

Merenja

6. predavanje

Merenja sa analognim mernim instrumentima

Ampermetar sa pokretnim kalemom

Žica namotaja je uobičajeno od bakra čiji je temperaturni koeficijent otpornosti pozitivan (0,4 %/K), tj. otpornost kalema R_K se povećava za 0,4 % pri povećanju temperature za 1 K. U primeni uređaja promene temperature su veće (npr. 10%), pa se otpornost kalema menja i za nekoliko procenata. Neophodno je kompenzovati ove promene. Kompenzacija se vrši otpornikom R_g koji se redno povezuje na namotaj kalema, a ima otpornost nekoliko puta veću od otpornosti samog namotaja i znatno manji temperaturni koeficijent. Zbir otpornosti namotaja i kompenzacionog otpora je unutrašnja otpornost instrumenta

$$R_G = R_g + R_K$$

Kalem instrumenta je od tanke bakarne žice, pa je otpornost vrlo mala, i maksimalna struja, kojoj odgovara pun otklon kazaljke se kreće od $10 \mu\text{A}$ do 1 mA , a samo u izuzetnim slučajevima do 25 mA . Unutrašnja otpornost instrumenta R_G je za te instrumente u opsegu od 5 do 5000Ω . Da bi smo mogli da merimo veće struje neophodno je instrumentu paralelno vezati otpornost. Tu paralelnu otpornost nazivamo šant. Otpornost šanta treba da bude manja od unutrašnje otpornosti instrumenta da bismo mogli da merimo veće struje od gore navedenih vrednosti.

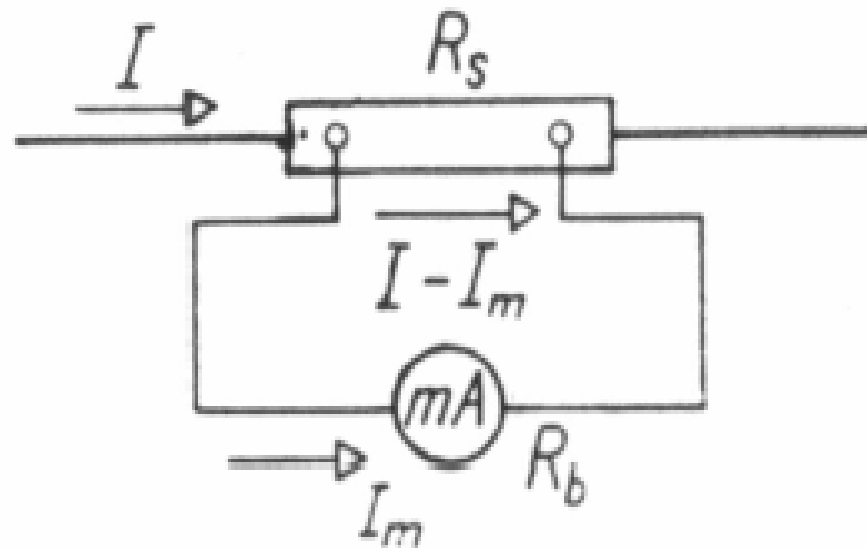
Proširivanje mernog opsega

Povećanje strujne osetljivosti

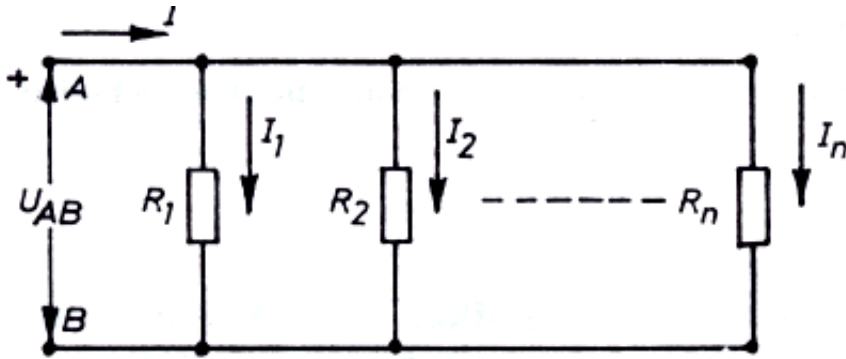
Upotreba šanta

$$R_s(I - I_m) = R_b I_m$$

$$R_s = \frac{I_m}{I - I_m} R_b$$



Delitelj struje



Sl. 13.7 Paralelna veza otpornika.

Priključni napon je moguće dati u sledećem obliku:

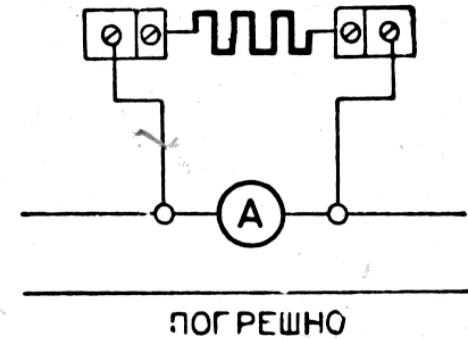
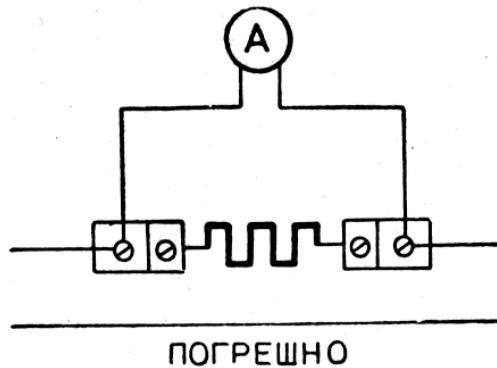
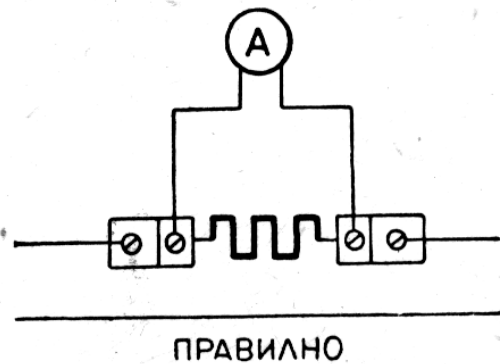
$$U_{AB} = I \cdot R_e \quad \text{ili} \quad U_{AB} = I_k \cdot R_k$$

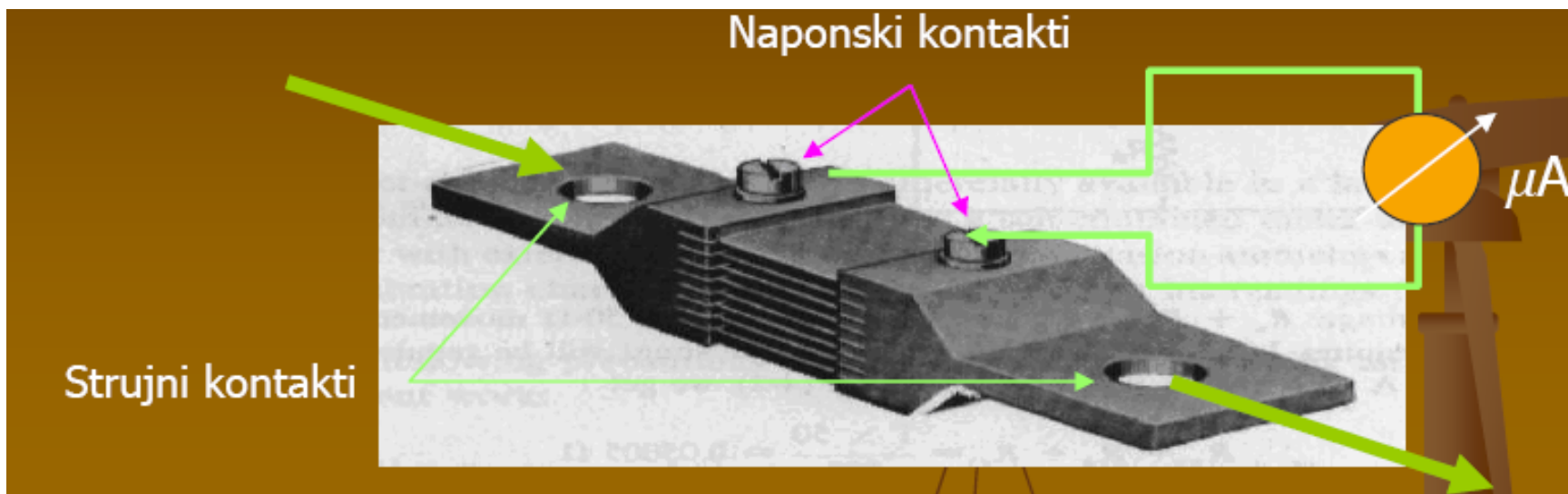
Moguće je izraziti struju kroz bilo koji otpornik u funkciji struje I i vrednosti otpornika koji čine paralelnu vezu:

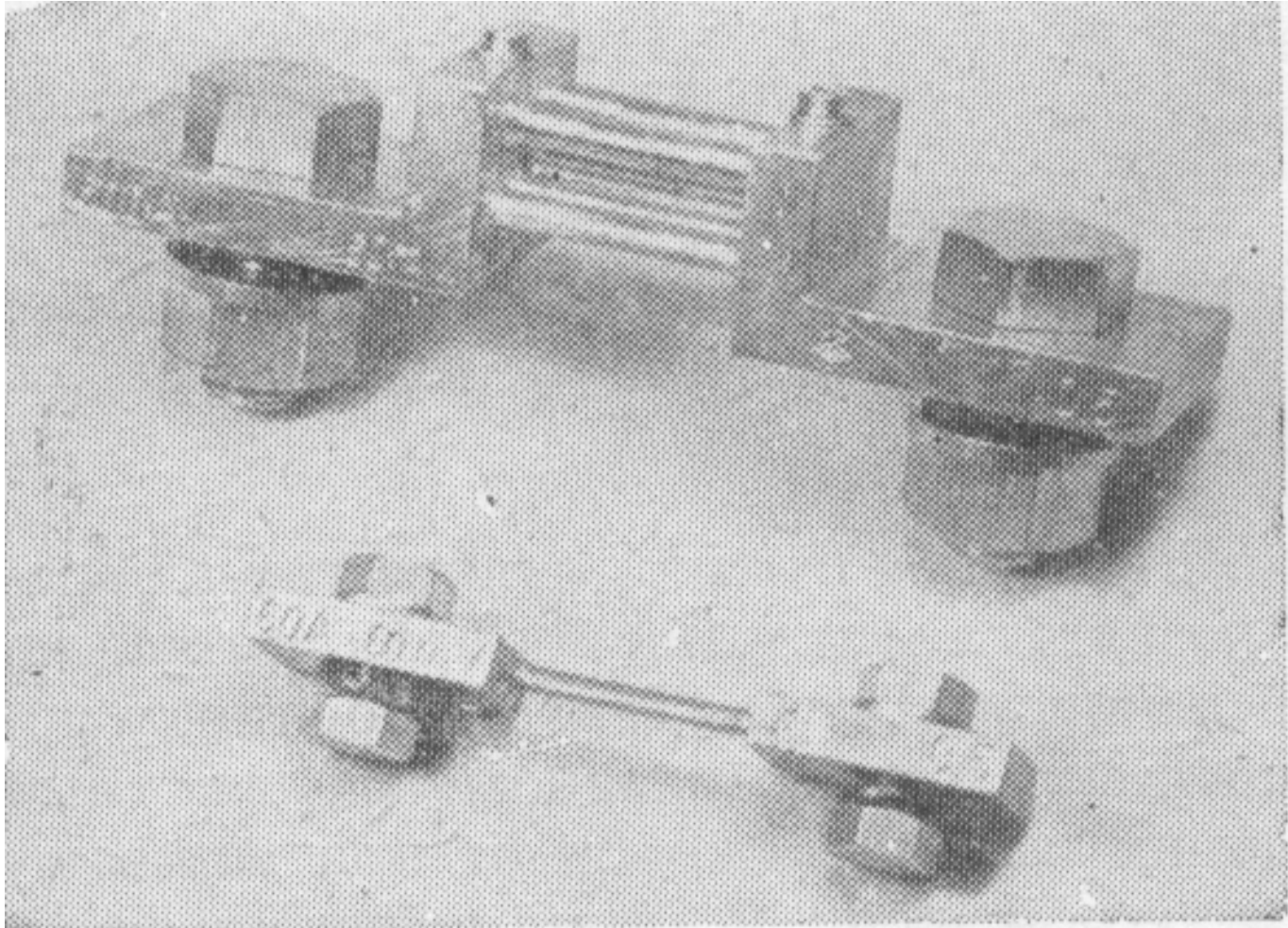
$$I_k = I \cdot \frac{R_e}{R_k}$$
$$I_1 = I \cdot \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}}$$

Šant

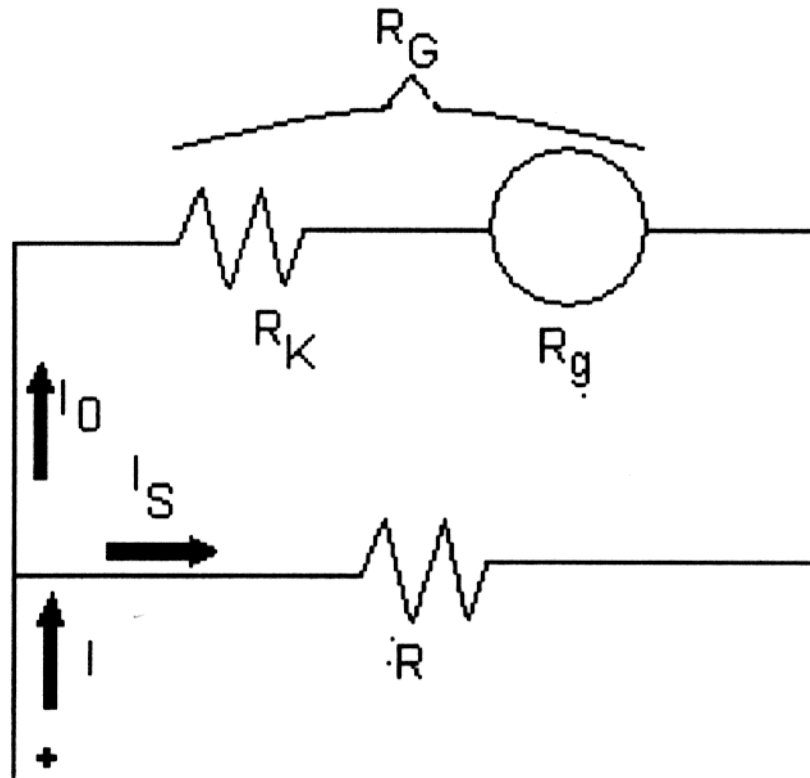
Šant je otpornost koja je vezana paralelno sa instrumentom, čiji je zadatak, da samo deo merene struje teče kroz instrument







Na slici br.1. prikazan je instrument sa pokretnim kalemom. I_0 je struja maksimalnog otklona.



Slika br. 1. Ampermetar i sa njim paralelno vezan šant.

R je otpornost šanta koji je paralelno vezan instrumentu. Sada je otpornost šanta određena maksimalnom strujom koju želimo da merimo I :

$$R = \frac{R_G I_0}{I - I_0}$$

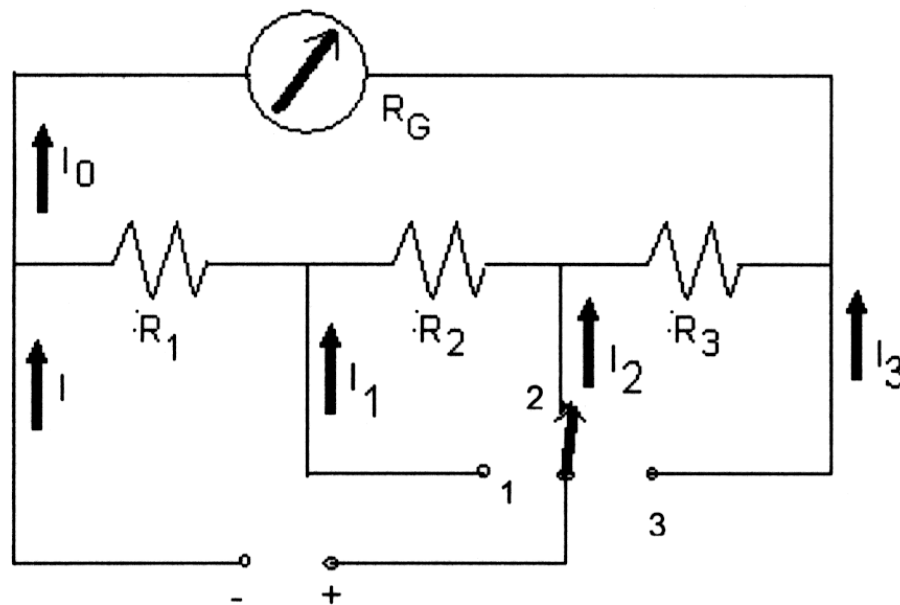
Struja koja prolazi kroz pokretni kalem određuje se iz izraza:

$$I_0 = I \frac{R}{R + R_G}$$

Pokazivanje instrumenta

Srazmernost između merene struje i otklona kazaljke ostaće linearna ukoliko se vrednost izraza $(R/(R+R_G))$ ne menja.

Uobičajeno je da se instrumenti prave sa više opsega merenja, koji se biraju preklopnikom. Od nekoliko poznatih električnih šema najviše se koristi univerzalni ili Eyrtonov šant, koji je prikazan na slici.br.2.



Slika br.2: Eyrtonov šant

Jednostavnim algebarskim operacijama koje se dobijaju primenom Kirhofovih zakona mogu se odrediti otpornosti koje treba koristiti da bi se dobili određeni opsezi za merenje.

Struja kroz instrument ako je preklopnik u položaju 1

$$I_{01} = I \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3 + R_G}$$

Struja kroz instrument, ako je preklopnik u položaju 2

$$I_{02} = I \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R_3 + R_G}$$

Struja kroz instrument, ako je preklopnik u položaju 3

$$I_{03} = I \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_G}$$

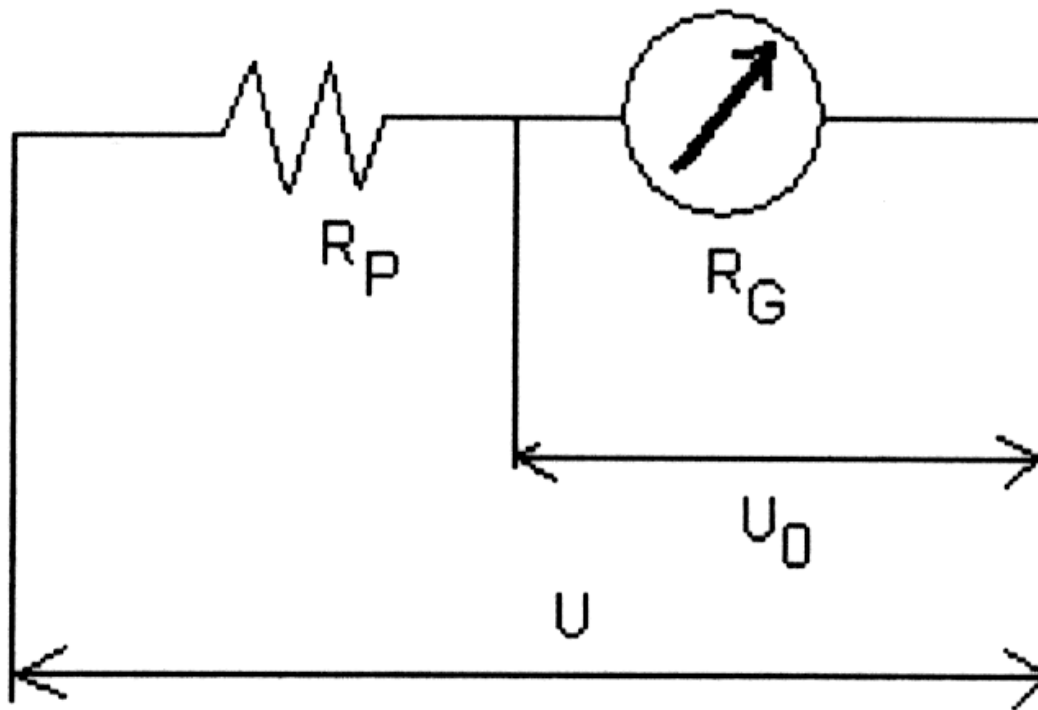
Koristeći prethodne jednačine moguće je za date vrednosti struje I , poznatu unutrašnju otpornost R_G i struju maksimalnog otklona I_0 odrediti otpore R_i , $i = 1, 2, 3$.

Pri merenju struje važno je poštovati sledeća pravila:

- 1. ampermetar vezivati redno u merno kolo**
- 2. poštovati polaritet priključaka**
- 3. na početku merenja ampermetar postaviti u opseg za merenje najvećih struja, a zatim po potrebi smanjivati opseg**
- 4. merenje obavljati u poslednjoj trećini skale.**

Ampermetri se prave za različite opsege merenja od $0,1 \mu\text{A}$ do 20 A , a za posebne potrebe i za mnogo veće opsege. Za merenje većih struja tzv. šant otpornik se postavlja van kućišta, dok je za manje struje šant u kućištu instrumenta. Klasa tačnosti ampermetara sa pokretnim kalemom je uobičajeno u opsegu od $0,1$ do $2,5$.

Voltmetar sa pokretnim kalemom



Slika br.3: Voltmetar

Instrument sa pokretnim kalemom služi za merenje jednosmerne struje. Posredno se može iskoristiti i za realizaciju voltmetra za merenje jednosmernog napona tako da nepoznati napon priključimo na poznatu otpornost i merimo struju. Ovom slučaju potrebno je povećati unutrašnju otpornost instrumenta. Merenje napona se isključivo vrši paralelno potrošaču, pa je potrebno da unutrašnja otpornost instrumenta bude mnogo veća od otpornosti potrošača, da bi struja kroz potrošač zapravo bila nepromenjena.

Najveći napon koji možemo priključiti an ampermetar je:

$$U_0 = R_G I_0$$

pa koristeći napred navedene vrednosti za struju maksimalnog odklona I_0 i unutrašnju otpornost instrumenta R_G dobijamo U_0 u opsegu koji je manji od 1 V.

Povezivanjem predotpornika dobijamo prošireni opseg za merenje i on iznosi:

$$U = (R_p + R_G) I_0$$

odakle je lako izračunati otpornost R_p koje treba koristiti za proširenje opsega .

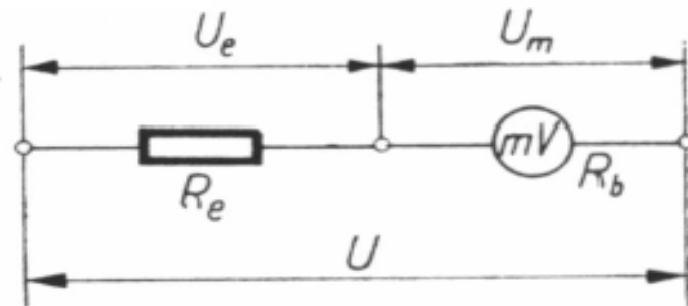
Koristeći oznake na slici br.3, prethodna jednačina dobija oblik:

$$R_p = \frac{R_G}{U_0} (U - U_0) \qquad R_p = \frac{U}{I_0} - R_G$$

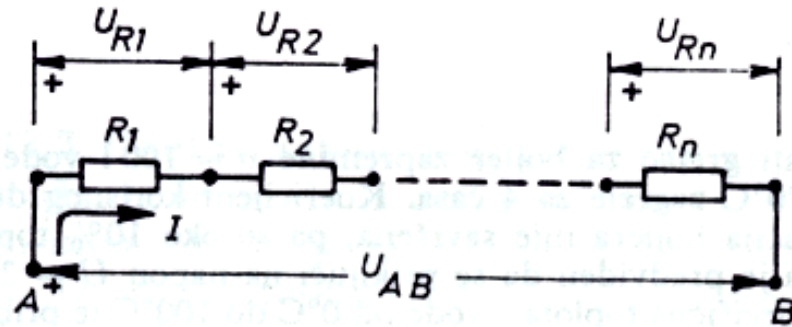
Pri ovome U_0 je napon punog otklona ampermetra za jednosmernu struju sa pokretnim kalemom. Količnik R_G/U_0 nazivamo karakteristična otpornost voltmetra. Ova veličina se izražava u Ω/V i odgovara otpornosti predotpornika kojim se postiže puno skretanje mernog opsega voltmetra za 1 V. Tipične vrednosti karakteristične otpornosti su između 200 Ω/V do 200 $k\Omega/V$, koje odgovaraju struji otklona od 5 mA do 5 μA .

Upotreba predotpornika:

$$R_e = \frac{U}{I_m} - R_b$$



Delitelj napona



Sl. 13.6 Redna veza otpornika.

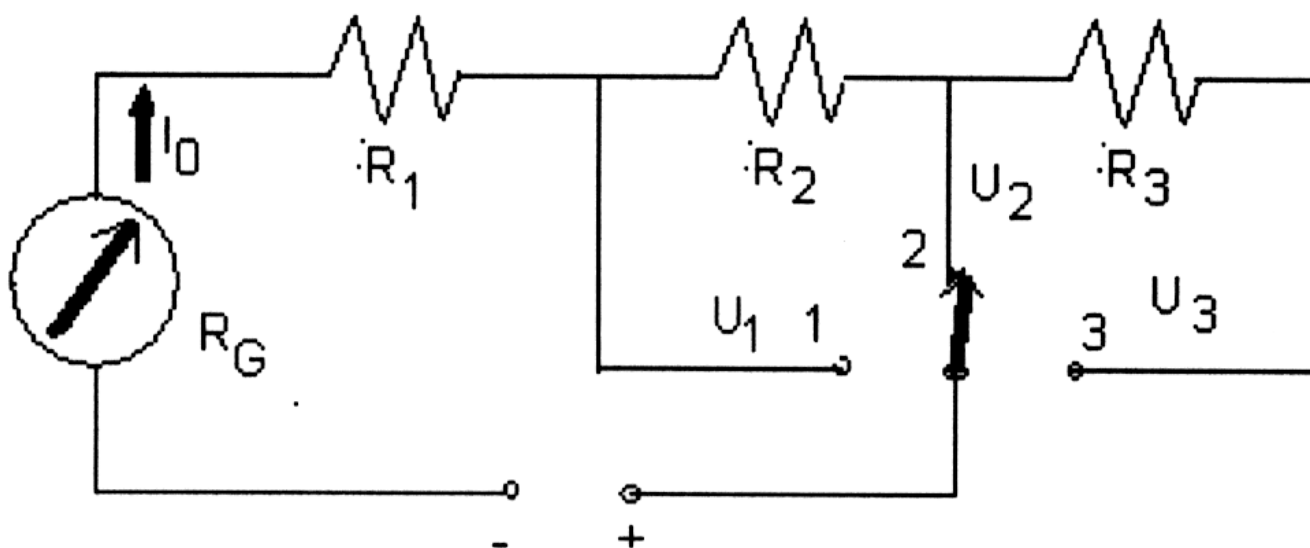
Struju možemo pisati sledećim formulama:

$$I = \frac{U_{AB}}{R_e} \quad \text{ili} \quad I = \frac{U_k}{R_k}$$

Moguće je izraziti napon na priključcima bilo kojeg otpornika u funkciji napona U_{AB} i vrednosti otpornika koji čine rednu vezu:

$$U_k = U_{AB} \cdot \frac{R_k}{R_e}$$
$$U_1 = U_{AB} \cdot \frac{R_1}{\sum_{k=1}^n R_k}$$

Slično ampermetrima i voltmetri se prave tako da rade u više opsega, a na slici br.4. je prikazana najčešća šema povezivanja predotpornika



Slika br.4: Voltmetar sa predotpornicima

Treba koristiti što je moguće veću otpornost voltmetra da se ne bi menjao režim rada u strujnom kolu u kome se meri napon, ali to može da dovede do toga da skretanje bude u prvoj trećini u kojoj su greške najveće, pa zato treba izmeriti napon u više mernih opsega i proceniti grešku koju unosi voltmetar pri merenju.

Voltmetri za merenje jednosmernog napona se koriste za merenje napona od 50 mV do 500 V sa predotpornicima koji su ugrađeni u kućište, dok za merenje većih napona koriste posebni priključci na voltmetru, koji omogućuju primenu spoljnih predotpornika.

Klasa tačnosti ovih voltmetara sa pokretnim kalemom je uobičajeno u opsegu od 0,1 do 2,5.

Pri merenju napona voditi računa o sledećim pravilima:

1. voltmetar vezivati paralelno u merno kolo ,
2. voditi računa o polaritetu priključaka,
3. merenje treba obavezno započeti sa preklopnikom u položaju koji omogućuje merenje najvećih napona, tj. na najvećem opsegu,
4. merenje obavljati u poslednjoj trećini skale.

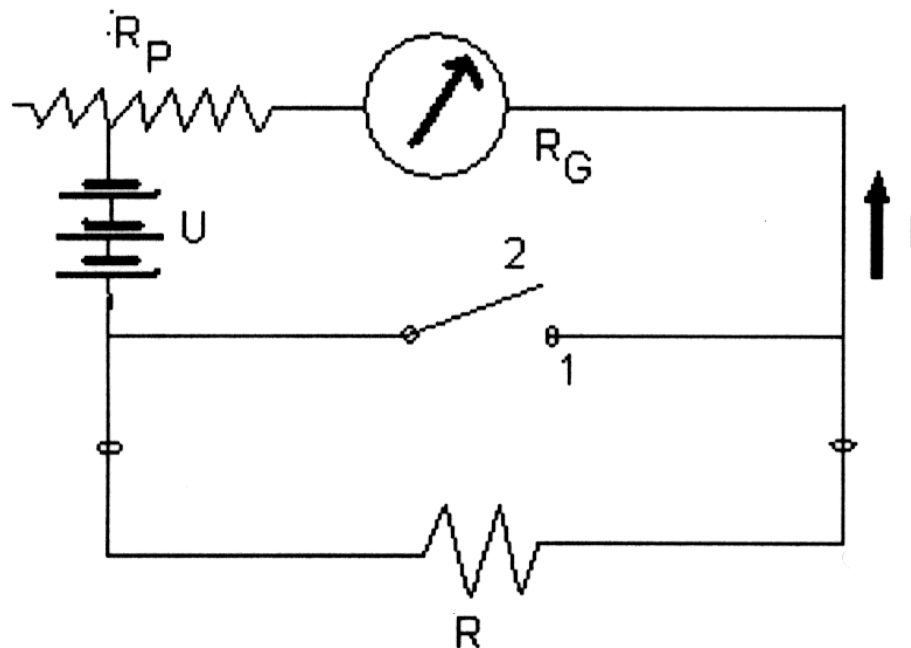
Ommetar sa pokretnim kalemom

Ukoliko se u rednom električnom kolu nalaze:

- izvor koji se ponaša kao idealan naponski izvor,
- ampermetar, i
- otpornik

tada će skretanje kazaljke ampermetra zavisiti samo od vrednosti otpornika, pošto su svi ostali elementi nepromenljivi. Skretanje instrumenta, tj. struja koju meri ampermetar je određena Omovim zakonom, $I = U / R$. Ova činjenica omogućava da primenjujemo ampermetar sa pokretnim kalemom u kolu jednosmerne struje za merenje otpora na za to baždarenoj skali. S obzirom da je otpornost nepoznatog otpornika R inverzno proporcionalna struji, skala instrumenta je nelinearna.

Instrument pokazuje otpornost $R = 0$, kada je merno kolo, koje sadrži pomenuti naponski izvor i ampermetar, u kratkom spoju. U ovom slučaju imamo puno skretanje, pa struja maksimalnog otklona odgovara otporu $R = 0$. Struja minimalnog otklona, tj. $I = 0$ odgovara otvorenom kolu.



Jednostavna konstrukcija prikazana na slici uključuje i otpornik R_p u rednom kolu, kao i prekidač.

Postavljanjem prekidača u položaj "1" formiramo redno kolo u kome podešavanjem promenljivog otpornika R_p podesimo da skretanje bude maksimalno, tj. pokazivanje ampermetra unutrašnje otpornosti R_G jednako struji maksimalnog otklona. Prekidač u položaju "1" je ekvivalentan priključivanju spoljnog nepoznatog otpora koji ima otpornost 0Ω , tj. $R = 0$.

Prebacivanjem preklopnika u položaj "2" odnosno otvaranjem prekidača ostaje nam kolo u kome struja odgovara ukupnoj otpornosti koja uključuje i nepoznatu otpornost R .

Na osnovu ovih razmatranja imamo sledeće jednačine:

$$I_0 = \frac{U}{R_p + R_G}, \quad I = \frac{U}{R + R_p + R_G}$$

Ako obeležimo odnos struje I u kolu kada je prekidač u položaju "2", i struje I_0 sa α (ugao skretanja kazaljke instrumenta), tj. $\alpha = I / I_0$, i izrazimo otpornost podešljivog otpornika R_p preko: napona izvora, struje maksimalnog otklona i unutrašnjeg otpora (nepromenljivih veličina u kolu)

$$R_p = \frac{U}{I_0} - R_G > 0$$

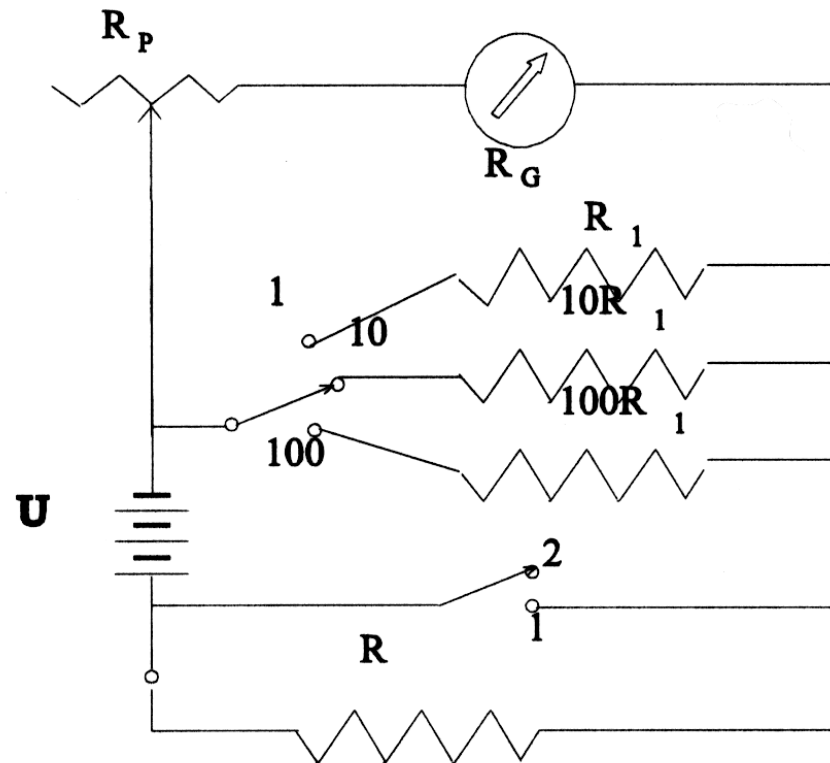
dobijamo konačni izraz za nepoznatu otpornost

$$R = \frac{U}{I_0} \frac{1 - \alpha}{\alpha}$$

Koristeći ovu jednačinu vrši se graduisanje (baždarenje) skale instrumenta sa pokretnim kalemom tako da na skali direktno čitamo vrednost otpora.

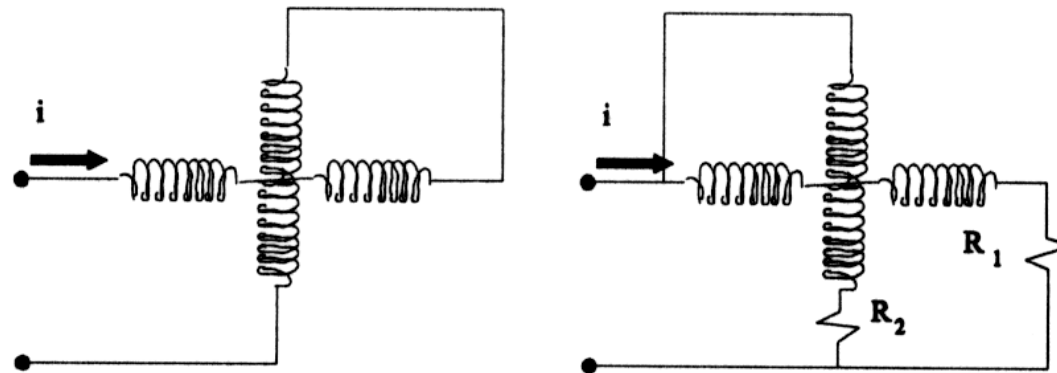
Podešavanje instrumenta je obavezno pre početka merenja, specijalno zbog toga što primenjena baterija u toku vremena menja napon.

Slično ampermetrima i voltmetrima, i ommetri se prave sa više opsega. Tipična konstrukcija ommetra sa tri skale je prikazana na slici.



Elektrodinamički ampermetar

Elektrodinamički ampermetar se realizuje tako što se nepokretni i pokretni kalem instrumenta redno povežu.



sl. 18: Šema elektrodinamičkog ampermetra

S obzirom na rednu vezu, struje u kalemima su jednake ($i_1 = i_2 = i$), a fazna razlika je $\phi = 0$, pa dobijamo :

$$\alpha = \frac{k}{D} I^2$$

Ista formula važi i pri merenju jednosmerne struje. Otklon kazaljke je proporcionalan kvadratu efektivne vrednosti naizmenične veličine. Ovaj instrument se koristi kao miliampermetar.

Za merenje većih vrednosti struje pokretni i nepokretni kalem se vezuju paralelno, i dodaju se otpornosti R_1 i R_2 redno sa nepokretnim i pokretnim kalemom.

- . Označimo zbir otpora nepokretnog kalema i sa njim redno vezanog otpora R_1 sa R_{11} i zbir otpora pokretnog kalema i sa njim redno vezanog otpora R_2 sa R_{22} . Struja I se deli na namotajima:

$$I_1 = I \frac{R_{22}}{R_{11} + R_{22}} \quad I_2 = I \frac{R_{11}}{R_{11} + R_{22}}$$

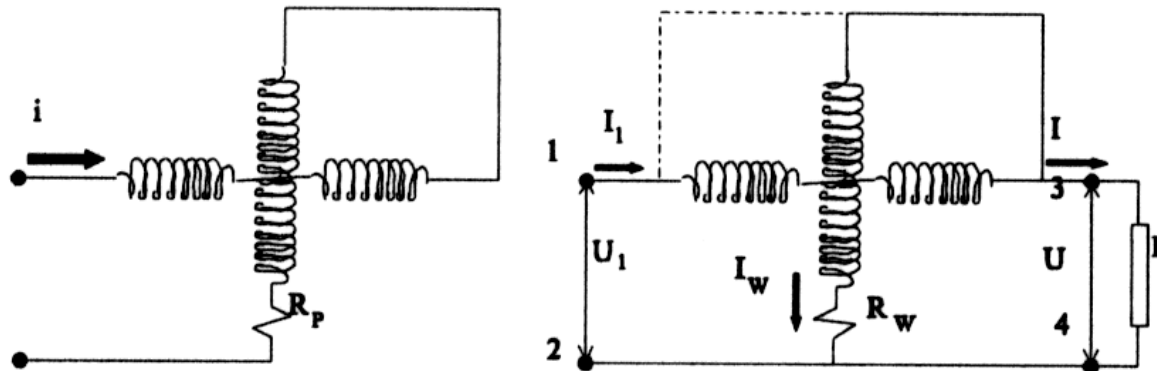
za skretanje instrumenta dobijamo:

$$\alpha = \frac{k}{D} I \frac{R_{22}}{R_{11} + R_{22}} I \frac{R_{11}}{R_{11} + R_{22}} = \frac{k}{D} \frac{R_{11} R_{22}}{(R_{11} + R_{22})^2} I^2$$

Merni opseg elektrodinamičkih ampermetara je od 30 mA do 20-50 eventualno do 100 A. Veće struje se mere pomoću strujnih transformatora.

Elektrodinamički voltmetar

Elektrodinamički voltmetar se realizuje u skladu sa šemom prikazanoj na slici i u ovom slučaju su kalemovi redno vezani (leva slika), a otpornost R_p ima cilj da povećava maksimalni napon koji može da se merni ovim voltmetrom.



sl. 19: Šema elektrodinamičkog voltmetra

Ugao skretanja je proporcionalna kvadratu efektivne vrednosti priključenog naizmeničnog napona. Ista formula važi i za jednosmerne napone.

$$\alpha = \frac{k U^2}{D R_v^2}, \quad R_v = R_p + R_k$$

Pri ovome je R_k otpornost kalema, R_p otpornost priključenog otpora za povećanje opsega primenljivosti, a U efektivna vrednost primenjenog naizmeničnog napona. Priključeni otpor ima pored proširenja opsega i dve druge funkcije: smanjenje greške usled promene temperature, i smanjenje uticaja induktivnosti pri merenju naizmeničnih veličina visokih učestanosti. Opseg merenja je od 5 do 600 V, a potrošnja je relativno velika u odnosu na instrumente sa pokretnim kalemom.

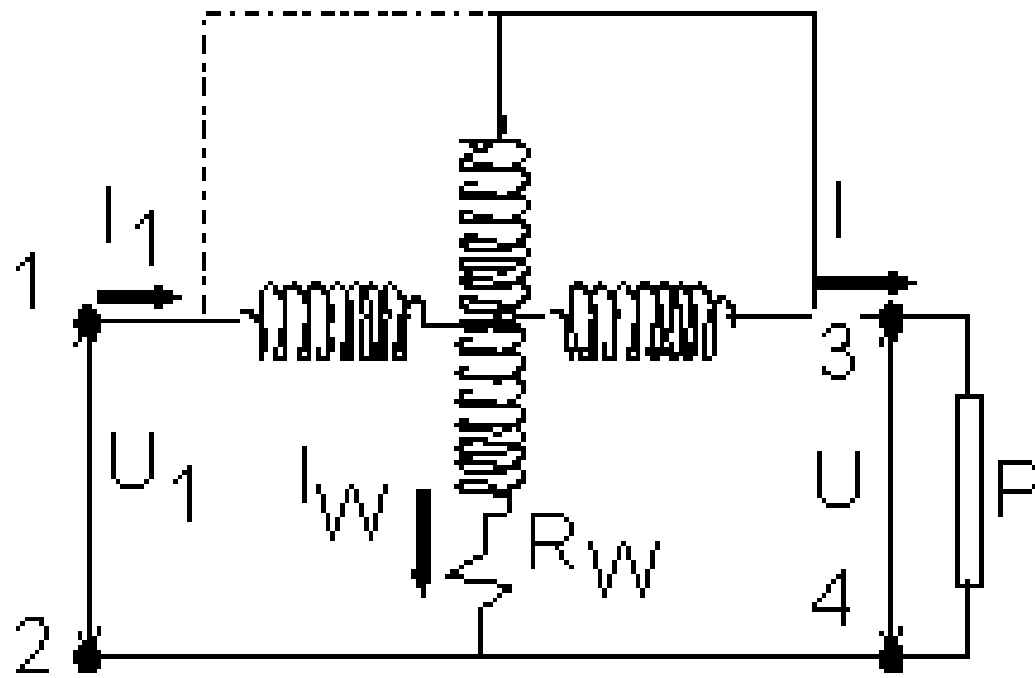
Elektrodinamički vatmetar

Elektrodinamički vatmetar (merenje aktivne snage prijemnika) je uređaj koji je šematski prikazan na slici (zajedno sa voltmetrom).

U ovom slučaju je:

$$\alpha = \frac{k}{D} I_1 I_2 \cos \phi = \frac{k}{D} I \frac{U}{R_w} \cos \phi = \frac{k}{D} \frac{1}{R_w} P$$

što znači da je otklon kazaljke proporcionalan aktivnoj snazi prijemnika. Instrument ima linearnu skalu. Slične napomene važe kao i za merenje jednosmerne struje.

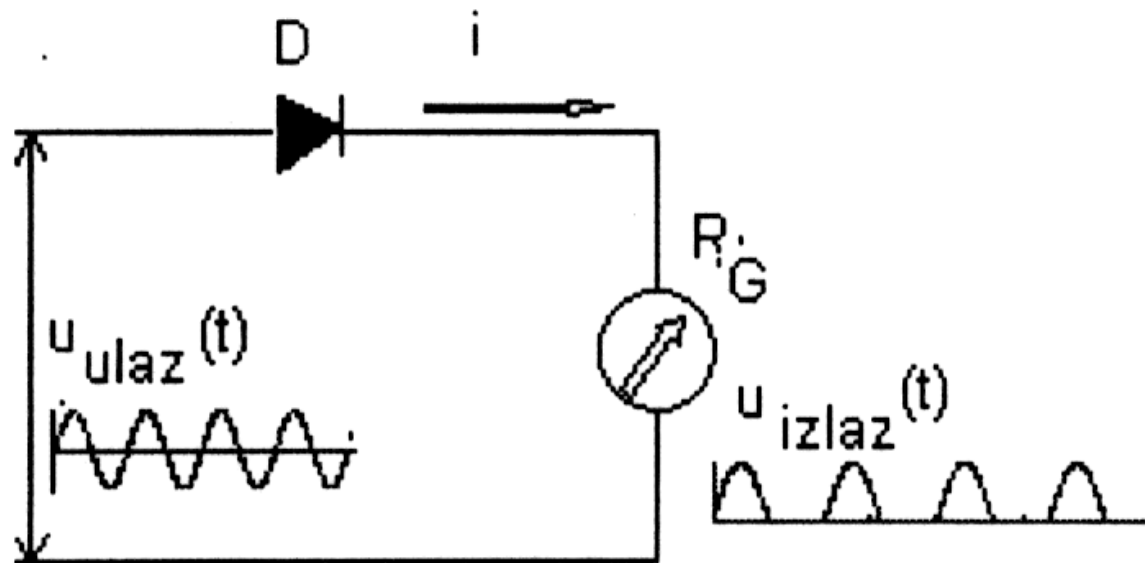


Ispravljači

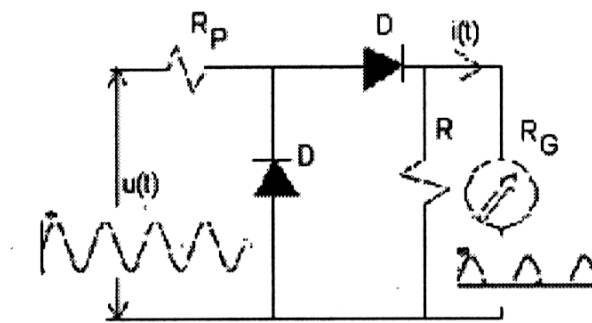
Da bismo mogli da primenimo instrumente sa pokretnim kalemom za merenje vremenski promenljive električne veličine obavezno je da struju ili napon, koja povremeno menja smer, a stalno menja intenzitet pretvorimo u jednosmernu vremenski promenljivu veličinu.

Na slici je prikazan oblik struje koju registruje ampermetar koji je redno vezan u kolo sa diodom ako su promene napona spore u odnosu na inercijalne karakteristike sistema sa pokretnim kalemom.

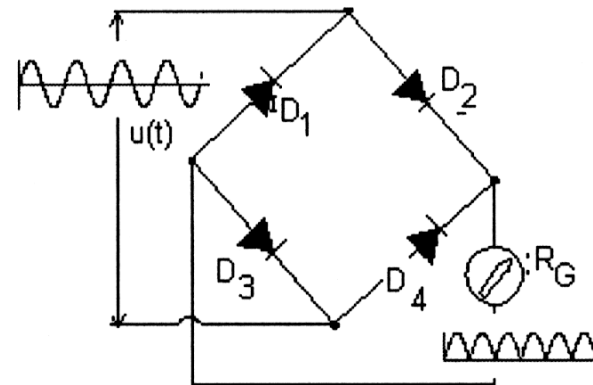
Treba primetiti da je u ovom kolu struja u fazi sa naponom, i da na izlazu napon postoji samo kada je primenjeni napon $u(t)$ veći od napona polarizacije.



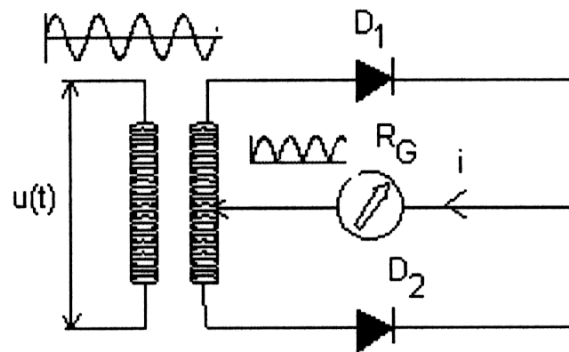
Ukoliko je napon brzo promenljiv u odnosu na inercijalne karakteristike instrumenta sa pokretnim kalemom, instrument će pokazivati srednju vrednost struje u kolu.



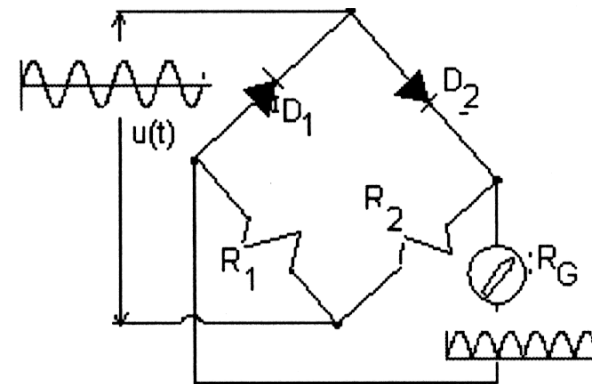
slika 3



slika 4



slika 5

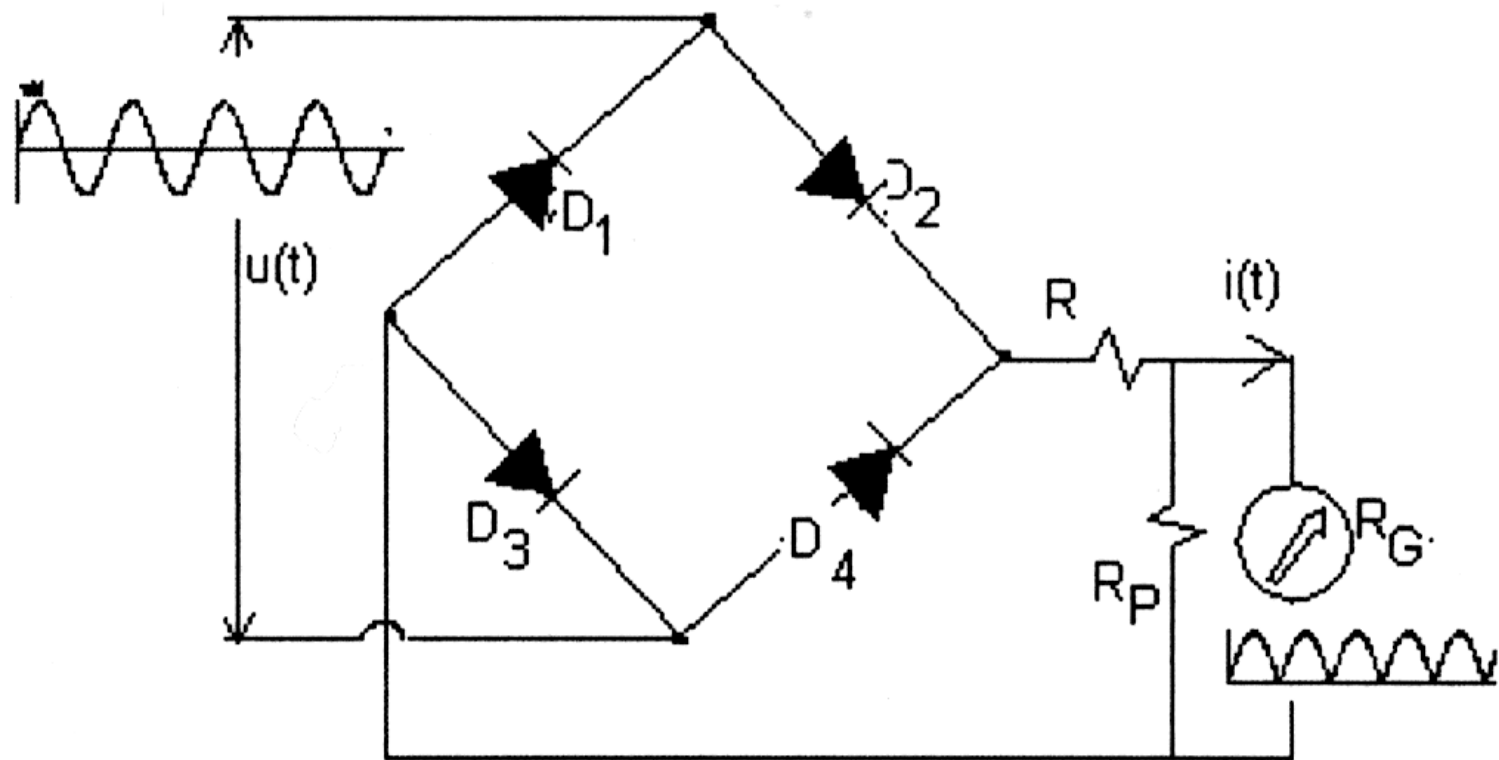


slika 6

- sl. 3: Voltmetar sa jednostranim ispravljanjem za merenje naizmeničnih veličina,
- sl. 4: Šema Grecovog spoja sa četiri diode,
- sl. 5: Šema dvostranog ispravljača sa dve diode i transformatorom,
- sl. 6: Šema dvostranog ispravljača sa dve diode i dva otpornika.

Jednostavnim povezivanjem dve ili četiri diode, i primenom transformatora sa dve diode, ili Grecovog spoja (četiri diode ili dve diode i dva otpornika) možemo da merimo dvostrano ispravljeni signal.

Ovaj spoj omogućuje da u periodu pozitivne poluperiode vodi jedan par dioda, ili dioda i otpornik, dok u periodu negativne poluperiode provode preostale dve komponente u sistemu. U električnom kolu sa transformatorima provodi ili jedna ili druga dioda u zavisnosti od polarizacije. Pri merenju Grecov spoj ima prednosti u odnosu na druga dva rešenja, iako postoji pad napona na diodama (napon direktne polarizacije na dve redno vezane diode).



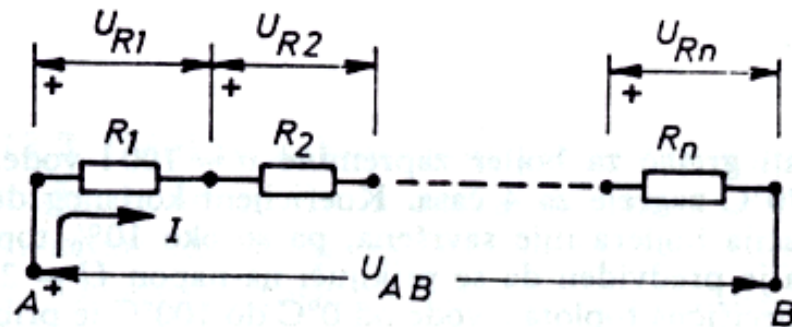
sl. 7: Šema voltmetra sa Grecom i instrumentom sa pokretnim kalemom

Potpuno analogno mernim instrumentima za merenje jednosmernih napona i struja i instrumenti sa pokretnim kalemom za merenje naizmjeničnih veličina se prave za više mernih opsega, a i u ovom slučaju se koriste otpornici kao što je to ranije pokazano (Eyrtonov šant).

Komercijalni ampermetri i voltmetri omogućuju merenje struja u opsegu od 0,1 mA do 6 A, i napona u opsegu od 1 do 1000 V. Frekvencijski opseg ovih instrumenata je ograničen na približno 20 kHz.

Najveći nedostatak ovih instrumenata je greška i sistematsko odstupanje rezultata za signale koji nisu prostoperiodičnog oblika.

Delitelj napona



Sl. 13.6 Redna veza otpornika.

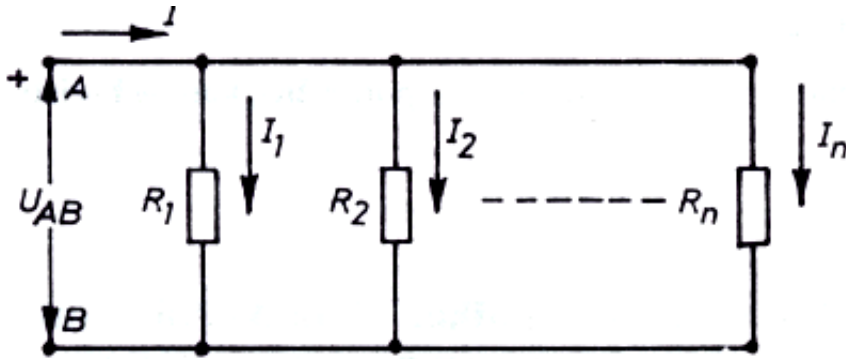
Struju možemo pisati sledećim formulama:

$$I = \frac{U_{AB}}{R_e} \quad \text{ili} \quad I = \frac{U_k}{R_k}$$

Moguće je izraziti napon na priključcima bilo kojeg otpornika u funkciji napona U_{AB} i vrednosti otpornika koji čine rednu vezu:

$$U_k = U_{AB} \cdot \frac{R_k}{R_e}$$
$$U_1 = U_{AB} \cdot \frac{R_1}{\sum_{k=1}^n R_k}$$

Delitelj struje



Sl. 13.7 Paralelna veza otpornika.

Priključni napon je moguće dati u sledećem obliku:

$$U_{AB} = I \cdot R_e \quad \text{ili} \quad U_{AB} = I_k \cdot R_k$$

Moguće je izraziti struju kroz bilo koji otpornik u funkciji struje I i vrednosti otpornika koji čine paralelnu vezu:

$$I_k = I \cdot \frac{R_e}{R_k}$$
$$I_1 = I \cdot \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k} R_1}$$