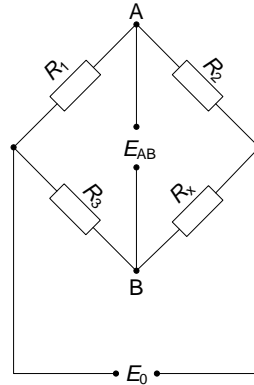
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

i mogućnost primjene uravnoteženog mosta pri mjerenju. Poznajemo li vrijednosti triju otpornika, možemo odrediti vrijednost četvrtog nepoznatog, npr.  $R_4 \equiv R_x$

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

Izraz je umnožak omjera  $R_2/R_1$  i otpora  $R_3$ , pa zaključujemo da je mjerenje mostom moguće poznaje li se vrijednost jednog otpornika i omjer vrijednosti drugih dvaju otpornika, K. Uravnoteženi mjerni mostovi služe za mjerenje otpora u području od  $10^{-3}$  do  $10^3 \Omega$ .

U spojevima mjernih pretvornika upotrebljavaju se neuravnoteženi mjerni mostovi, u kojima se pri mjerenju iskorištava zavisnost razlike potencijala,  $E_{AB}$ , od vrijednosti nepoznatog otpornika.



**Slika 2** Prikaz razlike potencijala Wheatstoneovog mosta

Razliku potencijala na mjernom mostu,  $E_{AB}$ , shodno slici 2, možemo odrediti na osnovi sljedećeg izračuna. Kroz otpornike  $R_1$  i  $R_2$  teče ista struja, stoga se može napisati:

$$\frac{E_0}{R_1 + R_2} = \frac{E_A}{R_2}$$

Isto tako vrijedi i za drugu granu:

$$\frac{E_0}{R_3 + R_X} = \frac{E_B}{R_X}$$

Vrijednost  $E_0 = 4 \text{ V}$ , dok vrijednosti poznatih otpornika su  $R_1 = R_2 = R_3 = 91,4 \Omega$ . Iz ovih izraza možemo dobiti razliku potencijala na mjernom mostu,  $E_{AB}$ :

$$E_{AB} = E_A - E_B = E_0 \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_X}{R_3 + R_X} \right)$$

## Mjerenje temperature

Nepoznati otpornik može biti bilo koje otporničko osjetilo (npr. osjetilo temperature, sile ili fotoosjetilo). Ako je to otporničko osjetilo temperature kojem otpor  $R_x$  zavisi o temperaturi:

$$R_x = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta)$$

pri čemu je  $R_0 = 100 \Omega$ , otpor otporničkog osjetila pri temperaturi  $\vartheta_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ , a  $\Delta\vartheta = \vartheta_m - \vartheta_0$ ;  $\vartheta_m$  je mjerena temperatura, a koeficijent  $\alpha$  je temperaturni koeficijenti električnog otpora metala.

Vrijednosti temperaturnih koeficijenata za Pt-100 propisane su normama. Tako je, prema normi IEC 60751,  $\alpha = 0.003925 \Omega/(\Omega^\circ\text{C})$ .

## Mjerenje sile

Naprezanje je uzrokovano unutarnjom silom koju stvara tijelo kao reakciju na primijenjenu vanjsku silu. Ako na tijelo djeluje vanjska sila, kao reakcija javlja se unutarnja sila koja želi održati izvorni oblik. Ova sila odbijanja (engl. *repelling force*) naziva se interna sila, a interna sila podijeljena s poprečnom površinom naziva se naprezanje (engl. *stress*), u jedinicama Pa ili  $\text{N/m}^2$  koju možemo definirati na slijedeći način:

$$\Omega = F / A$$

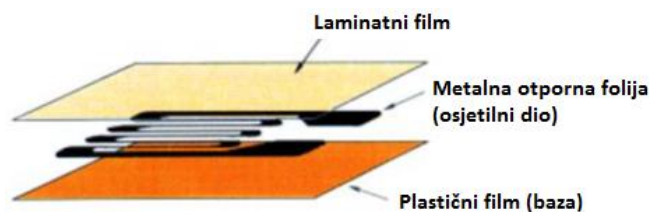
$A$  - poprečni presjek,  $\text{m}^2$

$F$  - vanjska sila koja je jednaka unutarnjoj, N

Kod većine materijala postoji proporcionalan odnos između naprezanja i deformacije sve dok se ne prekorači granica elastičnosti. Granica naprezanja u kojoj vrijedi linearni odnos između naprezanja i deformacije naziva se proporcionalna granica i karakteristična je za svaki materijal. Ova zakonitost poznata je kao Hookov zakon elastičnosti (engl. *law of elasticity*).

*Mjerni pretvornik naprezanja (tenzometar)*

Mjerni pretvornik koji pretvara mehanički pomak u promjenu otpora zapravo je osjetilo naprezanje izvedeno u obliku tankog listića koji se pričvrstiti na površinu, slika 3.



**Slika 3** - Struktura pretvornika naprezanja

Mjerilo naprezanje koje u praksi susrećemo najčešće ima slijedeću strukturu: osjetilni element kojeg čine tanke metalne otporničke folije mrežne strukture (3 do 6  $\mu\text{m}$ ) stavlja se na bazu od tankog plastičnog filma (15 do 16  $\mu\text{m}$ ), a sve se laminira. Mjerno načelo možemo izraziti formulom:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon$$

$R$  – početni otpor tenzometarske trake,  $\Omega$

$\Delta R$  – promjena otpora zbog elongacije ili kontrakcije,  $\Omega$

$K$  – konstanta proporcionalnosti (engl. *gage factor*)

$\varepsilon$  - naprezanje (engl. *strain*)

Male promjene otpora mjere se pomoću posebnih pojačala primjenom Wheatstoneovog mosta. Kad osjetilo registrira naprezanje ono uzrokuje promjenu otpora,  $\Delta R$ , a most daje odgovarajući napon,  $E_{dv}$  (napon na digitalnom voltmetru).

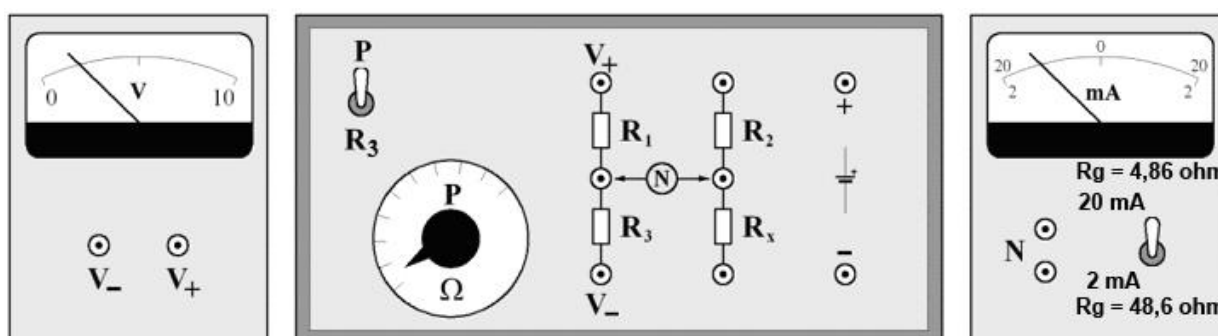
$$E_{dv} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot E_{nap}$$

$$E_{dv} = \frac{1}{4} \cdot K \cdot \varepsilon \cdot E_{nap}$$

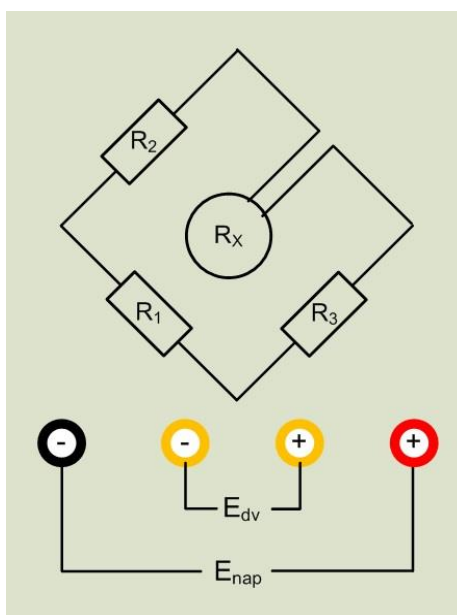
pri čemu je  $E_{nap}$  ulazni napon, tj. napon napajanja ( $E_{nap} = 6\text{V}$ ).

## OPIS VJEŽBE I MJERENJA

Vježba obuhvaća rad s uravnoteženim i neuravnoteženim Wheatstoneovim mostom upotrebom različitih otpornika, otporničkog osjetila temperature i sile. Nakon što su svladana ova načela mjerenja za mjerenje su na raspolaganju komercijalni Wheatstonov most i univerzalni digitalni multi-instrument kakvim se danas gotovo isključivo mjeri u laboratorijima i industriji. Na raspolaganju su različiti otpornici, otpornička osjetila temperature i sile. Jednostavan mosni spoj izveden je na prikladno konstruiranoj ploči kako bi se omogućilo samostalno sklapanje mjernih spojeva. Spojne ploče prikazane su slikama 4 i 5.



Slika 4 Panel s mjernim instrumentima



Slika 5 Mjerna ploča s osjetilom sile

Mjerne ploče sastoje se od istosmjernog Wheatstoneovog mosta, mjernog osjetila temperature ili sile te nulinstrumenta/voltmetra, a most se napaja iz izvora stabiliziranog napona od 6V. Pri mjerenju potrebno je bilježiti zavisnost *izlaza* pretvornika (struje ili napona) na nulinstrumentu ili voltmetru. Asistent će dati upute i o upotrebi pojedinih osjetila i načinu postupanja pri pokusima.

## POKUSI

- Sastavite Wheatstoneov istosmjerni most te uz pomoć otpornika poznatih vrijednosti uravnotežite mosti i provjerite računom podudarnost s teorijskim uvjetima (*otporom dobivenim upotrebom ohm-metra*).
- Zamijenite otpornik  $R_x$  otporničkim osjetilom temperature Pt-100. Odredite zavisnost napona  $E_g = f(\mathcal{G})$ , pri čemu je  $\mathcal{G}$  mjerena temperatura očitana na staklenom termometru.
- Sastavite Wheatstoneov istosmjerni most prema slici 4. Odredite zavisnost napona  $E_{dv} = f(m)$ , pri čemu je  $m$  masa utega proporcionalna tlačnoj sili koja djeluje na površinu osjetila sile. Također, odredite histerezu i standardnu devijaciju mjernog pretvornika.

## OBRADA REZULTATA I IZVJEŠTAJ

Zapišite redom rezultate mjerenja i zapažanja. Grafički prikazite zavisnosti i usporedite ih s teorijskim.

## LITERATURA:

- N. Bolf, Mjerenje razine - predavanja iz kolegija *Mjerenja i vođenje procesa*, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, 2021.
- J. Božičević, Temelji automatike 2, Školska knjiga, Zagreb 1992.

## Vježba M-10: ISTOSMJERNI MJERNI MOST REZULTATI

### POKUSI

- a) Sastavite Wheatstoneov istosmjerni mjerni most te odredite vrijednost otpora,  $R_{x(\text{exp})}$ , niza od pet otpornika. Digitalnim mjerilom otpora (*ohm-metrom*) odredite  $R_{x(\text{teor})}$ , te izračunajte postotnu mjernu pogrešku:

$$\delta\% = \frac{R_{x(\text{exp})} - R_{x(\text{teor})}}{R_{x(\text{teor})}} \cdot 100$$

**Tablica 1** *Uravnoteženi mjerni most*

	1	2	3	4	5
$R_{x(\text{exp})}/\Omega$					
$R_{x(\text{teor})}/\Omega$					
$\delta\%$					

- b) Za otporničko osjetilo Pt100 grafički odredite zavisnost eksperimentalne ( $E_{g(\text{exp})}$ ) i teorijske vrijednosti napona ( $E_{g(\text{teor})}$ ) o temperaturi kupke ( $\mathcal{G}$ ), pri čemu se temperatura kupke očitava na staklenom termometru. Mjerenu vrijednost napona grafički usporedite sa teorijskom vrijednošću napona.

**Tablica 2** *Umjeravanje otporničkog osjetila Pt100*

$\mathcal{G}/^{\circ}\text{C}$	25	35	45	55	65
$E_{g(\text{exp})}/\text{mV}$					
$R_{x(\text{teor})}/\Omega$					
$E_{g(\text{teor})}/\text{mV}$					
$\delta\%$					

- c) Umjerite pretvornik sile, tj. za otporničko osjetilo tlaka grafički odredite zavisnost eksperimentalne srednje vrijednosti napona ( $\bar{E}_{dv}$ ) o masi utega ( $m$ ). Rezultate tri uzastopna umjeravanja svrstajte u tablicu, prikažite grafički i odredite statičku karakteristiku i histerezu mjernih pretvornika. Rezultate mjerenja svedite na puni mjerni opseg (% PMO i %PO izlaza) te izračunajte koeficijente  $a$  i  $b$  regresijskog pravca  $y = ax+b$ . Izračunajte standardnu devijaciju pojedinog mjernog rezultata.

**Tablica 3** Umjeravanje otporničkog osjetila sile

Broj utega	$m / g$	$E_{dv\_1} / V$	$E_{dv\_2} / V$	$E_{dv\_3} / V$	$\bar{E}_{dv} / V$
0+1					
1+2					
1+2+3					
1+2+3+4					
1+2+3+4+5					
1+2+3+4+5					
1+2+3+4					
1+2+3					
1+2					
0+1					