

Merenja

5. predavanje

Električni merni instrumenti

Električne merne instrumente na bazi fizičkih osnova rada možemo podeliti u sledeće grupe:

- Elektromehančki instrumenti
- Analogni elektronski instrumenti i
- Digitalni elektronski instrumenti.

Elektromehančki instrumenti

Osnovni princip rada je mehaničko dejstvo merene veličine na pokretni deo instrumenta. Za to potrebna energija se uzima iz mernog kruga i zato nije potreban sopstveni izvor električne energije. To je velika prednost a istovremeno i mana, pošto oduzeta energija utiče na mereni objekt i ograničava osteljivost instrumenta.

Analogni elektronski instrumenti

- Sastoje se od osnovnih elektronskih strujnih krugova, koji zahtevaju vanjski izvor energije. Ovi instrumenti uzimaju neznatnu količinu energije iz mernog kruga i zato jedva utiču na iste.
- Prikaz podataka kod ovakvih instrumenata je pomoću elektromehaničkog instrumenta sa kazaljkom, ali postoje i uređaji sa katodnim cevima.

Digitalni elektronski instrumenti

- Mereni signal obrađuju pomoću digitalnih strujnih krugova u digitalnom obliku. Potreban im je vanjski izvor energije. Iz mernog kruga obično uzimaju neznatnu količinu energije. Postoje instrumenti koji u toku mernog ciklusa rade isključivo na bazi digitalnih mernih načela. Kod nekih drugih instrumenata ima i analognih strujnih krugova.

Elektromehančki instrumenti

- Elektromehančki instrumenti energiju koja potiče od merene električne veličine pretvaraju u električno ili mehaničko dejstvo. Najčešće koriste elektromehaničko dejstvo električne struje gde struja i magnetno polje generišu mehaničku silu, koja pokreće kazaljku ispred skale, s čime je omogućeno očitavanje vrednosti električne veličine

Osnovne vrste električnih mernih instrumenata

Magnetoelektrični

Primena:

- Merenje jednosmerne struje

Dejstvo

- Između struja i stalnog magneta

Primeri

- Instrument sa pokretnim kalemom
- Instrument sa unakrsnim kalemom
- Instrument sa pokretnim magnetom

Feromagnetni

Primena:

- Merenje jednosmerne i naizmenične struje

Dejstvo

- Između struje i komada gvožđa

Primeri

- Instrument sa pokretnim gvožđem

Elektrodinamički

Primena:

- Merenje jednosmerne i naizmenične struje

Dejstvo

- Između dve struje

Primeri

- Elektrodinamički instrument
- Ferodinamički instrument

Termoelektrični

Primena:

- Merenje jednosmerne i naizmenične struje

Dejstvo

- Termičko dejstvo struje

Primeri

- Instrument sa zagrevanom žicom
- Bimetalni instrument
- Instrument sa termopretvaračem

Elektrostatički

Primena:

- Merenje jednosmerne i naizmenične struje

Dejstvo

- Elektrostatičko polje

Primeri

- Multicelularni voltmetar

Indukcioni

Primena:

- Merenje jednosmerne i naizmenične struje

Dejstvo

- Naizmenično elektromagnetsko polje

Primeri

- Indukcioni instrument



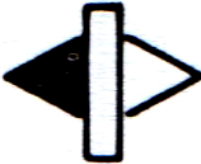
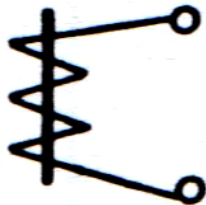
U ovom izlaganju pažnja je posvećena instrumentima sa:

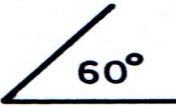


- pokretnim kalemom,
- pokretnim gvoždem i
- elektrodinamičkim instrumentima

Na instrumentu su uobičajeno navedeni osnovni elementi o instrumentu: klasa tačnosti, vrsta struje koju instrument meri (jednosmerna, naizmjenična) probojni napon, položaj instrumenta pri merenju i slično.

~ 1.5 L ☆



Instrument sa pokretnim kalemom	
Instrument sa unakrsnim kalemima	
Instrument sa pokretnim magnetom	
Instrument sa pokretnim gvožđem	

Instrument za horizontalni položaj	
Instrument čija skala stoji koso prema horizontali	
Istosmerna struja	
Naizmjenična struja	
Istosmerna i naizmjenična struja	
Trofazna naizmjenična struja	
Klasa tačnosti u procentima mernog opsega	1,5

Princip rada

Osnovni princip rada je mehaničko dejstvo merene veličine na pokretni deo instrumenta. Ovo dejstvo rezultuje relativnom kretanjem pokretnog dela sa pričvršćenom kazaljkom u odnosu na nepokretni deo instrumenta. Otklon kazaljke zavisi direktno od merene veličine. Da bi kazaljka bila stabilna neophodno je mehaničkom konstrukcijom obezbediti da pri delovanju električne sile kazaljka ostane u ravnomernom položaju. To se najčešće realizuje mehaničkom oprugom. Otporni momenat vraća kazaljku u nulti položaj kada su ulazi otvoreni tj. Kada na ulaz instrumenta ne dovodimo električnu veličinu.

U instrument se ugrađuje i sistem koji prigušuje oscilacije kazaljke, dejstvo tog sistema nazivamo prigušni momenat.

Umesto „materijalne” kazaljke u nekim instrumentima se koristi svetlosno mlaz, jer se time umanjuje inercija pokretnog dela što je vrlo povoljno za merenje jako malih električnih veličina.

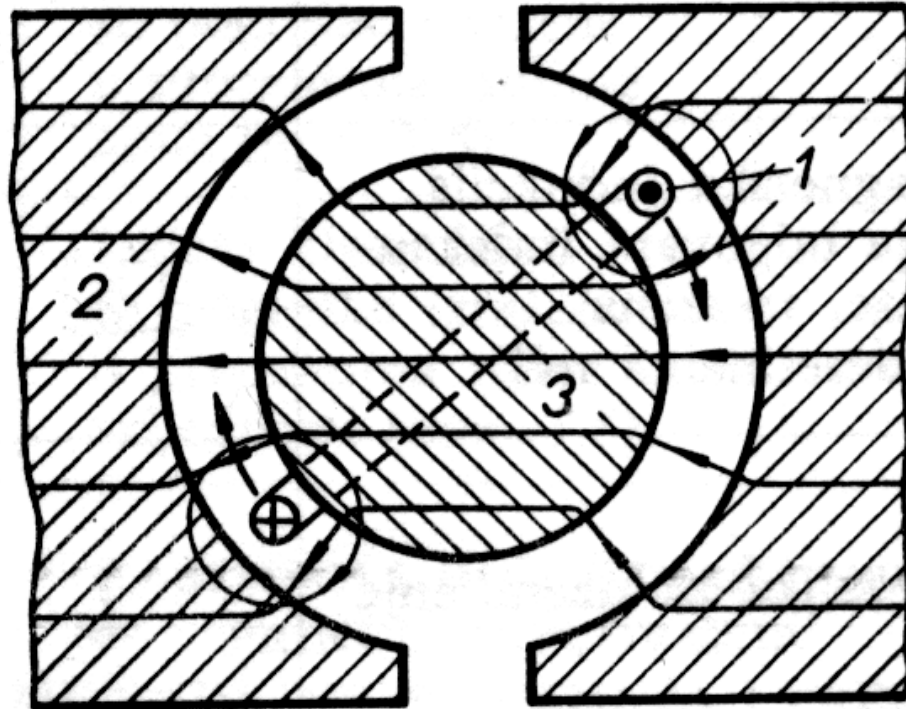
U instrumente veće tačnosti se uvek ugrađuju vrlo tanke kazaljke (npr. nit, svetlosni mlaz)

Skale mogu biti baždarene na razne načine zavisno od potrebe (linearne, eksponencijalne, logaritamske, kvadratne i sl.) Linearna skala ima sasvim jasne prednosti, a očitavanje uvek treba vršiti u drugoj i trećoj trećini. Za merenje malih veličina je pogodna logaritamska skala, dok za očitavanje u trećoj trećini veća rezolucija kvadratne skale u odnosu na linearnu.

Instrument sa pokretnim kalemom i nepokretnim magnetom (Deprez)

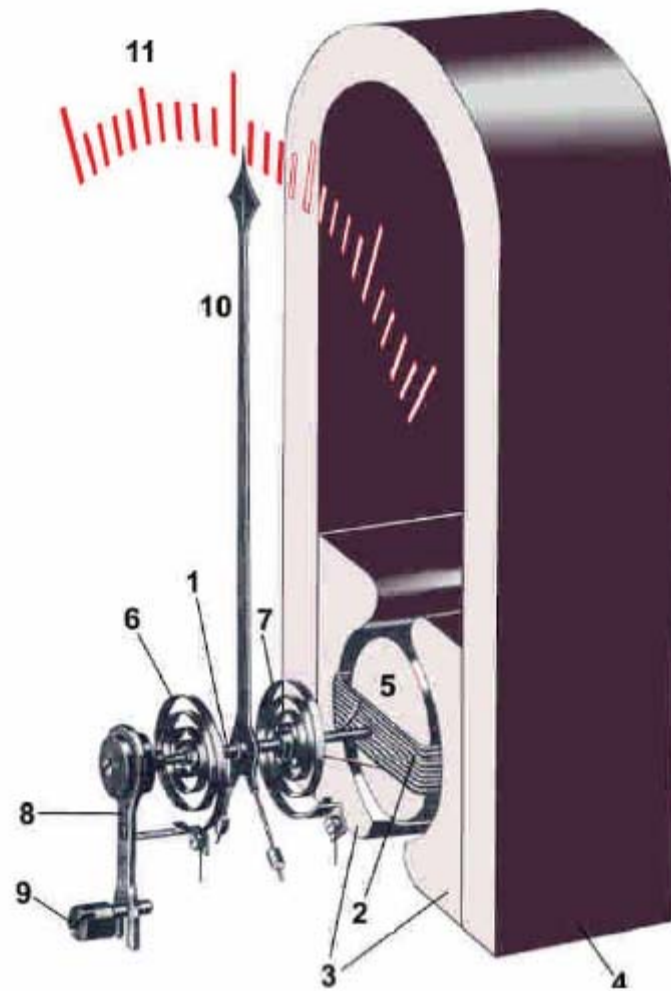
Pokretni kalem u čijim provodnicima teče merena struja nalazi se u (homogenom) magnetnom polju stalnog magneta. Ukoliko u magnetnom polju indukcije B , u provodniku dužine l , teče struja I , onda upravno na B i I nastaje elektromehaničko delovanje sile.

Deo, na slici obeleženo sa (3), je od magnetskog materijala. Na slici su prikazane linije magnetske indukcije B . Pokretni deo je sklop kruto vezane kazaljke i namotaja.



Slika 4.32. Osnovni raspored instrumenta s pomičnim svitkom

1 pomični svitak; 2 polovi permanentnog magneta; 3 jezgra od meka željeza



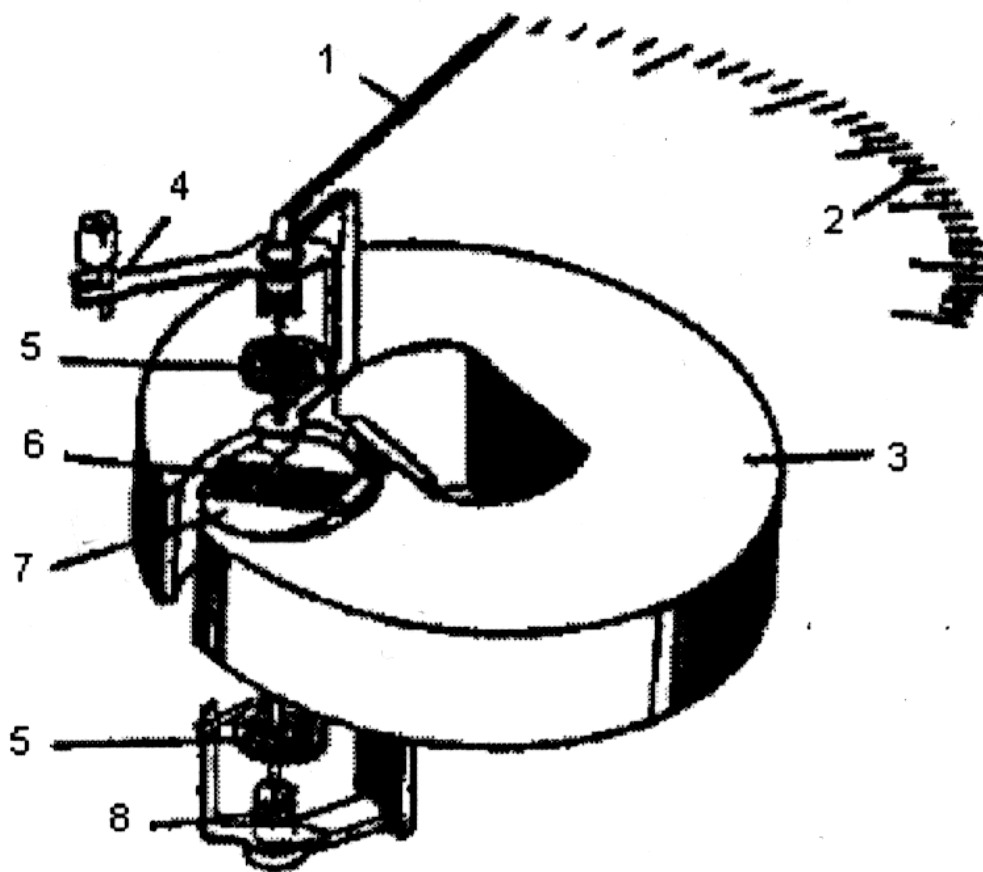
Konstrukcija instrumenta sa pokernim kalemom

Na namotaj deluje sila koja se može izraziti formulom:

$$F = NIBl$$

gde je:

- N - broj namotaja,
- B - magnetska indukcija koja potiče od stalnog magneta,
- I - jačina struje kroz namotaj, i
- l - dužina strane pravougaonika koja je upravna na radijalno magnetsko polje



1 – kazaljka, 2 – skala, 3 – stalni magnet, 4 – podešavanje nultog položaja kazaljke, 5- spiralna opruga, 6 – pokretni kalem, 7 – jezgro od mekog gvoždja, 8 – ležaj osovine pokretnog kalema

Magnetski moment koji deluje na pokretni deo instrumenta

$$M_1 = \Phi_0 I$$

proporcionalan jednosmernoj struji kroz kalem.

Magnetskom momentu se suprotstavlja otporni moment (opruga) koja se bira tako da momenat bude linearno zavistan od ugla okretanja. Shodno tome, momenat je :

$$M_2 = -D\alpha$$

gde je:

- D -krutost,
- α -ugao obrtanja kalema

U ravnotežnom položaju je zbir momenata u odnosu na osu obrtanja

$$M_1 + M_2 = 0$$

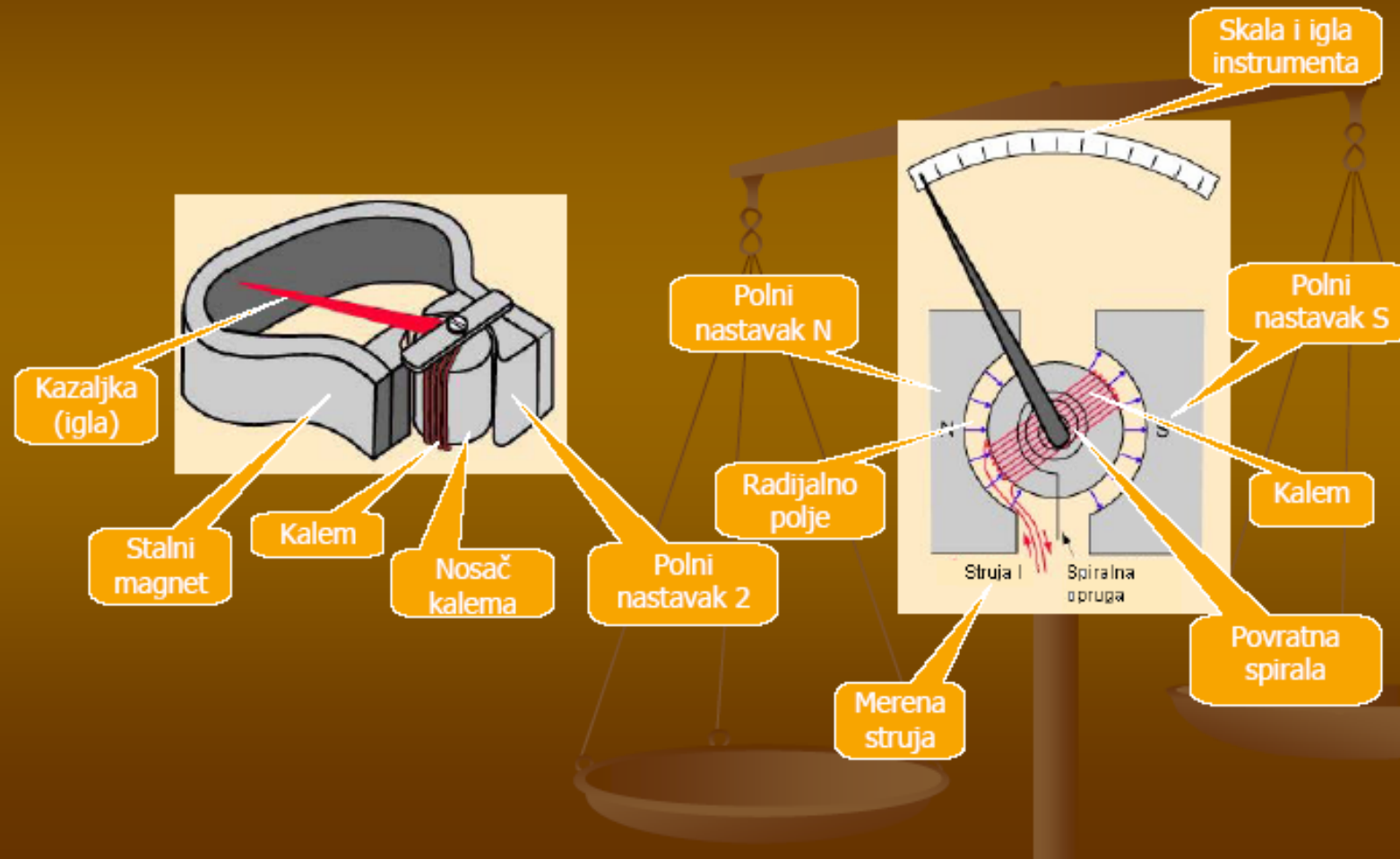
pa dobijamo da je ugao skretanja kazaljke α proporcionalan struji I :

$$I = \frac{D}{\Phi_0} \alpha = C_i \alpha$$

Odnos $C_i = D/\Phi_0$ se naziva strujna konstanta i izražava se u A/rad.

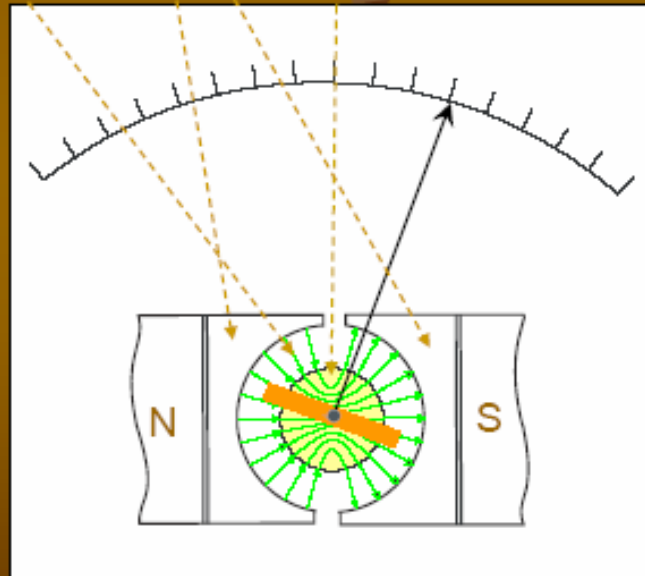
Instrument sa kretnim kalemom u stalnom magnetnom polju

- Konstruktivni izgled i princip rada ampermetra:

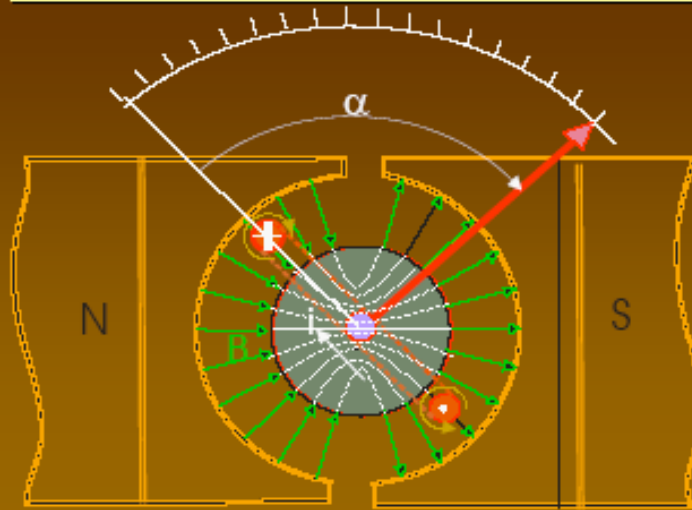


Radijalno magnetno polje

- Radijalno magnetno polje formira se u prostoru između polnih nastavaka magneta (N-S) i nosača obrtnog kalema.



Instrument sa kretnim kalemom u stalnom magnetnom polju

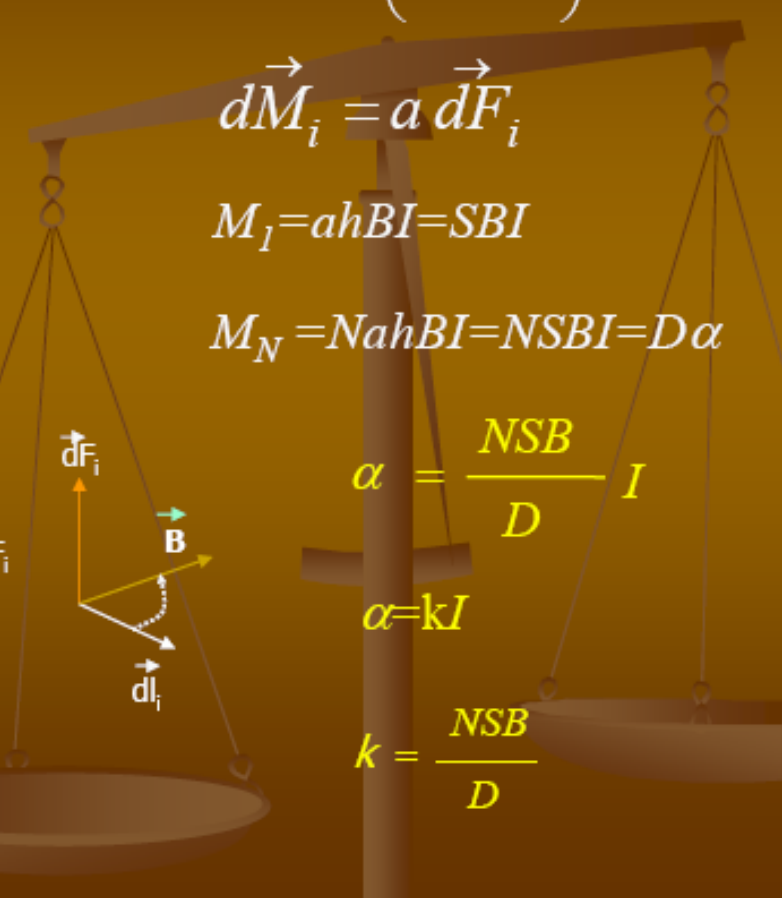
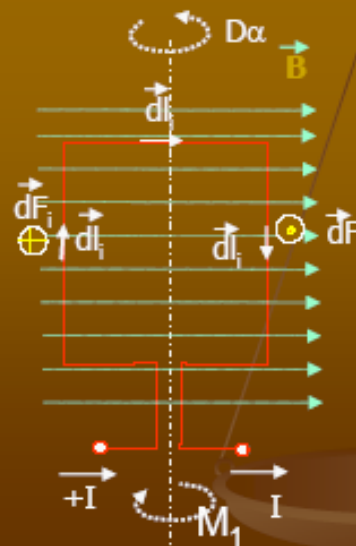
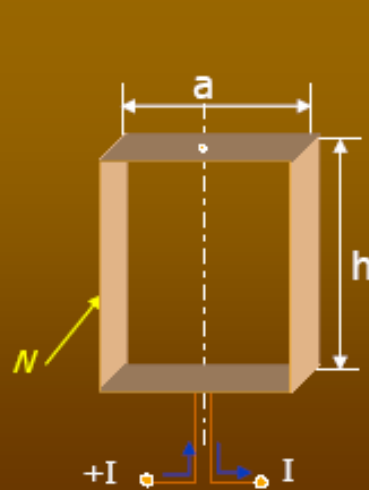


$$\vec{dF}_i = I \left(\vec{dl}_i \times \vec{B} \right)$$

$$d\vec{M}_i = a \vec{dF}_i$$

$$M_1 = ahBI = SBI$$

$$M_N = NahBI = NSBI = D\alpha$$



$$\alpha = \frac{NSB}{D} I$$

$$\alpha = kI$$

$$k = \frac{NSB}{D}$$

Za merenje jednosmerne struje koriste se instrumenti sa pokretnim kalemom i nepokretnim magnetom, i instrumenti sa unakrsnim kalemovima. Instrumenti sa pokretnim magnetom se ponašaju slično kao i instrumenti sa pokretnim kalemom: razlika je što je pokretni deo magnet, a nepokretni deo namotaj.

Ako se ovakav instrument koristi za merenje promenljive struje kazaljka će samo ako su promene spore pratiti promene. Samo pri vrlo sporim promenama instrument će pratiti pozitivnu poluperiodu promena sa greškom koja zavisi od dinamičkih (inercijalnih) karakteristika uređaja. Ako su promene struje brze instrument će pokazivati srednju vrednost struje. Pri primeni ovakvog uređaja za merenje naizmenične (prostoperiodične) struje, srednja vrednost je nula, pa će instrument pokazivati manje ili veće oscilacije oko nule.

Galvanometri

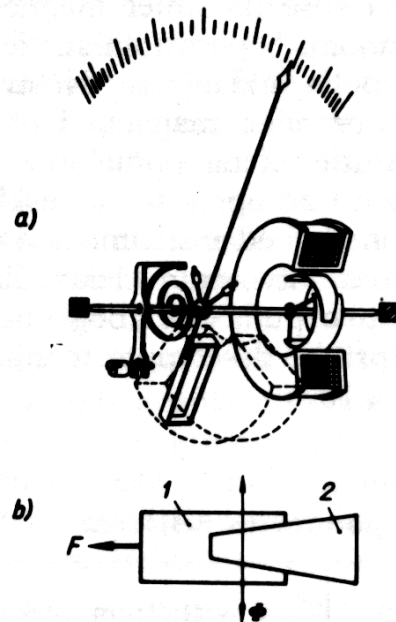
Galvanometri su izuzetno osetljivi električni elementi koji su upotrebljivi za merenja vrlo malih struja (10^{-12} A) i jednosmernih napona (10^{-9} V) Pri ovome je potrošnja instrumenata vrlo mala i dostiže 10^{-11} W. Koriste se kod metoda direktnog poređenja jednosmernih struja i napona (kompenzacione metode) ili kao osetljivi indikatori ravnoteže (nul-detektori).

Galvanometri sa pokretnim kalemom se u suštini ne razlikuje od ranije opisane konstrukcije. Analizirajući izraz za osetljivost uočavamo da povećanjem magnetske indukcije B , brojem navojaka N i smanjenjem krutosti opruge D povećavamo osetljivost.

Osim povećanja broja navojaka ostale elemente je otežano povećati, pa je rešenje nađeno u mehaničkoj konstrukciji. Produžena je kazaljka tako da je rezolucija povećana, a istovremeno je smanjena njena inercija - svetlosna kazaljka.

Balistički galvanometar je po konstrukciji sličan galvanometru sa pokretnim kalemom, ali je povećan moment inercije pokretnog dela. Na taj način balistički galvanometar može meriti vrlo male količine elektriciteta koje prođu kroz zavojke kalema za vrlo kratko vreme, na primer pri punjenju ili pražnjenju kondenzatora. Posmatramo maksimalni otklon, jer će se sistem vratiti u ravnotežu. Smisao veće inercije je da instrument sa kašnjenjem prikaže veličinu, ali se zadrži na maksimumu dovoljno dugo da možemo očitati vrednost. Ovaj maksimalni otklon nazivamo balistički otklon.

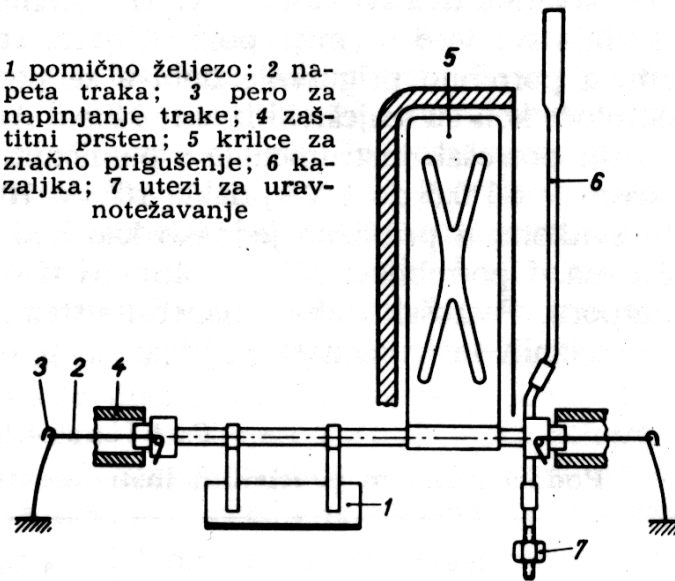
Instrumenti sa pokretnim gvožđem



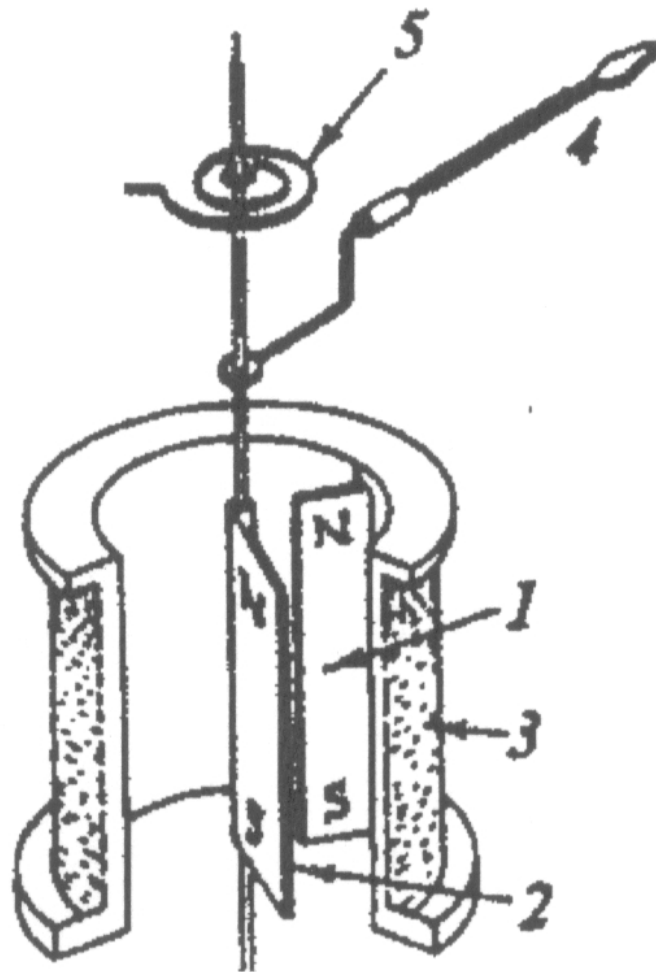
Slika 4.100. Instrument s pomičnim željezom i okruglim svitkom: a) osnovni raspored mjernog sistema; b) međusobno djelovanje željeznih listića

1 pomični željezni listić; 2 nepomični željezni listić; F sila na pomični listić; Φ magnetski tok svitka

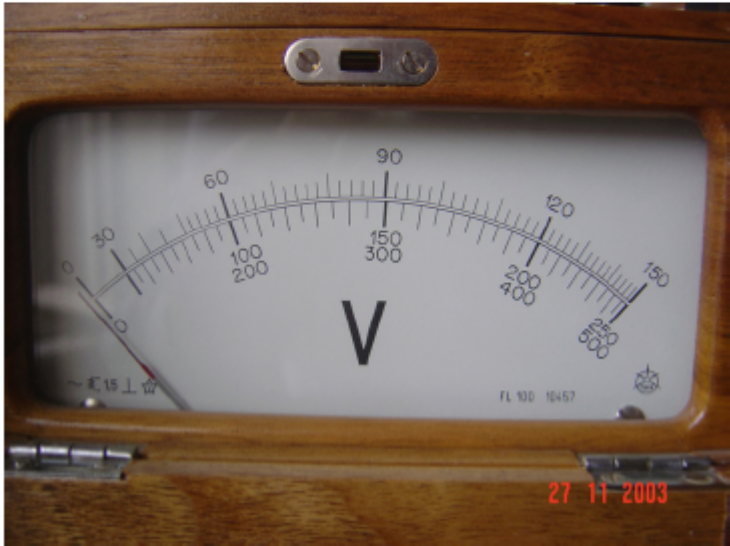
1 pomično željezo; 2 napeta traka; 3 pero za napinjanje trake; 4 zaštitni prsten; 5 krilce za zračno prigušenje; 6 kazaljka; 7 utezi za uravnotežavanje



Slika 4.101. Pogonski instrument s pomičnim željezom s trakom napetim sistemom



Instrument sa pokretnim gvoždem



Instrumenti sa pokretnim gvoždem funkcionišu tako što u polju koje stvara struja u kalemu se pokreće meko gvožđe. Pomeranje (obrtnje) je rezultat privlačne sile na meko gvožđe u blizini namotaja ili odbijanja istoimenih polova magneta. Meko gvožđe postaje magnet u magnetskom polju. Kod ovih instrumenata opuga obezbeđuje uravnoteženje kao što to već opisano kod instrumenta sa pokretnim kalemom.

Pri merenju jednosmerne struje I energija magnetskog polja je:

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2$$

- gde je L induktivnost kalema. Pri obrtanju mekog gvožđa menja se induktivnost pa imamo da je magnetski moment:

$$M_1 = \frac{dW_m}{d\alpha} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha}$$

Istovremeno usled promene ugla dolazi do promene momenta koji stvara opruga

$$M_2 = -D\alpha$$

pa dobijamo direktno:

$$\alpha = \frac{1}{2D} I^2 \frac{dL}{d\alpha}$$

Ugao skretanja kazaljke je srazmeran kvadratu merene jednosmerne struje, i skala treba da bude kvadratna. S obzirom da konstrukcijom može da se utiče na oblik i relativni položaj mekog gvožđa u odnosu na namotaj može da se dobije i linearna skala u opsegu od 20% do 100% do punog skretanja.

Za merenje naizmenične struje $i(t)$ trenutna vrednost momenta usled struje kroz kalem je:

$$m_1(t) = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\alpha}$$

i brzina vremenske promene odgovara brzini promene struje $i(t)$. Zbog inercije pokretni deo instrumenta ne može pratiti promene već zauzima položaj određen srednjom vrednošću momenta usled magnetskog polja i opruge.

Srednja vrednost magnetskog momenta je:

$$M_1 = \frac{1}{T} \int_0^T m_1(t) dt = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha}$$

pri čemu je uzeta u obzir definicija za efektivnu vrednost naizmenične struje I . U položaju ravnoteže je

$$\alpha = \frac{1}{2D} I^2 \frac{dL}{d\alpha}$$

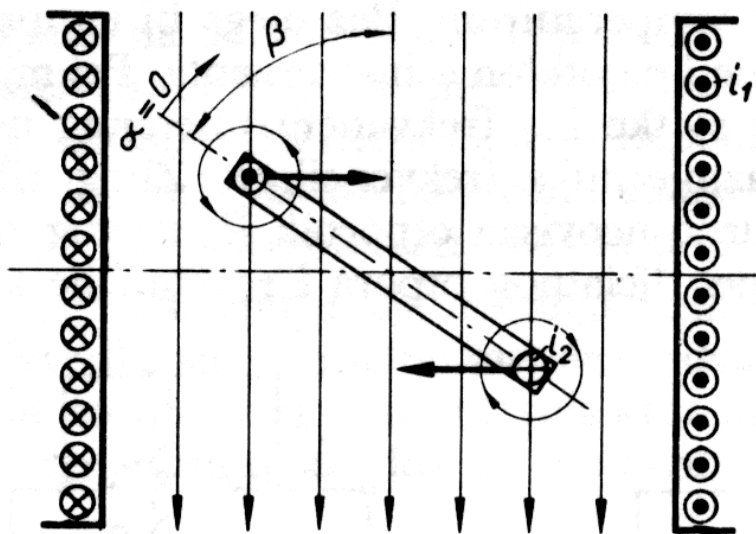
Prethodna jednačina ukazuje da je skretanje instrumenta srazmerno kvadratu efektivne vrednosti bez obzira da li se radi o prostoperiodičnoj ili nekoj drugoj zavisnosti struje. Ovakvi instrumenti nose oznaku true RMS ili tačna efektivna vrednost.

Ovi instrumenti se koriste za merenje struja i napona manjih učestanosti zbog pojave histerezisa i gubitaka usled vihornih struja. Instrumenti su tačni za naizmenične struje, dok je greška pri merenju jednosmernih veličine veća.

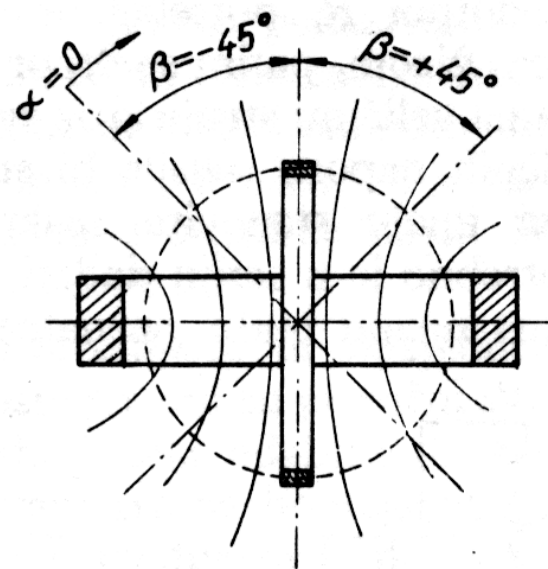
Kod merenja jednosmernih struja se javlja histerezis ili takozvana greška jednosmerene struje. Uzrok ove greške je histerezna kriva primenjenog mekog gvožđa. Ova greška se manifestuje tako da instrument ima različito pokazivanje za istu struju zavisno od toga dali se struja meri povećavajući ili smanjujući.

Elektrodinamički instrumenti

Elektrodinamički instrumenti se realizuju primenom dva kalema. Magnetski moment potiče od uzajamnog dejstva dva polja, oba nastala kao posledica promenljive u mernim kalemovima. Jedan kalem je nepokretan, a drugi pokretan. Struje u kalemovima su nezavisne. Nepokretan kalem koji generiše magnetsko polje u kome se okreće pokretan (manji) kalem se konstruiše tako da formira skoro homogeno magnetsko polje i ravnomeran fluks bez obzira na položaj pokretnog kalema. Ravnoteža pokretnog kalema se obezbeđuje spiralnom oprugom koristeći ranije opisanu strukturu.



Slika 4.80. Osnovni raspored elektrodinamskog instrumenta bez željeza



Slika 4.81. Magnetsko polje elektrodinamskog instrumenta bez željeza, s kratkim nepomičnim svitkom

Energija koja potiče od struja u kalemima:

$$W_m = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + M i_1 i_2$$

gde su L_1 , L_2 i M sopstvene i međusobna induktivnost nepokretnog i pokretnog kalema respektivno, a i_1 i i_2 struje kroz kalemove. Trenutna vrednost magnetskog momenta je :

$$m_1(t) = \frac{dW_m}{d\alpha} = i_1 i_2 \frac{dM}{d\alpha}$$

Sopstvene induktivnosti kalema su praktično nepromenljive pri obrtanju pokretnog kalema. Ako se mehaničkom konstrukcijom postigne da promena koeficijenta međusobne induktivnosti bude konstantna pri obrtanju (u ograničenom opsegu obrtanja) dobijamo da je trenutna vrednost magnetskog momenta proporcionalna proizvodu trenutnih vrednosti struja kroz kalemове

$$m_1(t) = k i_1 i_2, \quad k = \frac{dM}{d\alpha} = \text{Const.}$$

Zbog inercije instrument ne može da prati brze promene struja pa će skretanje odgovarati srednjoj vrednosti obrtnog momenta koji je:

$$M_1 = \frac{1}{T} \int_0^T m_1(t) dt = \frac{k}{T} \int_0^T i_1 i_2 dt$$

Ako su struje u kalemovima prostoperiodične, a njihove efektivne vrednosti I_1 , I_2 i fazna razlika ϕ dobijamo

$$M_1 = k I_1 I_2 \cos \phi$$

Otklon kazaljke elektrodinamičkog instrumenta je određen sa:

$$M_2 = -D\alpha \quad \text{pa je:}$$

$$\alpha = \frac{k}{D} I_1 I_2 \cos \phi$$

Ako posmatramo jednosmerne struje fazna razlika je nula, pa dobijamo direktno:

$$\alpha = \frac{k}{D} I_1 I_2$$