

7. ELEKTRIČNA MJERENJA

7.1 Opšte o mjerenju

Mjerenja imaju značajnu ulogu u razvoju ljudskog društva uopšte, a u razvoju nauke i tehnike posebno. U elektrotehničkoj nauci i njenoj primjeni, električna mjerenja zauzimaju veoma važno mjesto. Električna mjerenja pomažu da se tačno i pravilno shvate zakonitosti elektriciteta i njegove primjene. U inženjerskoj praksi, mjerenjem se utvrđuju svojstva elektrotehničkog materijala, provjerava kvalitet izrađenih proizvoda, provjerava ispravnost električnih instalacija, mjerenjem se dobija informacija o ispravnosti i sigurnosti uređaja, kao i o ekonomičnosti njegovog rada.

Po svojoj suštini mjerenje je poređenje *količine* jedne veličine sa drugom količinom iste veličine. Pod *veličinom* podrazumijevamo objektivnu prirodnu pojavu kao što je: dužina, masa, sila, električni napon itd. Svaka veličina, koja je definisana matematički formulisanim zakonom, ima dvije bitne karakteristike: *osobinu* ili *kvalitet* i *količinu* ili *kvantitet*. Kvalitet je obilježje neke veličine, po kome se ona suštinski, po svojoj prirodi, razlikuje od drugih veličina. Kvalitet se još naziva i *dimenzija* neke veličine. Apsurd je porediti kvalitete. Ne može se uzimati odnos dva različita kvaliteta - dimenzije. Kvantitet je druga osobina veličine, i na osnovu ovog obilježja možemo međusobno da poredimo dvije ili više pojava iste prirode.

U mjerenjima greška se ne može izbjeći. Rezultati koje dobijamo nisu nikada apsolutno tačni, već samo manje ili više približni. Njihova tačnost zavisi od više faktora, a uglavnom od znanja i vještine lica koje mjerenje vrši, od preciznosti korišćenih mjernih instrumenata i tačnosti primjenjene mjerne metode. Ako se ne može dati apsolutno tačan rezultat, uvijek se mogu odrediti granice u kojim se nalazi tačna vrijednost. Inače, mjerenje nema punu vrijednost i nije potpuno, ako se, pored rezultata, ne odredi, u apsolutnom iznosu, i viša granica greške.

Klasifikacija metoda mjerenja vrši se na osnovu toga *šta* se poredi i *kako* se poredi. Ako se mjerenjem poredi dvije količine *iste* prirode, tada kažemo da se mjerenje obavlja *direktnom metodom*; na primjer mjerenje mase pomoću vage sa polugom. Ako se, na osnovu poznatih relacija, mjerenjem poredi količine različitih veličina, tada se mjerenje vrši *indirektnom metodom*; na primjer, mjerenje otpornosti na osnovu izmjernog napona i struje.

Prema načinu kako se poredi količine, postoje takođe dvije osnovne metode:

- *metoda skretanja* ili metoda neposrednog ocjenjivanja i
- *metoda ravnoteže* ili nulta metoda.

Metoda skretanja sastoji se u tome da se poredi skretanje kazaljke, koje ostvari izvjesna količina mjerene veličine i skretanje, koje izaziva jedinica količine te veličine, na određenom mjernom instrumentu.

Ravnotežne metode sastoje se u tome, što se mjerenje količine neke veličine obavlja pomoću mjernog instrumenta, putem upoređenja sa određenom količinom iste veličine (direktna metoda) ili neke druge veličine (indirektna metoda). Kada su količine u ravnoteži, kazaljka instrumenta je na nuli, npr. mjerenje mase pomoću vage sa kracima. Pored navedenih, postoji još čitav niz metoda, koje se, više ili manje, zasnivaju na već navedenom. Sve one imaju svoje određene osobine sa praktične i teorijske strane, koje ih opredjeljuju za određenu vrstu primjene.

7.2 Mjerenje električnih veličina i električni mjerni instrumenti

7.2.1 Opšte o električnim mjernim instrumentima

Mjerni instrumenti i metode mjerenja razvijali su se sa ciljem postizanja što tačnijeg ali i što jednostavnijeg mjerenja, i uvijek se težilo da se, što je moguće više, izbjegne subjektivnost čovjeka i njegovih čula, koja imaju ograničenu moć zapažanja i ocjenjivanja.

Većina električnih mjernih instrumenata sadrži pokretni sistem na koji djeluju dva sprega; jedan koji proizvodi mjerna veličina, i drugi, suprotnog smjera, koji proizvodi spiralna opruga, kojom je pričvršćen pokretni dio. Prvi spreg se naziva **aktivni** ili **kretni**, a drugi **otporni** ili **upravljajući**.

Aktivni spreg M_α je, u opštem slučaju, funkcija mjerene veličine v i ugla skretanja α :

$$M_\alpha = f(v, \alpha) \quad (7.1)$$

dok je otporni spreg M_0 , obično srazmjeran uglu skretanja α

$$M_0 = k_0 \cdot \alpha \quad (7.2)$$

U našim razmatranjima, ćemo zanemariti otporni spreg usljed trenja, pošto je pokretni sistem instrumenta obično izrađen sa relativno malom masom, a ležišta osovine pokretnog dijela vrlo brižljivo su urađena.

Pod dejstvom aktivnog sprega, pokretni sistem se pokreće i dolazi u novi ravnotežni položaj, za koji je zadovoljeno $M_0 = M_\alpha$,

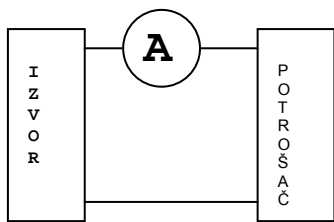
$$k_0 \cdot \alpha = f(v, \alpha) \quad (7.3)$$

Pokretni sistem, prije nego što se zaustavi u novom ravnotežnom položaju, usljed svoje inercije, napraviće izvjestan broj oscilacija oko ravnotežnog položaja. Usljed toga, mjerenja su relativno spora, a i manje tačna, kada se M_α brže mijenja. Ovo oscilovanje može se smanjiti ili čak potpuno prigušiti, uvođenjem umirljivih spregova, koji se proizvode, bilo komprimovanjem vazduha pomoću klipova, bilo pomoću vrtložnih struja. Za mjerenja pri dinamičkim električnim procesima, koriste se specijalni instrumenti bez pokretnih dijelova - osciloskopi. U novije vrijeme sve širu primjenu nalaze i digitalni mjerni instrumenti.

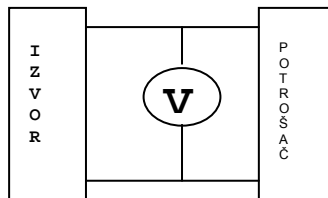
7.2.2 Mjerenje napona i jačine struje

Instrumenti za mjerenje jačine električne struje nazivaju se **ampermetri**. Ampermetri za svoj rad koriste različita dejstva električne struje kao što su: hemijsko, elektromagnetno, elektrodinamičko, termičko i indukciono. Blagodareći različitim dejstvima električne struje, kao i veoma širokom spektru primjene ampermetara, u svim oblastima elektrotehnike, razvijeno je mnogo različitih vrsta ampermetara.

U električnom kolu (sl.7.1), ampermetar se vezuje na red sa potrošačem (ili izvorom) čija se struja želi mjeriti.



Slika 7.1 Mjerenje jačine struje



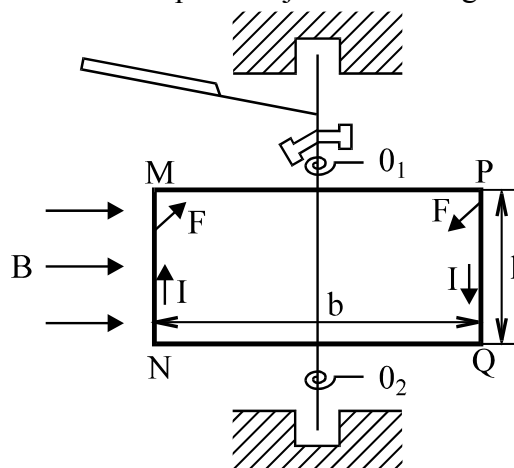
Slika 7.2 Mjerenje napona

Mjerenje napona, ili potencijalne razlike, vrši se **voltmetrima**. Kada koriste dejstva električne struje navedena za ampermetre, tada se radi o voltmetrima sa zatvorenim kolom. Postoje i voltmetri sa otvorenim kolom, koji za svoj rad koriste dejstvo Kulonove sile. Voltmetar sa zatvorenim kolom je ustvari osjetljivi ampermetar, sa kojim je na red vezan veliki otpor. Dakle, od svakog osjetljivog ampermetra se može napraviti voltmetar, ako mu se na red doda dovoljno veliki otpor. U električnom kolu, voltmetar se vezuje paralelno sa potrošačem (ili izvorom), kao na sl.7.2, čiji se napon želi mjeriti. Objasnjenje, kako to da ampermetar, čije

skretanje mora zavisiti od jačine struje kroz njega, može da mjeri napon, očigledno je iz Omovog zakona. Naime, jačina struje, koja prolazi kroz instrument, srazmjerna je potencijalnoj razlici na njegovim izvodima.

7.2.3 Instrument sa zakretnim kalemom

Za precizna mjerenja jednosmjerne struje i napona, gotovo isključivo, se koriste instrumenti sa kretnim kalemom. Oni se sastoje od stalnog magneta N-S, između čijih se polova nalazi kalem (namotaj) pravougaonog oblika, koji se sastoji od N međusobno izolovanih slijepljenih navojaka. Tako kalem čini kompaktnu cjelinu i ima izgled okvira (sl.7.3).



Slika 7.3 Instrument sa zakretnim kalemom

Usvojimo da je magnetno polje, tamo gdje je kalem, homogeno i da se ravan kalema, kada kroz njega ne teče struja, nalazi u pravcu linija magnetnog polja i da su te linije normalne na osovinu kalema.

Kada kroz kalem prolazi struja, pošto se nalazi u stranom magnetnom polju, na njega će djelovati elektromagnetna mehanička sila:

$$\vec{F} = N \cdot I \cdot (\vec{l} \times \vec{B}) \quad (7.4)$$

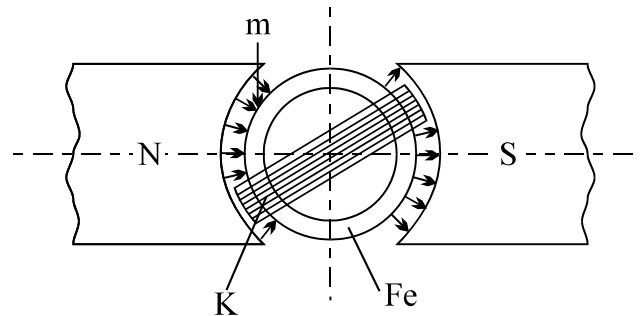
čiji je intenzitet $F = N \cdot I \cdot l \cdot B \cdot \sin(\vec{l}, \vec{B})$

Kako je za vertikalne strane MN i PQ ugao između vektora \vec{l} i \vec{B} jednak $\pi/2$, to su sile koje djeluju na ove strane jednakih intenziteta $F = N \cdot I \cdot l \cdot B$. Kada se ravan kalema poklapa sa smjerom vektora indukcije \vec{B} , tada na horizontalne strane kalema MP i NQ ne djeluju elektromagnetne sile, jer su \vec{l} i \vec{B} kolinearni. Kada se, međutim, kalem zakrene, i na ove strane će djelovati sile, ali su one aksijalne (u pravcu osovine), pa, prema tome, nemaju uticaja na kretanje kalema.

Sile koje djeluju na vertikalne strane obrazuju aktivni obrtni spreg M_α , koji zakreće kalem i koji bi ga, kad se ne bi protivio otporni moment M_0 opruga O_1 i O_2 , zakrenuo tačno za ugao $\pi/2$ radijana i postavio tako, da se smjer sopstvenog fluksa poklopi sa smjerom fluksa stalnog magneta. Zahvaljujući otpornom momentu kalem skreće samo za neki ugao $\alpha < \pi/2$ rad, za koji važi ravnoteža između aktivnog i otpornog sprega $M_\alpha = M_0$:

$$M_\alpha = Fb \cdot \cos \alpha = NIlB \cdot b \cdot \cos \alpha = I\Phi_0 \cdot \cos \alpha = k_\alpha \alpha = M_0 \quad (7.5)$$

gdje Φ_0 predstavlja ukupni maksimalni fluks indukcije kroz kalem. Da bi se obezbijedilo da aktivni spreg ne zavisi od ugla skretanja α , polovima magneta daje se pogodan oblik, a između polnih nastavaka magneta ubacuje se kalem postavljen na valjak od mekog gvožđa, kao na sl.7.4



Slika 7.4 Pokretni kalem između polova

Na ovaj način, u međugvožđu m , gdje se nalazi pokretni kalem K , magnetno polje je radijalno i homogeno. Sada je, za svako zakretanje, sila F normalna, ne samo na vektor indukcije B , već i na kalem, pa je aktivni spreg:

$$M_{\alpha} = Fb = NIbB = I\Phi_0 \quad (7.6)$$

Za ravnotežno stanje važi:

$$I\Phi_0 = k_0\alpha$$

$$I = \frac{k_0}{\Phi_0} \alpha$$

$$I = K_i \alpha$$

Koeficijent srazmjernosti K_i naziva se **strujna konstanta instrumenta**, i ona je stalna za dati

$$\text{instrument. Recipročna vrijednost konstante } \frac{1}{K_i} = S_i \left(\frac{\text{rad}}{A} = \frac{\text{podeoka}}{\text{amperu}} \right)$$

S_i se naziva **strujna osjetljivost instrumenta**.

Usljed postojanja unutrašnje otpornosti instrumenta R_g , pri prolasku struje I kroz njega, na krajevima instrumenta će vladati napon:

$$U = R_g I; \quad I = \frac{U}{R_g} = K_i \alpha; \quad U = R_g K_i \alpha = K_u \alpha \quad (7.8)$$

K_u - **naponska konstanta instrumenta**

$$K_u = R_g \cdot K_i \cdot \left(\frac{V}{\text{rad}} \right) = \frac{\text{volti}}{\text{podeoku}}$$

$$\frac{1}{K_u} = S_u \cdot \left(\frac{\text{podeoka}}{\text{voltage}} \right)$$

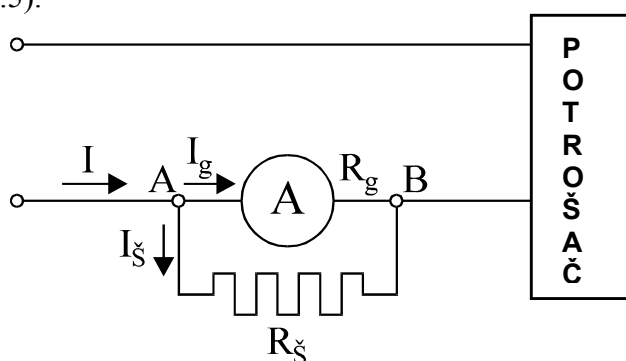
S_u - **naponska osjetljivost instrumenta**.

Rezimirajmo. Ugao skretanja kalemata zavisi od jačine struje kroz njega. Kada je instrument vezan redno (ampermetar), kroz njega prolazi struja potrošača. Kada je instrument vezan paralelno, (voltmetar), kroz njega prolazi struja srazmjerna naponu na koji je instrument priključen. Instrument sa kretnim kalemom može, dakle, da mjeri i struju i napon. To, međutim, ne znači da jedan instrument, koji je izgrađen da se koristi kao ampermetar (sa veoma malom otpornošću kalemata), smijemo povezati kao voltmetar. Tada bi, pri iole većem naponu, kroz instrument protekla vrlo velika struja, koja bi ga razorila.

Zakretni sistem instrumenta, naročito za precizna mjerenja, treba da ima što manju masu. To znači, da namotaji kalemata ne smiju biti masivni. Kroz osjetljiv kalem ne smijemo propustiti velike struje, jer bi došlo do njegovog razaranja.

Da bi se preciznim instrumentom, ipak, mogle mjeriti i jače struje, vrši se **proširenje mjernog područja instrumenta**. Neka je struja punog skretanja kazaljke I_g , a neka je

maksimalna struja koju želimo mjeriti $I \gg I_g$. Treba naći vrijednost otpornosti paralelnog otpornika (šanta) $R_{\check{s}}$, takvu da, kada potrošač uzima maksimalnu struju I , ampermetar ima maksimalno skretanje (sl. 7.5).



Slika 7.5 Proširenje mjernog područja ampermetra

Iz uslova jednakosti padova napona između tačaka A i B ima se:

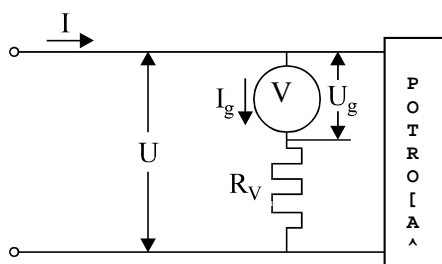
$$R_g \cdot I_g = U_{AB} = R_{\check{s}} I_{\check{s}} \quad (7.9)$$

$$I_{\check{s}} = I - I_g; \quad R_g \cdot I_g = R_{\check{s}} (I - I_g)$$

$$R_{\check{s}} = R_g \cdot \frac{I_g}{I - I_g} = R_g \cdot \frac{1}{\frac{I}{I_g} - 1} \quad (7.10)$$

Dakle, ugradnjom paralelnog otpornika $R_{\check{s}} \ll R_g$, moguće je proširiti mjerno područje ampermetra.

Proširenje mjernog područja voltmetra, vrši se povezivanjem dodatog otpornika R_v , na red sa instrumentom (sl.7.6).



Slika 7.6 Proširenje mjernog područja voltmetra

Vrijednost dodatnog otpornika treba odrediti tako, da pri maksimalnom naponu U , kroz instrument teče maksimalna dozvoljena struja instrumenta I_g .

$$U = U_g + R_g \cdot I_g = I_g \cdot R_g + I_g \cdot R_v$$

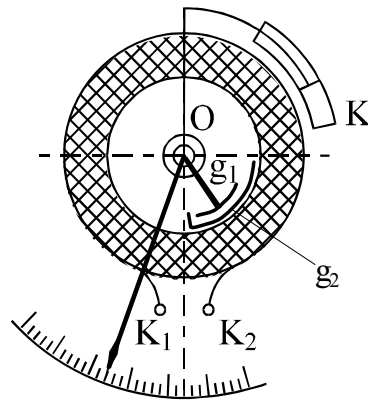
$$R_v = \frac{U - I_g \cdot R_g}{I_g} = R_g \cdot \left(\frac{U}{U_g} - 1 \right) \quad (7.11)$$

Iz izraza (7.10) i (7.11) očigledno je, da pri porastu struje, vrijednost otpora šanta, za proširenje mjernog područja ampermetra, opada, a pri porastu napona, vrijednost dodatnog otpora, za proširenje mjernog područja voltmetra, raste.

7.2.4 Instrument sa pokretnim mekim gvoždem

Instrument sa mekim gvoždem, sl.7.7, sastoji se od dvije tanke pločice od mekog gvožđa; pokretne g_1 , koja je pričvršćena na osovinu O, na kojoj se nalazi i opruga i kazaljka. Nepokretna pločica g_2 , pričvršćena je uz kalem. Struja, koja prolazi kroz navojke kalema,

proizvodi unutar kalema magnetno polje, pa se pločice od mekog gvožđa namagnetišu istim polaritetom. Istoimeno namagnetisane pločice se odbijaju. Dakle, pokretna pločica se odbija od fiksirane i tako dolazi do zakretanja kazaljke.



Slika 7.7 Instrument sa pokretnim mekim gvoždem

Za određivanje kvantitativne veze između jačine struje i , kroz kalem, i ugla skretanja kazaljke α , pođimo od izraza za energiju magnetnog polja kalema, koja je data izrazom:

$$W = \frac{1}{2} L \cdot i^2 \quad (7.12)$$

Instrument se može izraditi tako, da koeficijent indukcije kalema L , ne zavisi od jačine struje kroz kalem. Diferencijalno mala promjena energije dW , do koje dođe pri pomjeranju pločice g_1 za ugao $d\alpha$ je:

$$dW = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot dL \quad (7.13)$$

Ovo povećanje energije, jednako je radu, koji obavi pokretni sistem, nasuprot djelovanja otpornog momenta opruga na pokretnom sistemu:

$$\frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot dL = M_0 \cdot d\alpha = K_0 \cdot \alpha \cdot d\alpha = M_\alpha = M_0 \quad (7.14)$$

U ravnotežnom stanju, aktivni i otporni moment su jednaki $M_\alpha = M_0$

$$\frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{dL}{d\alpha} = K_0 \cdot \alpha \quad (7.15)$$

Instrument se konstruiše tako, da je promjena koeficijenta induktivnosti sa uglom konstanta K_1 , pa imamo:

$$\alpha = \frac{1}{2} \cdot \frac{K_1}{K_0} \cdot i^2 \quad (7.16)$$

Ako kroz kalem teče jednosmjerna struja I , tj. $i = I$, iz (7.16) vidimo, da je ugao skretanja instrumenta srazmjern kvadratu struje:

$$\alpha = K \cdot I^2 \quad (7.17)$$

Ako kroz kalem teče naizmjenična struja, ona će stvarati naizmjenično magnetno polje. Pločice će mijenjati svoj polaritet u ritmu struje, ali će uvijek biti istoimeno namagnetisane i uvijek će se odbijati. Dakle, instrument može da mjeri i naizmjeničnu struju. Neka kroz kalem teče naimjenična struja $i = I_m \sin(\omega \cdot t - \varphi)$. Ugao skretanja je:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{2} \frac{K_1}{K_0} \cdot I_m^2 \sin^2(\omega \cdot t - \varphi) = \\ &= \frac{1}{4} \frac{K_1}{K_0} \cdot I_m^2 (1 - \cos(2\omega \cdot t - 2\varphi)) \end{aligned} \quad (7.18)$$

Obično je period slobodnih oscilacija pokretnog sistema instrumenta, usled velike mase, relativno velik, u odnosu na periodu električne struje kroz kalem, pa pokretni sistem neće moći slijediti promjene struje i skretanje će biti jednako nekoj srednjoj vrijednosti $\bar{\alpha}$:

$$\begin{aligned}\bar{\alpha} &= \frac{1}{4} \cdot \frac{K_1}{K_0} \cdot I_m^2 \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_0^T (1 - \cos(2\omega \cdot t - 2\varphi)) \cdot dt = \\ &= \frac{1}{4} \cdot \frac{K_1}{K_0} \cdot I_m^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{K_1}{K_0} \cdot I^2 = K \cdot I^2\end{aligned}\quad (7.19)$$

Srednja vrijednost ugla skretanja srazmjerna je, dakle, kvadratu efektivne vrijednosti struje kroz kalem, pa skala instrumenta, kao i kod jednosmjerne struje, treba da bude kvadratična. Konstrukcijom gvozdениh pločica, skalu je moguće, dobrim dijelom, linearizovati.

Koristeći isti rezon, da je struja kroz kalem srazmjerna naponu na njegovim krajevima, zaključujemo, da se i ovaj instrument može koristiti kako za mjerenje jačine struje, tako i za mjerenje napona. Samo, nemojmo izgubiti iz vida, da se ampermetar izrađuje sa manje namotaja deblje žice ($R_g \rightarrow 0$), a voltmetar se izrađuje od više namotaja tanje žice ($R_g \rightarrow \infty$).

Za dobijanje otpornog sprega, kod ovih instrumenata koristi se ili eleastičnost spiralnih opruga ili samo zemljina teža. Prigušenje oscilacija pokretnog sistema vrši se pomoću vazdušnog klipa K.

Ovo su najčešće primjenjivani instrumenti u industrijskim mjerenjima struje i napona, jer su dosta robusni, pouzdani i jeftini.

7.2.5 Elektrodinamički instrumenti

Konstruktivno, elektrodinamički instrument se sastoji iz dva kalema, od kojih je jedan nepokretan, a drugi, pokretni, je manji i smješten je u nepokretnom (sl.7.8).

Kada kroz nepokretni kalem teče struja i_1 , a kroz pokretni struja i_2 , tada će na pokretni kalem djelovati elektromagnetni moment M_α , koji ga zakreće. Ovom momentu se suprotstavlja otporni moment M_0 spiralnih opruga,

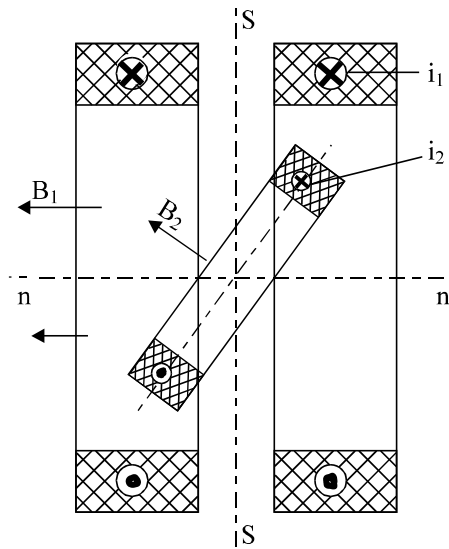
$$M_0 = k \cdot \alpha$$

Pri prolasku struja kroz kalemove, (a one mogu biti, bilo jednosmjerne, bilo naizmjenične), stvara se magnetno polje, čija je energija data izrazom:

$$W = \frac{1}{2} \cdot L_1 \cdot i_1^2 + \frac{1}{2} \cdot L_2 \cdot i_2^2 + i_1 \cdot i_2 \cdot L_{12} \quad (7.20)$$

Elektromagnetni moment M_α zakreće pokretni kalem iz položaja n-n, kako bi se elektromagnetna energija povećala do najveće vrijednosti – do položaja s-s, čemu se protivi otporni moment M_0 spiralnih opruga. Diferencijalno povećanje ove energije dW , jednako je radu aktivnog momenta $M_\alpha \cdot d\alpha$, koji se dobija na račun izvora struja i_1 i i_2 . To diferencijalno povećanje energije je:

$$dW = i_1 \cdot i_2 \cdot dL_{12} \quad (7.21)$$



Slika 7.8 Elektrodinamički instrument

jer L_1 i L_2 ne zavise od međusobnog položaja pokretnog i nepokretnog kalema. Da bi se obavilo ovo zakretanje kalema, mora se savladati rad spiralnih opruga:

$$M_\alpha \cdot d\alpha = M_0 \cdot d\alpha = i_1 \cdot i_2 \cdot dL_{12} \quad (7.22)$$

Kazaljka se zaustavi kada se aktivni i otporni moment izjednače:

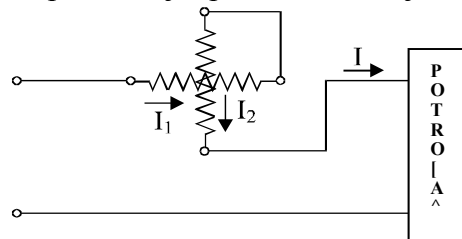
$$M_\alpha = i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{dL_{12}}{d\alpha} = K_{0\alpha} = M_0 \quad (7.23)$$

Pošto se konstrukciono može postići da je promjena koeficijenta međusobne indukcije sa zakretanjem konstantna, to je ugao zakretanja:

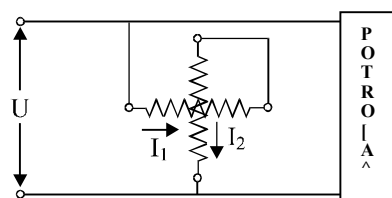
$$\alpha = \frac{K_1}{K_0} \cdot i_1 \cdot i_2 = K \cdot i_1 \cdot i_2 \quad (7.24)$$

Dakle, skretanje kazaljke je srazmjerno proizvodu jačina struje u pokretnom i nepokretnom kalemu.

Kada se ovi instrumenti koriste za mjerenje struje ili napona, tada se pokretni i nepokretni kalem vezuju na red, pa kroz njih prolazi ista struja: $i_1 = i_2 = i$.



Slika 7.9 Elektrodinamički instrument kao ampermetar



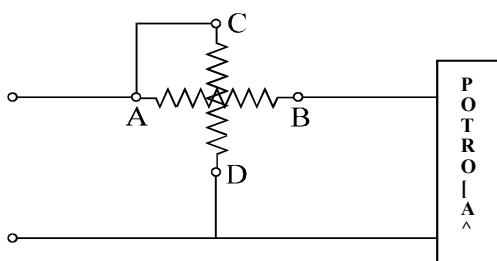
Slika 7.10 Elektrodinamički instrument kao voltmetar

Kada se instrument koristi kao ampermetar (sl.7.9) skretanje je srazmjerno kvadratu struje, a kad se koristi kao voltmetar, kvadratu napona. Tako, za mjerenja kod jednosmjerne struje, imamo:

$$\alpha_A = K_i \cdot I^2; \quad \alpha_v = K_U \cdot U^2 \quad (7.25)$$

Kada je struja naizmjenična prostoperiodična, tada je, koristeći isti postupak dokaza kao u prethodnom paragrafu, skretanje srazmjerno kvadratu efektivne vrijednosti struje, odnosno napona. Elektrodinamički instrument se dakle, može koristiti za mjerenje i napona i jačine struje i to kako jednosmjerne tako i naizmjenične.

Elektrodinamički instrumenti se najčešće koriste za mjerenje snage, i to jednosmjerne i naizmjenične struje (sl.7.11). Nepokretni kalem AB vezan je na red sa potrošačem. Kroz njega protiče struja potrošača i_1 , pa se on naziva **strujni kalem**. Pokretni kalem povezan je paralelno sa potrošačem, kroz njega protiče struja i_2 srazmjerna naponu potrošača, pa se on naziva **naponski kalem**.



Slika 7.11 Elektrodinamički instrument kao vatmetar

Skretanje kazaljke je:

$$\alpha = K \cdot i_1 \cdot i_2 = \frac{K}{Z} \cdot i_1 \cdot u = K_p \cdot i \cdot u \quad (7.26)$$

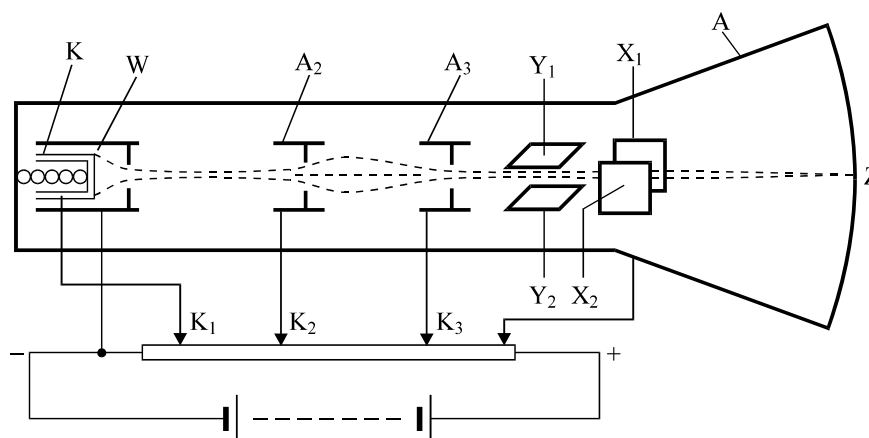
Kada se radi o naizmjeničnoj struji srednje skretanje je:

$$\bar{\alpha} = K_p \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i \cdot u \cdot dt = K_p \cdot P \quad (7.27)$$

Ovako povezan instrument - **vatmetar mjeri** dakle, srednju ili **aktivnu snagu**.

7.2.6 Katodni osciloskop

Katodni osciloskop je mjerni uređaj koji koristi katodnu cijev i niz drugih elektronskih uređaja. Pomoću njega se ostvaruje vizuelno praćenje promjena električnih napona raznih oblika.



Slika 7.12 Katodni osciloskop

Na ekranu sliku mjerene pojave crta tanak snop elektrona koji udara na fosforescentni zastor katodne cijevi. Pomjeranje elektronskog snopa vrši se djelovanjem električnih ili

magnetnih polja i slijedi njihove promjene praktično bez vremenskog zakašnjenja. Na taj način, moguće je snimanje pojava čija je frekvencija i preko 100 MHz.

[ematski prikaz osciloskopa dat je na slici 7.12. Osnovni dio osciloskopa je katodna cijev. Katodna cijev je posebna vrsta elektronske cijevi. U katodnoj cijevi sa visokim vakuumom, indirektno grijana usijana katoda K, emituje elektrone koji se jako ubrzavaju pod uticajem visokog pozitivnog napona anoda A_1 i A_2 . Odmah iza katode nalazi se Venelov cilindar W, koji ima mali otvor u sredini i zadatak mu je da ograniči debljinu elektronskog mlaza (snopa). Venelov cilindar je na negativnom naponu, u odnosu na katodu (-20 do -40 volti). Klizačem k_1 može se mijenjati potencijal katode. Time se mijenja broj elektrona u elektronskom mlazu, a time intenzitet osvijetljenosti tačke na ekranu. Anode A_1 i A_2 , koje se nalaze na pozitivnom potencijalu (nekoliko stotina, pa i hiljada volti) u odnosu na katodu, primoravaju elektrone da se prema ekranu kreću velikom brzinom. Osim toga, zadatak anoda je da koncentrišu elektronski mlaz. Cio ovaj sistem; katoda, Venelov cilindar i anode, obrazuju tzv. "**elektronski top**", koji ima zadatak da ostvari snažan uzak snop brzih elektrona.

Na svom daljnjem putu elektronski snop nailazi na dva para otklonskih pločica; vertikalne Y_1 - Y_2 i horizontalne X_1 - X_2 . Između svakog para pločica postoji električno polje, pod čijim djelovanjem dolazi do izvjesnog skretanja elektronskog mlaza.

Elektroda A, koja je u stvari sloj grafita sa unutrašnje strane lijevka cijevi, ima zadatak da ubrzava elektrone koji napuštaju otklonske pločice, kao i da skuplja sekundarne elektrone emitovane sa zastora uslijed dejstva elektronskog mlaza. Osim toga, ova elektroda služi kao magnetna zaštita elektronskom mlazu od eventualnih električnih i magnetnih polja izvan cijevi.

Kako otklonske pločice vrše skretanje elektronskog mlaza? Otklonske pločice za vertikalno skretanje Y_1 - Y_2 postavljene su horizontalno, prema tome električno polje između njih je vertikalno. Zanemarujući rasipanje na ivicama pločica, homogeno električno polje postoji samo između njih. Neka su pločice dužine l , na međusobnom rastojanju d i neka je između njih potencijalna razlika U_0 . Tada je vrijednost jačine električnog polja između njih $K=U_0/d$. Na elektron, čije je naelektrisanje q_e i masa m_e , koji dolazi duž x-ose i normalno upada u prostor između pločica, djeluje Kulonova sila $F=q_e K$. Prema drugom Njutnovom zakonu ova sila je jednaka $F=m_e a_y$, gdje je a_y ubrzanje mase u pravcu y-ose. Dakle, imamo:

$$F = q_e \frac{U_0}{d} = m_e \frac{d^2 y}{dt^2} = m_e a_y \quad (7.28)$$

Odavde brzina kretanja elektronskog mlaza u pravcu y-ose je:

$$v_y = \frac{q_e U_0}{m_e d} t \quad (7.29)$$

Da bi elektron prešao put između pločica potrebno je vrijeme $t = \frac{l}{v_x}$, gdje je v_x brzina u smjeru x-ose. Sada izraz za brzinu u smjeru y-ose možemo pisati u obliku:

$$v_y = \frac{q_e U_0}{m_e d} \frac{l}{v_x} \quad (7.30)$$

odakle nalazimo ugao skretanja elektrona nakon prolaza između pločice:

$$\alpha = \arctg \frac{v_y}{v_x} = \arctg \frac{q_e U_0 l}{m_e d v_x^2} \quad (7.31)$$

Na otklonske pločice za vertikalno skretanje mlaza Y_1 - Y_2 dovodi se ispitivani napon, a na pločice za horizontalno skretanje mlaza X_1 - X_2 dovodi se testerasti napon iz posebnog generatora testerastog napona (koji se već nalazi u sklopu osciloskopa). Testerasti napon ima zadatak da elektronski mlaz, tj. njegovu svijetlu tačku na ekranu katodne cijevi, pomjera linearno sa vremenom duž horizontalne ose. Na taj način se dobija vremenska osnova ili

vremenska baza, koja nam omogućava da slikovito u ravni X-Y pratimo vremenske promjene ispitivanog napona.

Osnovna primjena osciloskopa je vizuelno praćenje promjena električnih napona raznih oblika. Mjerenje struje vrši se indirektno, mjereći pad napona na poznatom otporniku. Poznato i tačno određeno trajanje testerastog napona, može se iskoristiti za mjerenje vremena. Pomoću osciloskopa je takođe moguće posmatranje dviju periodičnih pojava i npr., dobiti histerezisnu krivu.

7.2.7 Mjerenje električne otpornosti

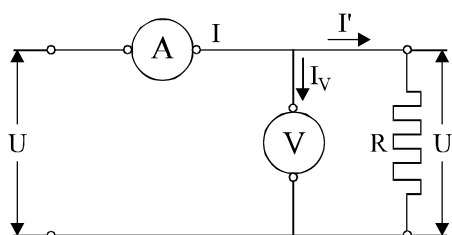
Pri mjerenju električne otpornosti, naročito preciznom, treba voditi računa i o sljedećim činjenicama: priključni vodovi i kontaktna mjesta mogu imati značajne vrijednosti otpora, termonaponi mogu da utiču na tačnost mjerenja, otpornost je različita za različite temperature otpornika i sl.

Postoje različite metode mjerenja otpornosti. Koja će se primijeniti, zavisi od toga da li je potrebno precizno mjerenje ili je dovoljno da se samo konstatuje da je, npr., neki provodnik u prekidu ($R = \infty$), ili da li je kratki spoj između dva različita namotaja ($R = 0$).

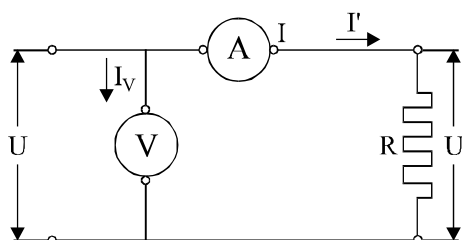
Mjerenje otpornosti mjerenjem struje i napona (U-I metoda)

Mjerenjem jačine jednosmjerne struje I koja prolazi kroz otpornik nepoznate otpornosti R i mjereći pad napona U koji ta struja izaziva u otporniku, na osnovu Omovog zakona možemo izračunati vrijednost otpornosti kao:

$$R = \frac{U}{I}$$



Slika 7.13 Mjerenje otpornosti U-I metodom



Slika 7.14 Mjerenje otpornosti U-I metodom

Imamo dvije mogućnosti povezivanja ampermetra i voltmetra kao na sl. 7.13 i sl. 7.14. Za prvi slučaj:

$$R = \frac{U'}{I'} = \frac{U'}{I - I_V} = \frac{U'}{I - \frac{U}{R_V}} \quad (7.32)$$

Kako je $R_V \rightarrow \infty$ to slijedi da je $I_V \ll I$, pa se, za manje precizna mjerenja, može uzeti da je otpornost jednaka odnosu mjenenog napona i mjerene struje tj. $R = R' \cong U_V / I_A$.

U drugom slučaju:

$$R = \frac{U'}{I'} = \frac{U - R_A \cdot I'}{I'} = \frac{U - U_A}{I'} = R' + R_A \quad (7.33)$$

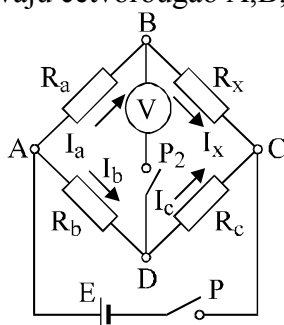
gdje je $R' = U_V / I_A$ i nazivamo je mjerena otpornost.

Kako je $R_A \rightarrow 0$ ovdje se može smatrati da je otpornost približna odnosu mjenenog napona i struje.

Ova metoda, U-I metoda, je prosta i pogodna, često i rado se koristi u industriji i naziva se industrijska metoda.

Mjerenje otpornosti Vitstonovim mostom

Vitstonov most (sl.7.15) sačinjavaju tri na red vezana poznata promjenljiva otpora R_a, R_b i R_c i nepoznati otpor R_x , tako da sačinjavaju četvorougao A,B,C,D.



Slika 7.15 Mjerenje otpornosti Vitstonovim mostom

U dijagonali AC se postavi izvor ems-e E i prekidač P, a u dijagonali BD galvanometar V (to je vrlo precizni nul-instrument, npr. instrument sa kretnim kalemom kod koga je nula na sredini skale) i prekidač P_2 . Zatvorimo prvo prekidač P. Struja iz izvora E raspodijelit će se po granama četvorougla. Zatvorimo sada prekidač P_2 . U opštem slučaju kroz galvanometar će proteći neka struja (što dovodi do skretanja njegove kazaljke na lijevu ili desnu stranu od nule, odnosno pozitivnom ili negativnom smjeru), jer, opšte govoreći, tačke B i D nisu na istom potencijalu. Mijenjajući otpornost poznatih otpornika (npr. pomjeranjem odgovarajućeg klizača, ili zakretanjem odgovarajuće preklopke) možemo postići da kroz galvanometar ne teče struja (kazaljka pokazuje 0), a to znači da su tačke B i D na istom potencijalu, odnosno da je potencijalna razlika -napon između njih jednaka nuli; $U_{BD} = 0$, što se može izraziti na sledeće načine:

$$U_{BD} = 0 = R_b I_b - R_a I_a \Rightarrow R_a I_a = R_b I_b \quad (7.34)$$

$$U_{BD} = 0 = -R_c I_c + R_x I_x \Rightarrow R_x I_x = R_c I_c \quad (7.35)$$

Pošto sada kroz galvanometar ne teče struja, to moraju biti zadovoljene i sledeće jednakosti (prvi Kirhofov zakon)

$$I_a = I_x \quad \text{i} \quad I_b = I_c \quad (7.36)$$

Podijelimo jednačinu (7.35) sa jednačinom (7.34)

$$\frac{R_x I_x}{R_a I_a} = \frac{R_c I_c}{R_b I_b}$$

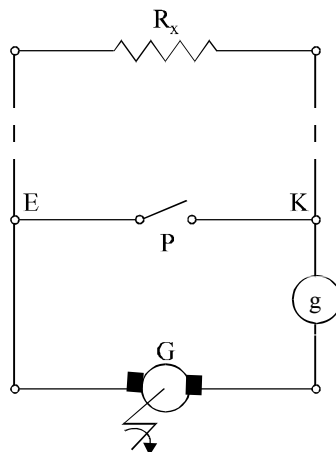
Imajući u vidu (7.36) nepoznatu otpornost R_x dobijamo kao:

$$R_x = R_a \frac{R_c}{R_b} \quad (7.37)$$

U principu, poznati otpornici su bilo kakvi promjenljivi otpornici; najčešće su to dekadne kutije otpora. Ponekad se most izrađuje tako da se umjesto otpora R_b i R_c koristi kalibrirana žica sa klizačem, tako da se njihov odnos može kontinualno mijenjati, tada most nazivamo **žičani most**.

Mjerenje otpornosti megometrom ($M\Omega$ -metar)

Megometri se koriste za provjeru izolovanosti ili provodljivosti (npr. da li je namotaj motora u prekidu; da li postoji kratki spoj (galvanska veza) između namotaja i kućišta motora). Najširu primjenu našao je tzv. **induktor**. To je mali prenosni generator čiji rotor obrćemo ručno (sl.7.16).



Slika 7.16 Mjerenje otpornosti megometrom

Na krajeve E i K povezuju se krajevi elementa čiju provodljivost (izolovanost) želimo da mjerimo. Obrtanjem ručice generatora G na njegovim krajevima dobijemo izvjesni napon. Pri zatvorenom prekidaču P imamo maksimalno skretanje ampermetra g. Nastavimo sa obrtanjem rotora i otvorimo prekidač P tada se strujno kolo zatvara preko otpora R_x . Skretanje galvanometra obrnuto je srazmjerno sa veličinom R_x . Ako je $R_x = 0$ (kratki spoj) skretanje je maksimalno, a ako je $R_x = \infty$ (izolovano) skretanja nema, jer je struja galvanometra $I_g = U_g / R_x = 0$.

Veličina R_x između ove dvije ekstremne vrijednosti procjenjuje se direktno na skali galvanometra.

7.2.8 Mjerenje električne snage

Električna snaga mjeri se, opšte govoreći, specijalnim instrumentima, koji se nazivaju **vattmetri**. Međutim, kod jednosmjerne struje i jednofazne naizmjenične kada je opterećenje omsko, snaga se može mjeriti mjereći struju i napon.

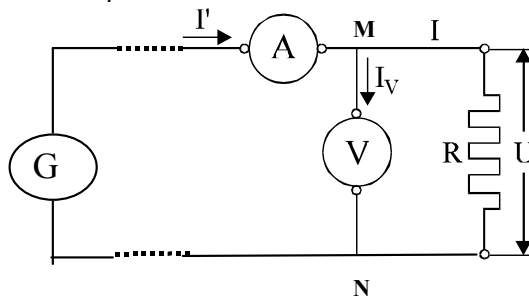
U-I metoda mjerenja snage.

Šema mjerenja prikazana je na sl.7.17.

Moguće je da se voltmetar veže i sa strane generatora u odnosu na ampermetar. U oba slučaja izmjerena snaga veća je od snage prijemnika i to u jednom (ovom) slučaju za potrošnju voltmetra, a u drugom, za potrošnju ampermetra. Tačna snaga koju uzima potrošač je:

$$P = UI = U(I' - I_v) = UI' - UI_v \quad (7.38)$$

gdje je UI' -mjerena snaga, a $UI_V = \frac{U^2}{r}$ je snaga koju troši voltmetar.

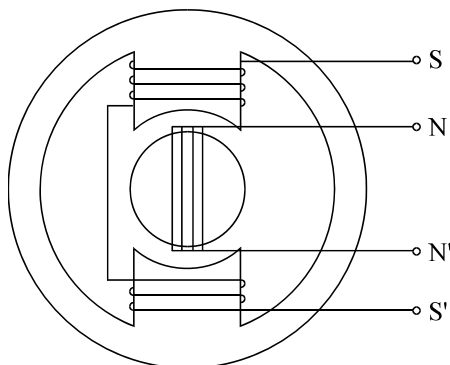


Slika 7.17 Mjerenje snage U-I metodom

Kako je otpor voltmetra $r \rightarrow \infty$, potrošnja voltmetra je relativno mala i sa dovoljnom tačnošću se može uzeti $P \cong U \cdot I'$.

Mjerenje snage vatmetrom

Prema načinu dobijanja sile koja djeluje na njihov kretni sistem, vatmetri mogu biti: elektrodinamički, indukcioni, termički i elektrostatički. Najširu primjenu našli su elektrodinamički vatmetri i to **elektrodinamički vatmetar bez gvožđa** za preciznija, laboratorijska mjerenja, a u industrijskim mjerenjima **elektrodinamički vatmetar sa gvožđem** (gvozdenim magnetnim kolom). O prvom je bilo riječi u odjeljku 7.2.5, a šematski prikaz elektrodinamičkog vatmetra sa gvozdenim magnetnim kolom dat je na sl.7.18.



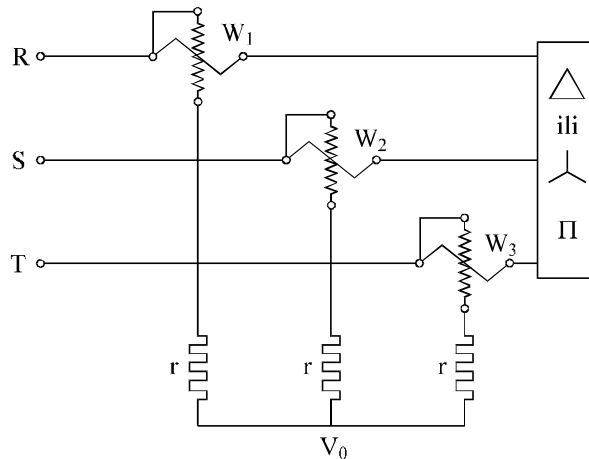
Slika 7.18 Oklopljeni elektrodinamički instrument

To je imitacija instrumenta sa kretnim kalemom, s tim što je stalni magnet aparata sa kretnim kalemom ovdje zamijenjen sa elektromagnetom. Gvozdeni oklop sprečava uticaj spoljnih magnetnih polja. Na njegovim ispustima postavljen je strujni nepokretni namotaj $S - S'$. Pokretni namotaj smješten je na dobošu od aluminijuma. Jak obrtni moment, mala sopstvena potrošnja i velika izdržljivost, dobre su osobine ovog instrumenta. Međutim, upotreba gvožđa umanjuje tačnost aparata (usled) histerezisa i vrtložnih struja.

Mjerenje snage trofaznog sistema

U opštem slučaju snaga trofaznog sistema mjeri se pomoću tri vatmetra, a snaga sistema dobije se kada se pokazivanja sva tri vatmetra aritmetički saberu. Kod trofaznih sistema bez nultog provodnika (sl.7.19) naponski kalemovi se preko dodatnih otpornika r vezuju u vještačku nulu V_0 . Kada postoji nulti provodnik on je zajednička tačka.

Ako je sistem simetričan i uravnotežen tada se snaga sistema može mjeriti jednim vatmetrom. Snaga sistema jednaka je trostrukom pokazivanju vatmetra.



Slika 7.19 Mjerenje snage trofaznog sistema

U trofaznom trožičnom sistemu mjerenje snage može se izvoditi pomoću dva vatmetra. Ovakva veza poznata je pod nazivom **Aronova sprega** sl.7.20. Posmatrajmo trofazni trožični sistem. Neka su impedanse opterećenja Z_1, Z_2 i Z_3 vezane u zvijezdu.

Ukupna trenutna snaga koju uzima potrošač je:

$$p(t) = u_1 \cdot i_1 + u_2 \cdot i_2 + u_3 \cdot i_3 \quad (7.39)$$

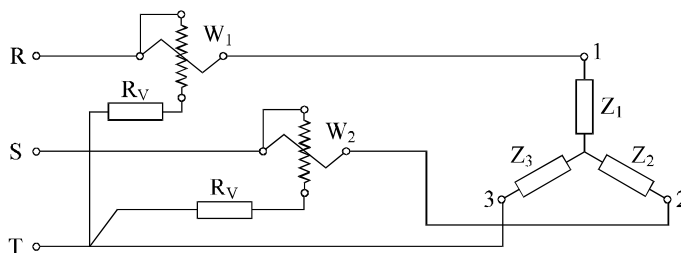
Pošto je trofazno opterećenje vezano u zvijezdu važi:

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0; \dots \rightarrow i_3 = -i_1 - i_2$$

pa se jednačina 7.39 može pisati u obliku:

$$p(t) = i_1 \cdot U_{13} + i_2 \cdot U_{23}$$

gdje su U_{13} i U_{23} linijski (ili međufazni) naponi između prve i treće odnosno između druge i treće faze. Prema tome, Aronova sprega se može realizovati kako je prikazano na sl.7.20.



Slika 7.20 Mjerenje snage Aronovom spregom

Pošto, kako smo vidjeli, vatmetri mjere srednju snagu, i to prvi

$$P_1 = U_{13} \cdot I_1 \cdot \cos \cdot (U_{13}, I_1) \quad (7.40)$$

a drugi

$$P_2 = U_{23} \cdot I_2 \cdot \cos \cdot (U_{23}, I_2) \quad (7.41)$$

to je ukupna snaga potrošača jednaka algebarskom zbiru pokazivanja oba vatmetra

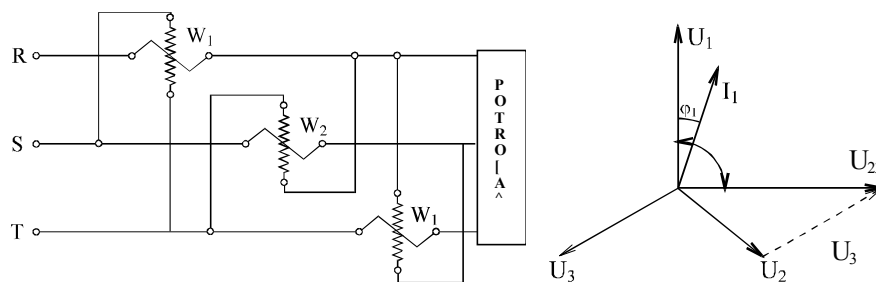
$$P = P_1 \pm P_2 \quad (7.42)$$

Aronova sprega može se koristiti i kada je potrošač vezan u trougao. Pri dokazivanju ove tvrdnje treba se poći od činjenice da je u ovom slučaju zbir trenutnih vrijednosti napona u svakom trenutku jednak nuli.

Mjerenje reaktivne snage

Mjerenje reaktivne snage vrši se **varmetrima**, čija je izvedba slična izvedbi vatmetara, samo što se konstrukciono postiže da struja u naponskom kalemu zaostaje za 90° iza napona.

Ovo se postiže tako što se u naponsko kolo elektrodinamičkom vatmetru doda induktivni otpor. U tom slučaju šeme veza su iste kao kod mjerenja aktivne snage.



Slika 7.21 Mjerenje reaktivne snage pomoću vatmetara

Reaktivna snaga se može mjeriti i vatmetrima. U tom slučaju se naponski kalem vezuje na linijski (međufazni) napon između druge dvije faze u kojima nije vezan odnosni strujni kalem, kao što je prikazano na sl.7.21.

Sa fazorskog dijagrama se vidi da je napon U_{23} , koji vlada na naponskom kalemu vatmetra čiji je strujni kalem vezan u fazi 1, fazno pomjeren od napona U_1 za 90° unazad i za $\sqrt{3}$ puta veći od njega. Prema tome, instrument W_1 (vatmetar) će mjeriti:

$$P_{W_1} = U_{23} \cdot I_1 \cdot \cos(90 - \varphi_1) = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} Q_1 \quad (7.43)$$

Kako se ista logika može prenijeti i na ostala dva instrumenta, ukupna reaktivna snaga trofaznog sistema, mjerena pomoću tri vatmetra povezana prema šemi na sl.7.21 iznosi:

$$Q = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{\sqrt{3}} \quad (7.44)$$

7.2.9 Mjerenje električne energije

Električna energija W , koju troši neki prijemnik, za neko vrijeme t data je integralom:

$$W = \int_0^t P(t) \cdot dt \quad (7.45)$$

Kada je snaga konstantna $P(t) = P$ tada je $W = P \cdot t$.

Kako snaga koju uzimaju potrošači tokom vremena obično nije stalna, za mjerenje energije se upotrebljavaju specijalni aparati, koji se nazivaju **električna brojila**. U većini slučajeva, to su mali elektromotori podešeni tako da je njihova ugaona brzina srazmjerna utrošenoj snazi; ovi motori obrću brojčanike obrta, na kojima se uvijek može pročitati utrošena energija za posmatrano vrijeme t , jer je ova srazmjerna broju obrtaja koje brojilo načini za to vrijeme t .

$$\text{Poznata je veza } P = M \cdot \omega = M \cdot \frac{d\alpha}{dt} \quad (7.46)$$

gdje su: ω - ugaona brzina

α - ugao obrtanja

Pri ustaljenom stanju obrtanja brojila postoji ravnoteža između elektromagnetnog momenta M i otpornog momenta M_0 . Otporni moment je obično stalan, pa za ustaljeno stanje važi:

$$W = \int_0^t P(t) \cdot dt = M_0 \cdot \int_0^{2\pi \cdot n} d\alpha = M_0 \cdot 2\pi \cdot n \quad (7.47)$$

gdje je: $2\pi \cdot n$ - ugao koji je napravio motor tokom vremena t , tj.

n - broj obrtaja rotora motora za to vrijeme.

Da bismo mjerili utrošeni rad, jasno je da se za obrtanje motora-instrumenta ne smije trošiti cjelokupan rad, već što je moguće manje. Potrebno je, dakle, da je pokretački moment M srazmjeran a ne jednak utrošenoj snazi, a otporni moment M_0 srazmjeran ugaonoj brzini obrtanja tj.:

$$M = K_1 \cdot P; \quad M_0 = K_2 \cdot \omega \quad (7.48)$$

Izjednačavajući ova dva momenta i integraleći u vremenu dobija se:

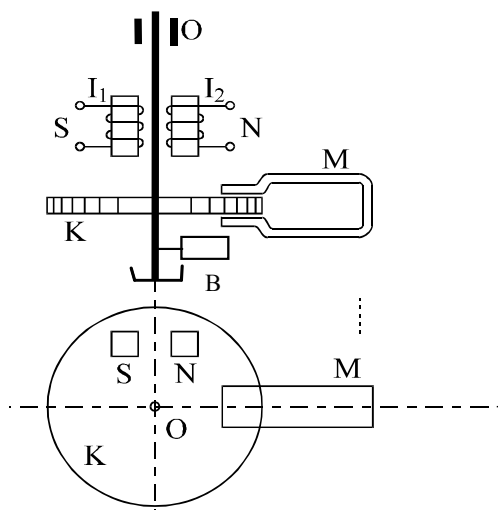
$$K_1 \cdot \int_0^t P \cdot dt = K_2 \int_0^{n2\pi} d\alpha = K_2 n 2\pi \quad (7.49)$$

$$W = \int_0^t P dt = \frac{K_2}{K_1} n 2\pi = Kn$$

gdje je K - konstanta brojila.

Indukciono brojilo

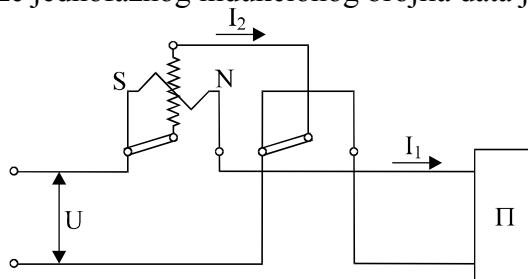
Iako je moguće različito konstruisanje brojila, skoro isključivo, u primjeni su indukciona brojila. Razmotrimo konstrukciju i princip rada **jednofaznog indukcionog brojila** sl.7.22.



Slika 7.22 Jednofazno indukciono brojilo

Jednofazno indukciono brojilo se sastoji od diska K od aluminijuma, koji se može obrtati oko osovine O u međugvožđu stalnog magneta M i dva elektromagneta S i N postavljena tako da se prodorne tačke njihovih osa nalaze na jednoj tetivi diska. Strujni namotaj S vezan je na red sa prijemnicima Π i kroz njega protiče struja I_1 koju uzimaju ti prijemnici. Naponski namotaj N vezan je na mrežu paralelno sa prijemnicima i struja I_2 koja prolazi kroz njega srazmjerna je naponu U koji vlada na prijemnicima.

Električna šema veze jednofaznog indukcionog brojila data je na sl. 7.23.



Slika 7.23 Šema veze jednofaznog indukcionog brojila

Naizmjenične struje koje prolaze kroz namotaje elektromagneta S i N proizvode naizmjenične flukseve Φ_1 i Φ_2 koji su pomjereni i u vremenu i u prostoru jedan u odnosu na drugi. Ovi fluksevi indukuju u aluminijumskom disku K vrtložne struje. Kada je disk u miru svaki od ovih flukseva djeluje uglavnom na struje u disku koje je indukovao onaj drugi kalem i rezultat ovih djelovanja je motorni spreg (obrtni moment) koji okreće disk brojila. Može se podesiti da motorni spreg M bude srazmjernan snazi koju uzima potrošač, a otporni spreg M_0 srazmjernan ugaonoj brzini ω diska:

$$M = C_1 P; \quad M_0 = C_2 \omega \quad (7.50)$$

Za stacionarni režim brojila ($\omega = \text{const.}$) imaćemo:

$$M = M_0; \quad C_1 P = C_2 \omega = C_2 \frac{d\alpha}{dt}$$

$$C_1 \int_0^t P dt = C_2 \int_0^{\alpha_t} d\alpha; \quad C_1 W = C_2 \alpha_t \quad (7.51)$$

gdje je:

α_t - ugao za koji se disk obrnuo za vrijeme t i on je srazmjernan broju obrtaja n koje je disk načinio za to isto vrijeme t :

$$\alpha_t = 2\pi \cdot n, \text{ pa je: } C_1 W = C_2 2\pi \cdot n$$

$$W = Kn \quad (7.52)$$

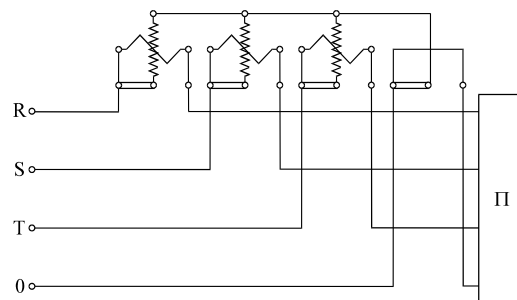
$$K = \frac{C_2 2\pi}{C_1} (=) J (=) \frac{kWh}{\text{obrtaju}} = \text{konstanta brojila}$$

prema tome, konstanta brojila K predstavlja energiju koju registruje brojilo kada se njegov disk obrne za jedan obrt.

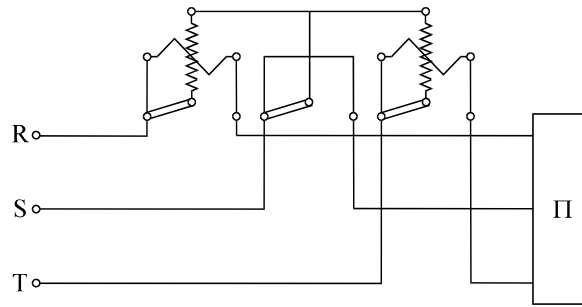
Mjerenje energije trofaznog sistema

Trofazno brojilo konstruktivno predstavlja skup tri jednofazna sistema-tri diska sa tri para N-S kalemova - postavljena na jednoj osovinu. Takvo brojilo nazivamo **trofazno trosistemsko brojilo** i njegova šema vezivanja u kolo data je na sl.7.24.

Trofazna brojila mogu da se izvode i kao **trofazna dvosistemsko brojila** - dva diska sa dva para N-S kalemova - (analagno mjerenju snage sa dva vatmetra), koji se u kolo vezuju prema šemi na sl.7.25.



Slika 7. 24 Šema veze trofaznog tro-sistemskog brojila



Slika 7.25 Trofazno dvo-sistemska brojilo

U oba slučaja na brojčanicima se čita cjelokupna utrošena energija trofaznog sistema.

Mjerenje reaktivne energije

Mjerenje reaktivne energije vrši se pomoću brojila reaktivne energije, a uz posebnu električnu vezu (analogno mjerenju snage), mogu se koristiti i brojila aktivne energije. Tada se mora voditi računa o električnoj vezi i o vrijednosti konstante brojila.

7.2.10 Osnovi tarifnog sistema

U mnogim procesima proizvodnje, a u proizvodnji aluminijuma i elektro čelika posebno, udio troškova za energiju u jedinici cijene proizvoda je značajan. Postoji niz mogućnosti i mjera koje mogu obezbijediti racionalniju potrošnju električne energije. Zbog toga je korisno da se upoznamo sa osnovama tarifnog sistema.

Potrošači električne energije, osim **utrošene energije**, plaćaju isporučiocu energije i **angažovanu maksimalnu snagu**. Zašto? U izlaganju u glavi 5. vidjeli smo da u svakom trenutku mora biti zadovoljena jednakost proizvodnja = potrošnja. Proizvođač, dakle, mora biti snabdjeven instalacijom i opremom koja će zadovoljiti potrošače i u trenutku njihove maksimalne potrebe (P_{max}). Ako potrošač samo kratko vrijeme radi sa maksimalnom snagom, tada će on utrošiti znatno manje energije od moguće proizvodnje, dakle, oprema i instalacija proizvođača je nedovoljno iskorišćena, pa on naplaćuje i **mjesečno maksimalnu srednju 15-to minutnu snagu** potrošača, koja se mjeri **maksigrafom**. Maksigraf je instrument čija se kazaljka svakih 15 minuta vraća na nulu (isključuje se). Brzina kretanja kazaljke srazmjerna je snazi potrošača. Ispred kazaljke instrumenta nalazi se markir- zastavica, koju kazaljka može pomjeriti prema naprijed (ali ne i prema nazad). Markir će, dakle, pokazivati maksimalnu srednju 15-to minutnu snagu koja se pojavila između dva očitavanja (mjesečno). Lice koje očitava maksigraf vraća markir na nulti položaj.

Kako smanjiti maksimalnu angažovanu snagu? Proces rada organizovati tako, da agregati koji rade sa promjenjivim snagama u toku procesa, ne rade istovremeno sa maksimalnim snagama. Npr. peći za topljenje čelika, ne treba istovremeno da budu u fazi topljenja šarže, kada im je snaga oko tri puta veća od snage u fazi oksidacije ili rafinacije.

Sa tipičnog **dnevnog dijagrama opterećenja** (sl.5.2) očigledno je da se snaga bitno mijenja u toku dana. Postoje intervali vremena kada je snaga znatno manja od maksimalne. Kako je interes proizvođača da se snaga što manje mijenja, on stimuliše potrošnju u ovim intervalima dajući **nižu tarifu** za energiju utrošenu u tom vremenu. Niža tarifa za utrošenu električnu energiju obično je u vremenu od 13h do 16h i od 22h do 6h narednog dana. U nekim sredinama niža tarifa važi i za dane vikenda i praznika. Zbog toga se neka brojila izrađuju kao **dvotarifna brojila**. Dvotarifna brojila su izvedena sa dva brojčanika. Pomoću satnog mehanizma, zavisno od vremena, uključuje se jedan ili drugi brojčanik, koji preko pužnog mehanizma registruje broj obrtaja osovine brojila, a time i utrošenu energiju.

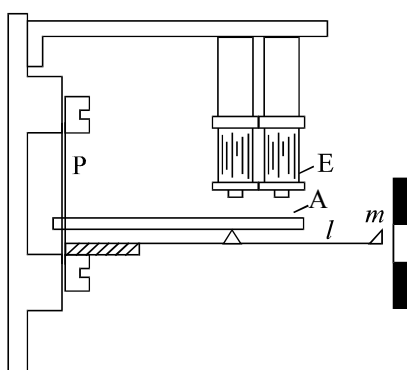
Mnogi električni uređaji rade sa faktorom snage $\cos \varphi$ manjim od jedinice. Takvi su: elektromotori, električne peći, razni poluprovodnički energetska pretvarači, indukcijske peći i uređaji posebno. Oni za svoj rad angažuju i određenu reaktivnu energiju, koju također treba platiti isporučiocu energije. Da bi se smanjili (ili potpuno eliminisali) troškovi za reaktivnu energiju, ugrađuju se **uređaji za kompenzaciju reaktivne energije (snage)**. Ovi uređaji ugrađuju se za pojedinačne agregate, kao što je slučaj kod indukcijskih peći za topljenje metala, ili za grupu potrošača, odnosno za preduzeće kao cjelinu. Osnovni element uređaja za kompenzaciju je kondenzatorska baterija čiji je kapacitet, po pravilu, može mijenjati. Nastoji se da struja kondenzatorske baterije I_c bude jednaka reaktivnoj komponenti I_r struje pretežno induktivnih potrošača, tj. $I_c = I_r$. Kako su ove dvije struje u protivfazi (opoziciji), reaktivna struja praktično "šeta" između kondenzatorske baterije i potrošača. Iz mreže elektroenergetskog sistema uzima se, dakle, samo aktivna komponenta struje, koja je u fazi sa naponom, pa je $\cos \varphi = 1$.

7.2.11 Mjerenje učestanosti

U primijenjenoj elektrotehnici često je važno da se učestanost ili frekvencija naizmjenične struje održava u određenim granicama (električno indukciono zagrijavanje). Zato je neophodno da se njena vrijednost može mjeriti. Za mjerenje učestanosti stoji na raspolaganju više mogućnosti od kojih se najčešće primjenjuju:

- mjerenje brzine;
- mehanička rezonansa;
- električna rezonansa.

U industriji se gotovo isključivo koriste **frekvencmetri** koji rade na principu mehaničke rezonancije (sl.7.26). Oni su prosti, robusne konstrukcije i pokazuju učestanost direktno u hercima. Za donju stranu grede pričvršćeno je 20 do 30 vitkih čeličnih lamela l a za njenu gornju stranu armatura A od mekog gvožđa, koja je deblja od lamela, a širine oko 5-6 lamela. Sama greda učvršćena je preko tanke elastične ploče P za osnovu aparata. Različitim dužinama lamela l , ili dodavanjem mase m kalaja na njihovim vrhovima, dobija se da je period sopstvenog oscilovanja lamela različit.



Slika 7.26 Frekvencmetar

Elektromagnet E , čiji je namotaj povezan direktno na mrežu čija se učestanost mjeri, privlači brže ili sporije-zavisno od učestanosti struje, armaturu A i tako proizvodi vibracije cijelog sistema lamela. Ako je perioda proizvedenih vibracija jednaka periodi sopstvenih oscilacija neke od lamela, ta lamela dolazi u rezonanciju i jako vibrira. Amplituda vibracija

lamelle u rezonanciji je najveća, međutim, i susjedne lamelle vibriraju, istina sa manjom amplitudom. Obično je skala graduisana na 0,5 Hz, pa se na ovakvom instrumentu ne može postići tačnost mjerenja ispod 0,5 Hz.

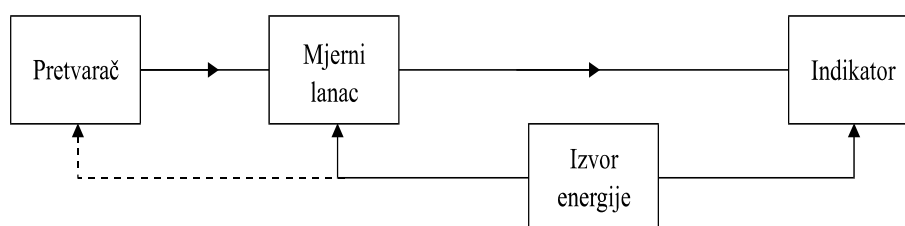
Frekvencimetri se u strujno kolo vezuju paralelno, kao voltmetri.

7.3. Električna mjerenja neelektričnih veličina

7.3.1 Opšte

Mnogi procesi u savremenoj nauci, tehnici i proizvodnji zahtijevaju mjerenja raznih neelektričnih veličina kao što su mehaničke, toplotne, hemijske, optičke ili akustične. Ova mjerenja primjenjuju se u toj mjeri da predstavljaju najrasprostranjeniju oblast električne mjerne tehnike. Ona ne služe samo za pokazivanje rezultata mjerene veličine, već su vrlo često potrebna ili neophodna za automatsko upravljanje složenim tehnološkim procesima, za matematičku obradu podataka bez posredstva čovjeka, prenos rezultata mjerenja na veća odstojanja itd. Razvoj mjerne tehnike ubjedljivo je pokazao da je sa više stanovišta najpovoljnije da se vrši preobražaj različitih mjernih veličina u električne, i bez obzira da li se radi o prenosu, regulaciji, matematičkoj obradi ili upravljanju, moguće je da se koristi standardna električna aparatura koja ima čitav niz prednosti nad mehaničkim mjernim uređajima.

Tipičan uređaj za električno mjerenje neelektričnih veličina predstavljen je blok-dijagramom na sl.7.27



Slika 7.27 Blok-šema električnog mjerenja neelektričnih veličina

Osnovni djelovi uređaja su: pretvarač, mjerni lanac, indikator i izvor energije.

Pretvarač, ili kako se još naziva **davač ili senzor ili transmiter**, vrši **pretvaranje mjerene neelektrične veličine u proporcionalni električni signal**. Ovaj signal obično ima malu energiju i u takvom obliku je nedovoljan za direktno registrovanje pomoću uobičajenih indikatora.

Mjerni lanac obavlja različite modifikacije električnog signala. One mogu biti jednostavne, npr. **pojačanje** signala, ili pretvaranje; promjenu električne otpornost u promjenu napona ili struje. Obrada signala može biti i složenija, npr. konverzija analognog signala u digitalni (A/D konverzija).

Indikator za očitavanje mjenog signala može biti analognog ili digitalnog tipa. Obično je graduisan u jedinicama mjerene neelektrične veličine.

Izvor napajanja je najčešće ispravljački uređaj koji obezbjeđuje stabilni jednosmjerni napon, ili je to izvor naizmjeničnog prostoperiodičnog napona. Ovaj izvor najčešće napaja mjerni lanac, a u nekim slučajevima se napaja i pretvarač i/ili indikator.

7.3.2 Mjerni pretvarači

Mjerni pretvarač, u smislu električnih mjerenja neelektričnih veličina, je element mjerne aparature koji se nalazi u izvjesnom odnosu sa mjerenom neelektričnom veličinom. Interakcija mjerene veličine i pretvarača, po određenim zakonitostima, izaziva promjenu parametara ili stanja pretvarača. Kao posljedica ove interakcije na pretvaraču se javlja određeni električni signal, koji je srazmjern mjerenoj neelektričnoj veličini.

Mjerni pretvarači se međusobno veoma razlikuju i to kako po principu njihovog djelovanja, tako i po složenosti konstrukcije. Jednostavniji su pretvarači kod kojih neelektrična mjerena veličina neposredno djeluje na promjenu parametara pretvarača. Takvi su npr. otpornički pretvarači koji pod dejstvom toplote ili svjetlosti mijenjaju svoju otpornost. Kod složenijih pretvarača, za konverziju obično nije dovoljna jedna elektromehanička komponenta, već se konverzija neelektrične veličine u električni signal vrši u dvije ili više faza. S obzirom na veoma široku oblast primjene, i veoma različite fizičke fenomene koji se koriste kod pretvaranja, postoji više klasifikacija pretvarača. Mi ćemo se opredijeliti za onu po kojoj pretvarači dijele na:

- pasivne ili parametarske pretvarače i
- aktivne ili generatorske pretvarače.

Pasivni pretvarači daju električni izlazni signal samo ako se napajaju iz stranog izvora energije. Ovi pretvarači, kao izlaznu veličinu daju promjenu električnog parametra; -otpornosti R , induktivnosti L ili kapacitivnosti C - koji se mijenjaju pod uticajem mjerene veličine. U ovu grupu spadaju: razni otpornički pretvarači kao što su **otporne (tenzometrijske) mjerne trake**, gdje se električna otpornost mijenja uslijed promjene dimenzija otpornika, **termootpornici**, gdje se otpornost mijenja uslijed promjene temperature otpornika; **fotootpornici**, gdje se otpornost mijenja uslijed promjene osvijetljenosti otpornika; **potenciometri**, gdje se potencijal između dvije tačke mijenja promjenom otpornosti otpornika; zatim razni **induktivni i kapacitivni pretvarači**, gdje se njihovi parametri L i C mijenjaju npr. uslijed pomjeranja nekog dijela pretvarača.

Aktivni pretvarači kao izlazni signal imaju elektromotornu silu ili struju koja se generiše direktno pod uticajem neelektrične veličine. U ovu grupu spadaju **termoelementi**, gdje se termoelektromotorna sila javlja kao posljedica temperaturne razlike između dva spoja termopara; **fotoelementi**, gdje je elektromotorna sila direktna posljedica osvijetljenosti; **piezoelektrični pretvarači**, gdje je struja srazmjerna pritisku na pretvarač; i **indukcioni pretvarači (tahogeneratori)**, gdje je indukovana ems-a srazmjerna brzini obrtanja.

O nekim od ovih pretvarača govorit ćemo detaljnije uz razmatranja mjerenja pojedinih neelektričnih veličina.

7.3.3 Mjerenje temperature

Električno mjerenje temperature koristi prije svega ems-u **termoelektričnih parova (termoelemenat)**, zatim temperaturnu zavisnost električne otpornosti metala, legura i poluprovodnika, kao i intenzitet pojedinog spektra toplotnog zračenja. Uređaji na bazi zračenja nazivaju se **pirometri** i oni spadaju u bezkontaktne termometre, jer pri mjerenju nisu u direktnom kontaktu sa tijelom čija se temperatura mjeri, a svi ostali su kontaktni termometri.

Osnova svih mjerenja temperature je termodinamička temperaturna skala (Kelvinova), koja je nezavisna od svojstava tijela čija se temperatura mjeri. Osim Kelvinove dozvoljena je primjena Internacionalne praktične temperaturne skale (Celzijusova) koja se zasniva na

nekoliko fiksnih tačaka kao što su: topljenje leda $0,00^{\circ}C$ ključanje vode $100,00^{\circ}C$ topljenje kalaja $231,91^{\circ}C$ itd., pri pritisku od $1,05 \cdot 10^5$ Pa. Veza između ove dvije skale je:

$$T (K) = \theta (^{\circ}C) + 273,15$$

što znači da je temperaturna razlika ista bez obzira na korišćenu skalu. Iako propisima nije dozvoljena primjena, u tehničkoj praksi se još mogu sresti i Farenhajtova i Reomirova temperaturna skala. Veza među ovim skalama je sledeća:

$$\theta \cdot (^{\circ}C) = \frac{5}{9} (^{\circ}F - 32)$$

$$\theta \cdot (^{\circ}F) = \frac{9}{5} \cdot (^{\circ}C) + 32$$

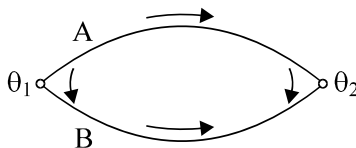
$$\theta \cdot (^{\circ}R) = \frac{9}{5} K$$

Prema načinu prenosa toplote sa tijela čija se temperatura mjeri na detektor mjernog instrumenta i vrstu mjernog pretvarača razlikujemo više metoda mjerenja temperature, a mjerenje se vrše:

- termoelektričnim termometrima,
- otporničkim termometrima i
- radijacionim termometrima-pirometrima.

Termoelektrično mjerenje temperature

Fizičar Zebek je 1821.god. otkrio da postoji električna struja u kolu sastavljenom od dva **različita** metala, kada se njihovi spojevi nalaze na različitim temperaturama sl.7.28.



Slika 7.28 Uz objašnjenje Zebekovog efekta

Peltije je 1834.god. otkrio inverzan efekt Zebekovom, kada struja teče kroz spoj dva različita metala, toplota se apsorbuje i spoj se hladi, a kada se promijeni smjer struje, tada se isti spoj zagrijava. To znači da je Zebekov efekt reverzibilan. Treba razlikovati Peltijeov i Džulov efekt.

Tomson je, 1854.god. eksperimentalno pokazao da u jednom provodniku od **homogenog materijala** postoji gradijent električnog potencijala, ako duž tog provodnika postoji temperaturni gradijent. Vrijednost Tomsonove EMS-e je:

$$E_T = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sigma \cdot d\theta$$

σ - Tomsonov koeficijent, ($V/^{\circ}C$), zavisi od vrste materijala provodnika i može biti pozitivan i negativan. Tomsonov efekt je takođe reverzibilan; kada struja proizvedena stranim izvorom teče u smjeru E_T , kod metala sa pozitivnim σ , tada se provodnik hladi, i obrnuto provodnik se grije, kod metala sa negativnim σ , suprotno.

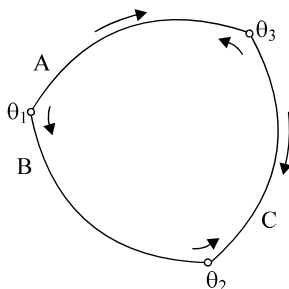
Ukupna termoelektromotorna sila (TEMS-a) u kolu sl.7.28 je:

$$E(\theta_1 - \theta_2) = E'_{AB} \cdot (\theta_2) - \int_{\theta_2}^{\theta_1} \sigma_B \cdot d\theta - E'_{AB} \cdot (\theta_1) + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sigma_A \cdot d\theta \quad (7.53)$$

U opštem slučaju, kada je $\theta_1 \neq \theta_2$, u ovom kolu postoji određena vrijednost TEMS-e. Pod uticajem te TEMS-e kroz kolo će teći određena struja. Energija u ovom kolu ostvaruje se na račun utroška toplotne energije izvan kola. Ako sada u kolo uključimo i treći metal C (sl.7.29)

čiji su krajevi na temperaturama θ_2 i θ_3 , i za ovo kolo, na analogan način, možemo odrediti ukupnu vrijednost TEMS-e E_{ABC} .

$$E_{ABC} = -E'_{BC}(\theta_2) - \int_{\theta_2}^{\theta_1} \sigma_B \cdot d\theta - E'_{AB}(\theta_1) + \int_{\theta_1}^{\theta_3} \sigma_A \cdot d\theta - E'_{AC}(\theta_3) + \int_{\theta_3}^{\theta_2} \sigma_C \cdot d\theta \quad (7.54)$$



Slika 7.29 Kolo sa tri metala

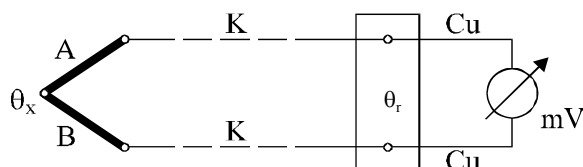
U opštem slučaju ova TEMS-a ima neku vrijednost koja je različita od nule. Međutim, ako se ima u vidu da je zbir Zebekovih sila jednak nuli kada su svi spojevi na istoj temperaturi, tj. za $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_2$ biće:

$$E'_{BC}(\theta_2) + E'_{AB}(\theta_2) + E'_{AC}(\theta_2) = 0$$

odatle je:

$$E'_{AB}(\theta_2) = -E'_{BC}(\theta_2) - E'_{AC}(\theta_2) \quad (7.55)$$

Osim toga, Tomsonova sila u provodniku C jednaka je nuli kada su njegovi krajevi na istoj temperaturi, pa uvrstimo li još 7.55 u 7.54, vidimo da ona postaje ista kao jednačina 7.53. To drugim riječima znači, ako smo između metala A i B ubacili metal C i ako smo njegove krajeve držali na istoj temperaturi u kolu se nije ništa izmijenilo; ukupna TEMS-a je ostala ista kao kad u kolu nije bilo metala C. Praktični značaj ove konstatacije očigledan je sa sl.7.30.

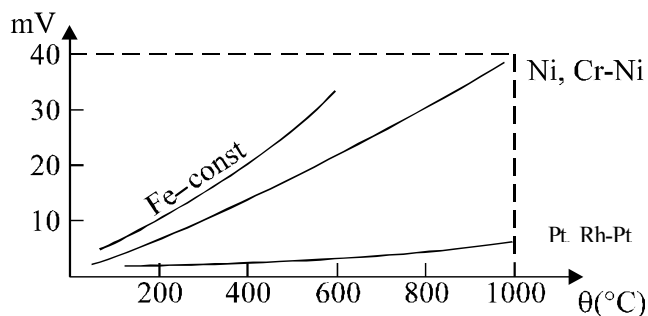


Slika 7.30 Mjerenje temperature pomoću termoelementa

Ako se temperatura referentnog spoja θ_r održava konstantnom, tada će skretanje milivoltmetra biti srazmjerno temperaturi radnog spoja θ_x . Na radnom spoju dva prikladna različita materijala se spoje tvrdim lemljenjem ili zavarivanjem. Tako dobijamo **termopar**, ili **termospreg** ili **termoelement**. Kao termoparovi najčešće se koriste sledeći materijali (naveden je i dijapazon radnih temperatura):

- bakar - konstantan (legura Cu, Ni, Mn)(-200 do 400)^oC
- željezo – konstantan(-200 do 600)^oC
- nikalhrom - nikal(0 do 400)^oC
- platinarodijum - platina(0 do 1600)^oC

U nekim specijalnim izvedbama, termoelementima je moguće mjeriti temperature i do 2600^oC.



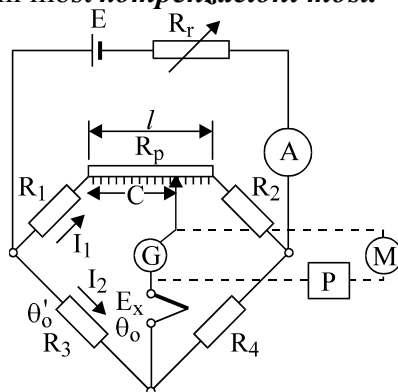
Slika 7.31 TEMS-a raznih termoparova u funkciji temperature

Vrijednosti TEMS-a određenih termoparova u zavisnosti od temperature, daju se u literaturi u vidu dijagrama ili tabela. Ako se referentni spoj ne nalazi na stalnoj temperaturi za koju je instrument baždaren, dolazi do greške mjerenja. Za održavanje $\theta_r = \text{const.}$, u laboratorijskim uslovima obično se koristi posuda sa ledom koji se topi (0°C), a u industrijskim mjerenjima se koriste **termostati**. To su veći metalni blokovi električno zagrijavani, najčešće na $\theta_r = 60^\circ\text{C}$. Savremeni uređaji za termoelektrično mjerenje temperature koriste kompenzacione metode, sa jednom vrstom Vitstonovog mjernog mosta sl.7.32.

Neka je most bio u ravnoreži. Neka sada dođe do promjene temperature mjernog mjesta θ_x . Zbog toga će doći do promjene TEMS-e E_x . Promjena E_x će izazvati skretanje indikatora (galvanometra) G. Signal sa indikatora se pojača u pojačavaču P i odvodi na motor M, koji se zakrene u određenom smjeru, zavisno od polariteta signala, odnosno od porasta ili pada temperature. Motor pomjera klizač na otporniku R_p , i istovremeno pokazivač (kazaljku) temperature. Promjenom položaja klizača na R_p mijenja se dužina C sve dok se napon kompenzacije U_k ne izjednači sa novom TEMS-om E_x :

$$U_k = (R_1 + \frac{C}{l} R_p) I_1 - R_3 I_2 \quad (7.56)$$

Međutim, do promjene E_x će doći i ako dođe do promjene referentne temperature θ_r . Gornji postupak kompenzacije ne bi bio dobar, jer je θ_x ostala nepromijenjena. Promjena napona kompenzacije ostvaruje se promjenom člana $R_3 I_2$, za isti iznos za koliko se promjenila E_x uslijed promjene θ_r . Ovo se postiže tako što se R_3 izrađuje od materijala čija se otpornost značajno mijenja sa promjenom temperature (legura nikla) i što se nalazi na mjestu, odnosno na temperaturi referentnog spoja θ_r -na sl.7.32 $\theta_0 = \theta_0'$. Na ovaj način izvršena je automatska kompenzacija uticaja promjene referentne temperature, pa se metoda nekada naziva **kompenzaciona metoda**, a mjerni most **kompenzacioni most**.



Slika 7.32 Veza termoelementa u Vitstonov most

Mjerenje temperature otporničkim termometrima

Termootpornikom se naziva provodnik ili poluprovodnik sa velikim temperaturnim koeficijentom otpornosti, a koji se nalazi u izvjesnom toplotnom odnosu sa okolinom. Struja

kroz termootpornik treba da bude mala, kako Džulova toplota razvijena u njemu ne bi izazvala veliku grešku mjerenja.

Zavisnost otpornosti od temperature za većinu metala može se izraziti sledećom zakonitošću:

$$R_g = R_1 [1 + \alpha_1(\vartheta - \vartheta_1) + \beta_1(\vartheta - \vartheta_1)^2 + \dots] \quad (7.57)$$

Gdje je: ϑ_1 - referentna temperatura, obično $0^\circ C$ ili $20^\circ C$,

α_1, β_1 - temperaturni koeficijenti otpornosti u odnosu na referentnu temperaturu ϑ_1 .

Za manje temperaturne dijapazone i za manju, ali dovoljnu tačnost, zakon (7.57) se može koristiti u obliku:

$$R_g = R_1 [1 + \alpha_1(\vartheta - \vartheta_1)] \quad (7.58)$$

odnosno, ako je referentna temperatura $\vartheta_1 = \vartheta_0 \Rightarrow za. 0^\circ C$

$$R_g = R_0(1 + \alpha_0 \vartheta) \quad (7.59)$$

Pitanje izbora materijala za pretvarač zavisi uglavnom od hemijske inertnosti prema okolnoj sredini i željenog intervala mjerenja temperature;

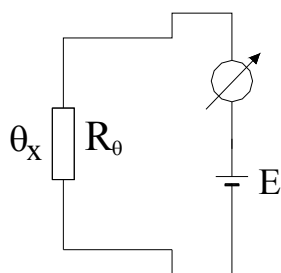
-bakar: $(-50 \text{ do } 180)^\circ C$, sredina bez vlage i korodivnih gasova,

-nikal: $(-250 \text{ do } 300)^\circ C$, do $100^\circ C$ ima linearnu karakteristiku,

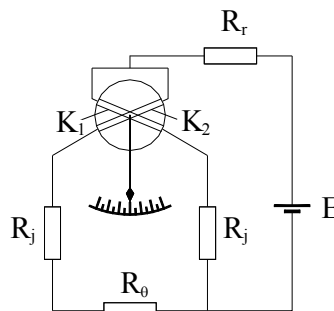
-platina: $(-200 \text{ do } 650)^\circ C$, za interval iznad $500^\circ C$ pogodnija upotreba termoelemenata.

U novije vrijeme kao termootpornici se koriste poluprovodnici koji se tada nazivaju **termistori**; to su obično oksidi bakra, kobalta ili mangana. Termistori, pored pozitivnog temperaturnog koeficijenta otpornosti -PTC termistori, mogu da imaju i negativan temperaturni koeficijent otpornosti -NTC termistori, a i osjetljivost im, u određenom temperaturnom diapazonu, može biti znatno veća nego kod metala.

Fizička činjenica -temperaturna zavisnost električne otpornosti-, jednostavno se može iskoristiti za mjerenje temperature (sl.7.33). Strujno kolo se sastoji od izvora E, termootpornika R_g i pokaznog instrumenta (ampermetra), koji može biti baždaren direktno u $^\circ C$. Međutim, skretanje instrumenta ne zavisi samo od R_g , jer je $I = E / (R_g + R_{vodova})$. Da bi se eliminisao uticaj promjene EMS-e izvora na tačnost mjerenja, koristi se **logometarski** instrument (sl.7.34).



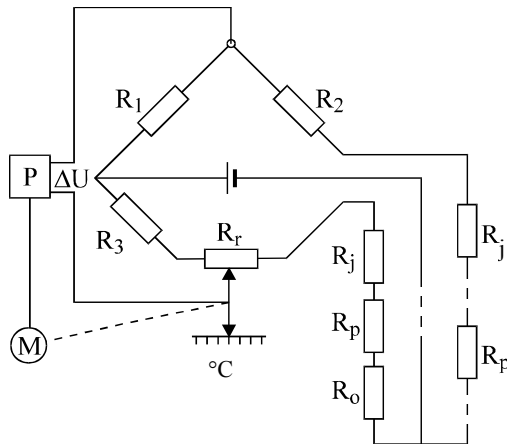
Slika 7.33 Princip mjerenja termootpornikom



Slika 7.34 Mjerenje temperature primjenom logometra

Logometar je izveden tako da su momenti kalemova K_1 i K_2 suprotni, pa promjena EMS-e E jednako utiče na veličinu struje u oba kalema, pa nema uticaja na skretanja kazaljke. Pošto struja kroz kalem K_2 zavisi i od otpora R_g , to će i rezultatni moment, tj. položaj kazaljke zavisiti od veličine R_g odnosno nepoznate temperature ϑ_x na kojoj se nalazi taj otpor. Na red sa oba kalema povezani su i otpori R_j -justirni (baždarni) otpornici- pomoću kojih se povremeno podešava otpornost u kolu (bez R_g).

Da bi se smanjio uticaj promjene otpornosti zbog promjene temperature okoline, koristi se kompenzaciona mostna metoda (sl.7.35).



Slika 7.35 Mjerenje temperature primjenom Vitstonova mosta

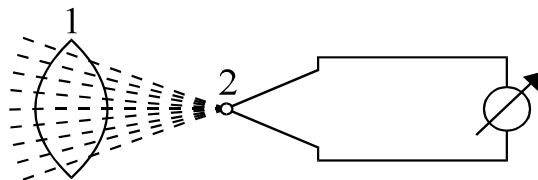
Otpornicima R_j vrši se povremeno podešavanje kako bi spoljni otpor veza bio isti kao pri baždarenju instrumenta. Približno isti otpori provodnika R_p nalaze se u dvije grane mosta (pa se promjene kompenzuju), a i dijagonala sa izvorom vezana je neposredno kod pretvarača R_g , pa je uticaj temperature okoline praktično poništen. Promjena nepoznate temperature ϑ_x izaziva promjenu R_g , a to poremećaj ravnoteže mosta i pojavu napona ΔU na pojačavaču, koji se pojačan dovodi na motor. Motor pomjera R_r sve dok se ne uspostavi nova ravnoteža ($\Delta U=0$), čime se ujedno pomjera i kazaljka koja sada pokazuje novu vrijednost nepoznate temperature ϑ_x .

Mjerenje temperature radijacionim termometrima

U praktičnim mjerenjima otpornički termometri se koriste do temperature 500°C , termoelektrični termometri do 1600°C , a za više temperature koriste se radijacioni termometri - **pirometri**. Pirometrima se temperatura mjeri sa izvjesne udaljenosti, dakle, nema direktnog kontakta sa medijumom čiju temperaturu mjerimo, kao kod prve dvije vrste termometara (kontaktnih).

Pri mjerenju temperature na bazi zračenja zagrijanog tijela moguće je koristiti ukupnu energiju zračenja, ili samo dio spektra toplotnog zračenja, npr. vidni dio spektra, ili mjerenjem odnosa intenziteta dviju boja iz spektra toplotnog zračenja.

Princip pirometra na ukupno zračenje vidi se na sl. 7.36. Tijelo zagrijano na temperaturu ϑ_x emituje toplotne zrake, ovi se pomoću sočiva fokusiraju na pretvarač koji može biti termopar ili termootpornik.



Slika 7.36 Princip pirometra na ukupno zračenja

U kolu je i pokazni instrument čije skretanje zavisi od nepoznate temperature ϑ_x .

Ukupna energija koju zrači crno tijelo, po Stefan-Bolcmanovom zakonu je:

$$E^o = \sigma T^4; \quad \sigma = 5.77 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

a realnog sivog tijela je:

$$E_s = \varepsilon \sigma T_s^4$$

ε - koeficijent emisivnosti, predstavlja odnos energije zračenja sivog tijela i crnog tijela na istoj temperaturi.

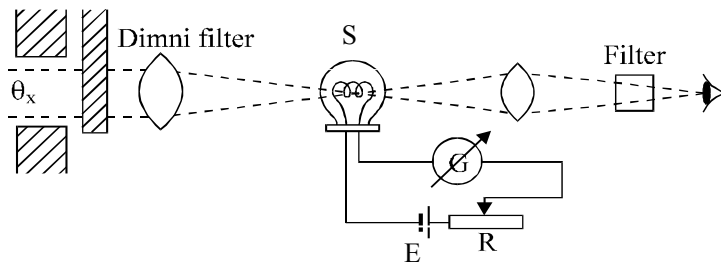
Radijacioni termometar, baždaren na bazi zračenja apsolutno crnog tijela, pri mjerenju na realnom tijelu, pokazat će neku temperaturu T_r - radijaciona temperatura datog tijela. Stvarna temperatura datog tijela može se izračunati:

$$\sigma T_r^4 = \varepsilon \sigma T_s^4; \quad T_s = T_r \sqrt[4]{1/\varepsilon} \quad (7.60)$$

Optički pirometri

Ovim pirometrima mjeri se intenzitet zračenja u dijapazonu talasnih dužina zračenja $0,4\mu m < \lambda < 0,7\mu m$ koje pripadaju vidnom spektru izdvojenom iz znatno šireg spektra toplotnog zračenja.

Šematski prikaz optičkog pirometra dat je na sl. 7.37.



Slika 7.37 Optički pirometar

Posmatranjem tijela sa temperaturom T_x na ekranu, po pravilu, uočavamo sijalicu S kao svjetliju ili tamniju mrlju na ekranu. Pomjeranjem klizača na R mijenja se intenzitet svjetlosti sijalice sa užarenim vlaknom, sve dok se na ekranu okulara ne izgubi mrlja, što znači da je izjednačena osvijetljenost sijalice i toplotnog izvora, a istovremeno i njihove temperature, čija se vrijednost može očitati na pokaznom instrumentu G. Instrument je obično baždaren tako da pokazuje tzv. "optičku temperaturu" odnosno temperaturu crnog tijela. Za mjerenje temperature sivog tijela potrebno je izvršiti određenu korekciju. Naime, toplotno zračenje okarakterisano je spektralnim intenzitetom zračenja opisanim Plankovim zakonom:

$$E_\lambda^o = C_1 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{\frac{C_2}{\lambda T_o}} - 1}$$

gdje je: $C_1 \cdot i \cdot C_2$ - prva i druga Plankova konstanta; λ -talasna dužina; E_λ^o -spektralni intenzitet zračenja crnog tijela, to je ona količina energije koju crno tijelo zrači u jedinici vremena sa jedinice površine i po jedinici dijapazona talasne dužine.

Za vidni dio spektra i za temperature $T < 3000K$, Plankov zakon za zračenje crnog tijela može se pisati:

$$E_\lambda^o = C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T_o}}$$

a za sivo tijelo:

$$E_\lambda = \varepsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T_s}} \quad (7.61)$$

gdje je: $0 < \varepsilon_\lambda < 1$, emisioni koeficijent za dati interval spektra.

Kako je optički pirometar graduisan na osnovu zračenja crnog tijela, stvarna temperatura datog tijela izračuna se iz:

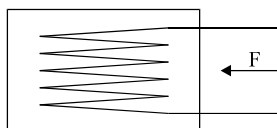
$$C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T_o}} = C_1 \varepsilon_\lambda \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T_s}}$$

odakle je:
$$\frac{C_2}{\lambda} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_o} \right) = \ln \varepsilon_\lambda \text{ i } \frac{1}{T_s} = \frac{1}{T_o} + \frac{\lambda}{C_2} \ln \varepsilon_\lambda \quad (7.62)$$

Vidimo da je za određivanje stvarne temperature T_s sivog tijela potrebno poznavati spektralni emisioni koeficijent ε_λ , koji zavisi od više elemenata, pa mu je potrebno pokloniti punu pažnju.

7.3.4 Mjerenje mehaničkih naprezanja

Mehaničke deformacije uzoraka nastale pod uticajem mehaničkih naprezanja (pritisak, istezanje, savijanje) efikasno se mogu odrediti primjenom **otporne mjerne trake - tenzometra**. Tenzometar je ustvari tanka otporna žica prečnika od oko 0,2 mm, savijena u cik-cak liniju i zalijepljena na tanku specijalnu hartiju (sl.7.38). Traka se lijepi na predmet čije se naprezanje mjeri, tako da se naprezanje sa ispitivanog predmeta direktno prenosi na mjernu traku.



Slika 7.38 Otporna mjerna (tenzometarska) traka

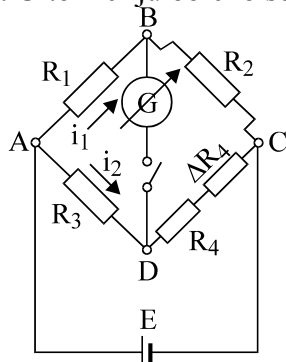
Mjerna traka radi na principu promjene termogene otpornosti trake usled promjene njene geometrije-dužine i poprečnog presjeka-pri njenom izduženju ili sabijanju. Mjerne trake se mogu primjeniti i kod mjerenja drugih mehaničkih veličina kao što su ubrzanje, pritisak, protok fluida itd.

Odnos između relativne promjene otpornosti $\Delta R / R$ i relativne promjene izduženja $\Delta l / l$ naziva se **osjetljivost mjerne trake K**.

$$K = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l} = (1,9 \text{ do } 2,1)$$

predstavlja karakteristiku trake koju daje proizvođač, kao i **sopstvenu otpornost trake R**. Standardne vrijednosti za R su 120, 350, 600 i 700Ω. Kod tipičnih ispitivanja relativna promjena otpornosti $\Delta R / R$ usled naprezanja je reda 10^{-4} do 10^{-3} , a ista promjena se dobije i pri promjeni temperature od oko $10^{\circ}C$ što znači da je potrebno uticaj temperature kompenzovati

S obzirom na veoma male promjene otpornosti pri mjerenju potrebno je da se primjeni precizna metoda mjerenja otpornosti. U tom cilju obično se koristi Vitstonov most (sl.7.39).



Slika 7.39 Mjerna traka u Vitstonovom mostu

U jednu granu mosta poveže se mjerna traka R_2 , koja je nalijepljena na ispitivani predmet (epruvetu). Pri neopterećenoj mjernoj traci, podese se ravnoteža mosta, pomoću promjenjivih otpornika R_1 i R_3 , a vrlo osjetljivi promjenjivi otpornik se zadržava na $\Delta R_4 = 0$. Kako smo vidjeli, pri ravnoteži mosta važi:

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

Kada se mjerna traka optereti, R_2 se promjeni za ΔR_2 , a ponovna ravnoteža se uspostavi pomoću ΔR_4 pa je:

$$R_2 + \Delta R_2 = (R_4 + \Delta R_4) \cdot \frac{R_1}{R_3} = R_4 \frac{R_1}{R_3} + \Delta R_4 \frac{R_1}{R_3}$$

pa je promjena otpora:

$$\Delta R_2 = \Delta R_4 \frac{R_1}{R_3} \quad (7.63)$$

Uz poznatu osjetljivost trake K , sada možemo odrediti relativno izduženje $\Delta l / l = \varepsilon$

$$\varepsilon = \frac{\Delta R_2 / R_2}{K} \quad (7.64)$$

Sa druge strane, odnos mehaničkog naprezanja σ i relativnog izduženja ε , u granicama elastičnosti, važi poznati Hukov zakon:

$$\frac{\sigma}{\varepsilon} = E \quad (7.65)$$

gdje je: $\sigma = F / S (=) N / m^2$, mehaničko naprezanje ili napon;

E - Jangov moduo elastičnosti, poznata karakteristika ispitivanog materijala.

Sada možemo odrediti i silu koja djeluje na ispitivanu epruvetu:

$$F = \varepsilon \cdot E \cdot S = \frac{\Delta R_2 / R_2}{K} E \cdot S \quad (7.66)$$

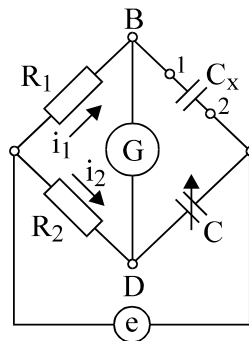
Da bi se izbjegao uticaj promjene temperature koriste se dvije mjerne trake istih karakteristika, postavljene u iste temperaturne uslove. Ova korekciona traka, ili pasivna traka, za razliku od aktivne, nije podvrgnuta mehaničkom naprezanjima, a vezuje se u susjednu granu mosta, na red sa otporom R_1 .

Naglasimo da se uspješna kompenzacija greške mjerenja i povećanje tačnosti mjerenja postiže korišćenjem tzv. **punog mosta**. Kod punog mosta koriste se četiri aktivne mjerne trake postavljene u sve četiri grane mosta. U dvije naspramne grane mosta postavljaju se trake sa pozitivnim ε (istezanje), a u druge dvije grane sa negativnim ε (sabijanje). Tada je, za interval sila od nekoliko stotina njutna pa do $F = 5 \cdot 10^6 \cdot N$, moguće postići da greška mjerenja ne bude veća od 0,05%. Mjerenje se vrši mjereći napon na dijagonali mosta (neuravnotežen most).

Za mjerenje dinamičkih promjena naprezanja obično se koristi most napajan naizmjeničnom strujom sa elektronskim pojačavačem koji povećava osjetljivost, a pojava se prati na katodnom osciloskopu.

7.3.5 Mjerenje nivoa dielektrične težnosti

Mjerenje nivoa dielektrične težnosti kao što su: benzin, razna ulja, lakovi itd., vrši se pomoću tzv. Satijevog mosta sl.7.40, koji se napaja iz izvora naizmjenične struje i u dvije grane sadrži kondenzatore od kojih je jedan mjerni pretvarač C_x .



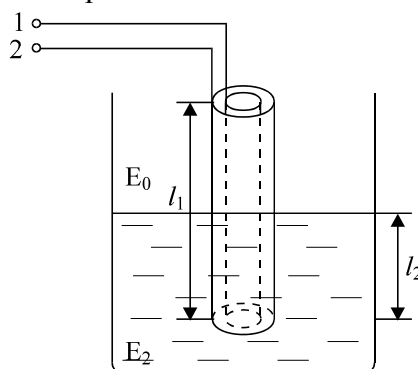
Slika 7.40 Mjerenje nivoa Satijevim mostom

Za ravnotežno stanje $U_{BD} = 0$ važi:

$$R_1 \cdot i_1 = R_2 \cdot i_2 \quad ; \quad \frac{1}{j\omega \cdot C_x} i_1 = \frac{1}{j\omega \cdot C} i_2$$

$$R_1 j\omega \cdot C_x = R_2 j\omega \cdot C; \quad C_x = C \frac{R_2}{R_1} \quad (7.67)$$

Pretvarač ili senzor u ovom slučaju je kondenzator, najčešće obrazovan od dvije koaksijalne cijevi, postavljen u posudi sa tečnošću čiji se nivo želi mjeriti. Jedan dio kondenzatora je uronjen u tečnost sa dielektričnom konstantom $\varepsilon > \varepsilon_0$, a drugi dio je u vazduhu (sl.7.41), pa C_x ustvari predstavlja ukupni kapacitet dva paralelno vezana kondenzatora.



Slika 7.41 Senzor nivoa tečnosti

Kapacitet ovih cijevi kada se nalaze u vazduhu je:

$$C_o = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_o \cdot l_1}{\ln \frac{b}{a}} \quad (7.68)$$

Kapacitet potopljenog dijela pretvarača:

$$C_1 = C_o \varepsilon_r \frac{l_2}{l_1} \quad \left(\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_o} \right)$$

Kapacitet dijela pretvarača koji viri iznad tečnosti:

$$C_2 = C_o (l_1 - l_2) / l_1$$

pa je ukupna kapacitivnost pretvarača C_x :

$$C_x = C_1 + C_2 = C_o + C_o \frac{l_2}{l_1} (\varepsilon_r - 1) \quad (7.69)$$

Kako su C_o, l_1 i ε_r konstantni, vidimo da kapacitet direktno zavisi od nivoa tečnosti. Indikator G može direktno da pokazuje nivo, a često se taj signal (napon dijagonale BD) odvodi na regulator, koji nivo tečnosti održava konstantnim.

7.3.6 Mjerenje pH faktora

Prema Arenijusovoj teoriji elektrolitičke disocijacije voda razlaže molekule kiselina, baza i soli na jone. Eksperimentalno je utvrđeno da čista voda disocira na 10^{-7} molova vodonikovih jona H^+ i na 10^{-7} molova jona OH^- . Ako je u vodi otopljena kisela supstanca tada je koncentracija H^+ veća, a koncentracija OH^- manja. Obratno, ako je u vodi otopljena bazična supstanca, tada je koncentracija H^+ manja, a koncentracija OH^- veća. Dakle, koncentracija vodonikovih jona H^+ može se uzeti kao mjera za određivanje bazičnosti odnosno kiselosti nekog rastvora. Koncentracija vodonikovih jona izražava se pomoću pH faktora. pH faktor je definisan kao negativan logaritam za osnovu deset od koncentracije vodonikovih jona $pH = -\log_{10} C_{H^+}$ i bezdimenzioni je broj. Kao referentna vrijednost za određivanje bazičnosti ili kiselosti rastvora uzima se, dakle, pH faktor čiste vode: $pH_{H_2O} = -\log 10^{-7} = 7$.

Za neki rastvor konstatujemo da je kiseo ako je njegov $pH < 7$, da je bazičan ako je njegov $pH > 7$, a da je neutralan ako je njegov $pH = 7$. Prema tome, pH faktor se kreće od 0, $pH = 0$ ima normalna kiselina, a $pH = 14$ ima normalna baza.

Električna metoda mjerenja pH faktora svodi se na mjerenje napona E na pH-metru (sl.7.42). Objе elektrode (1) su tzv. vodonikove elektrode, tj. elektrode kojima je površina

prevučena poroznom patinom i zasićena gasovitim vodonikom H_2 . Normalni rastvor (3) sadrži vodonikove jone u koncentraciji $C_{H_o} = 1 \text{ mol/l}$ i nalazi se na temperaturi od $20^\circ C$. Za smanjenje difuzione EMS-e između normalnog rastvora (3) i mjernog rastvora (2) postavlja se tzv. **elektrolitički ključ** (4). Prema Nernstovom zakonu EMS-a E ovakvog elementa je:

$$E = \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \frac{C_H}{C_{H_o}} \quad (7.70)$$

gdje je: $-R=8,317 \text{ (J/K)}$ - univerzalna gasna konstanta;

$-T \text{ (K)}$ - apsolutna temperatura;

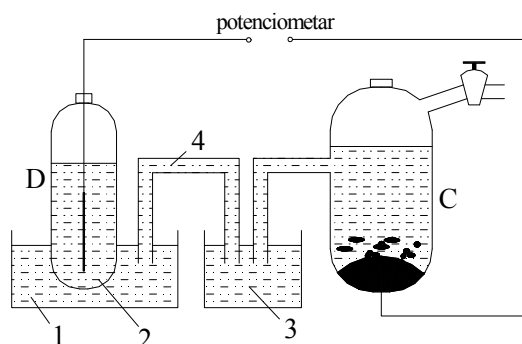
$-n$ - valentnost jona;

$-F=96522 \text{ (C/gr.ekv)}$ - Faradejeva konstanta;

$-C_H \text{ (gr.ekv./l)}$ - koncentracija vodonikovih jona.

Ako parametre za posmatrani pH-metar sa $T=293,2$, $n=1$, $C_{H_o} = 1$ uvrstimo u jednačinu (7.70), i prelazeći sa prirodnog na dekadni logaritam, dobijamo:

$$E = 0,0581 \cdot \log C_H = 0,0581 \cdot pH \quad (7.71)$$



Slika 7.42 pH-metar

Vrijednosti $pH=1$ odgovara dakle, EMS-a $E=0,0581V=58,1mV$. Odnosno, pošto je napon između elektroda linearno zavisian od pH-faktora, vrijednost pH-faktora mjerenog rastvora jednaka je:

$$pH = \frac{E}{0,0581}$$

gdje je E- napon u voltima izmjeren između elektroda.