

Električna merenja 1

9. Merni instrumenti deo 2

9.4. MAGNETOELEKTRIČNI INSTRUMENTI ZA MERENJE NAIZMENIČNIH VELIČINA

- ❖ Osnovna konstrukcija magnetoelektričnih instrumenta služi za merenje jednosmernih napona i struja.
- ❖ Kod primene za merenje promenljive veličine (npr. struje)
 - kazaljka bi pratila dinamiku promene merene veličine pod uslovom da su promene struje spore,
 - u slučaju brze promene struje, zbog inercije, kazaljka bi pokazivala njenu srednju vrednost.
- ❖ Kod primene ovakvog mernog instrumenta za merenje naizmenične (prostoperiodične) struje srednja vrednost bi bila nula, pa bi instrument pokazivao manje ili veće oscilacije oko nule.
- ❖ Nemoguća direktna primena instrumenta, bez dodatnih elemenata.

9.4. MAGNETOELEKTRIČNI INSTRUMENTI ZA MERENJE NAIZMENIČNIH VELIČINA

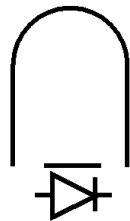
- ❖ Velika osetljivost, mala potrošnja i zadovoljavajuća tačnost instrumenta sa pokretnim kalemom su metrološke karakteristike zbog kojih su razvijene i konstrukcije za merenje naizmeničnih napona i struja.
- ❖ Međutim, ovi instrumenti ne mogu direktno da se primene za merenje naizmeničnih veličina jer im je pokazivanje direktno srazmerno srednjoj vrednosti struje koja protiče kroz kretni sistem.
- ❖ Zbog toga je neophodno, pre dovođenja naizmeničnog signala instrumentu sa pokretnim kalemom, izvršiti ispravljanje ovakvog signala tj. njegovo pretvaranje u odgovarajuću jednosmernu veličinu.
- ❖ U praksi se koriste dva načina za ispravljanje naizmeničnog signala:
 - primenom usmerača,
 - primenom termoparova.

9.4.1 Magnetoelektrični instrumenti sa usmeračem

❖ Konstrukcija ovog instrumenta koristi usmeraču, odnosno diodu, za ispravljanje naizmjenične struje.

❖ Koriste se razne sprege i razne vrste usmerača.

❖ Simbol



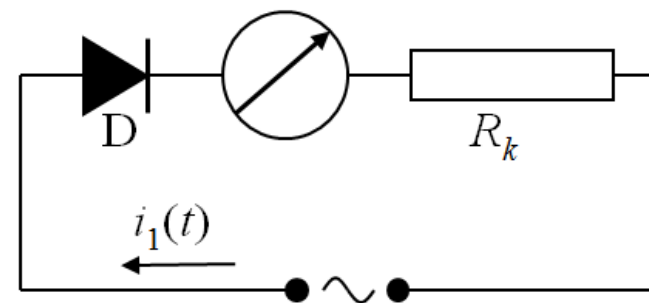
❖ Dioda ima usmeračko dejstvo.

9.4.1 Magnetoelektrični instrumenti sa usmeračem

- ❖ U praksi se koriste se razne sprege usmerača.
- ❖ Tipične sprege usmerača su:
 - poluvalne - sa jednostranim ispravljanjem,
 - punovalne - sa dvostranim ispravljanjem.

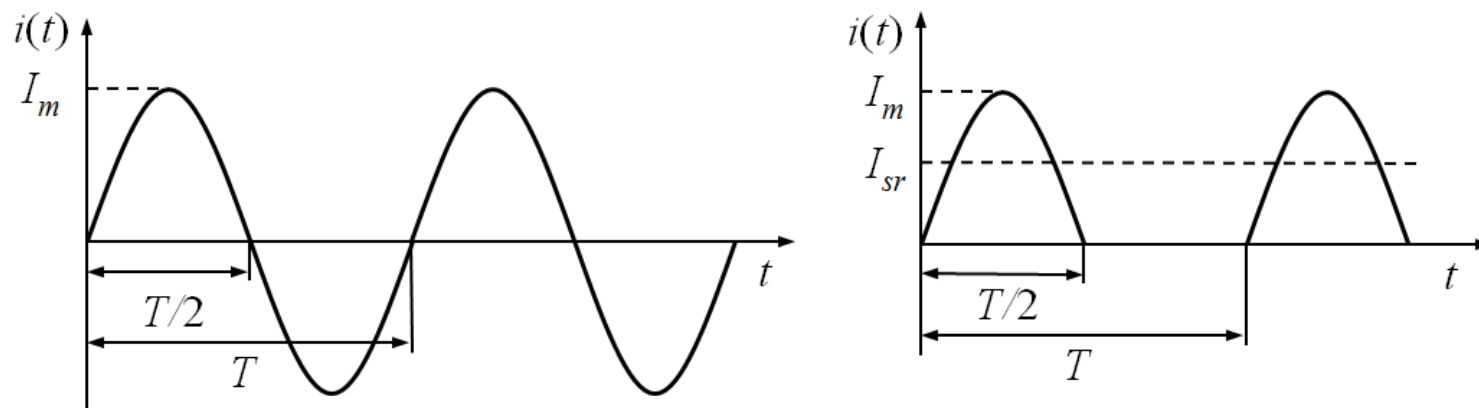
Poluvalno ispravljanje

- ❖ Šema konstrukcije sa poluvalnim ispravljanjem data je na slici.
- ❖ Otpornik R_k služi za kompenzaciju uticaja zagrevanja kalema instrumenta.
- ❖ On ujedno kompenzuje i promenu otpora diode usled nelinearnosti.



Poluvalno ispravljanje

- ❖ Na slici je prikazan talasni oblik struje pre i nakon ispravljanja.



- ❖ Prostoperiodični signal struje (neispravljeni) može se opisati jednačinom:

$$i = I_m \sin \omega t$$

gde su: I_m - maksimalna vrednost promenljive struje,
 ω - kružna učestanost, a
 t - vreme.

- ❖ Pokazivanje instrumenta je direktno srazmerno srednjoj vrednosti struje koja protiče kroz kretni kalem, potrebno je odrediti srednju vrednost ispravljene struje.

- ❖ Srednja vrednost ispravljene struje je:

$$I_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T I_m \sin \omega t dt,$$

$$I_{sr} = -\frac{I_m}{\omega T} \cos \omega T \Big|_0^{T/2} = \frac{2I_m}{\omega T} = \frac{2I_m}{\frac{2\pi}{T} T} = \frac{I_m}{\pi}$$

- ❖ Faktor oblika ispravljene struje:

$$K_O = \frac{I_{ef}}{I_{sr}} \quad I_{ef} = K_O \cdot I_{sr}$$

- ❖ Faktor oblika predstavlja odnos efektivne vrednosti naizmenične veličine i srednje vrednosti ispravljene veličine.

- ❖ Za sinusoidalne veličine je za poluvalno ispravljanje struje K_O iznosi:

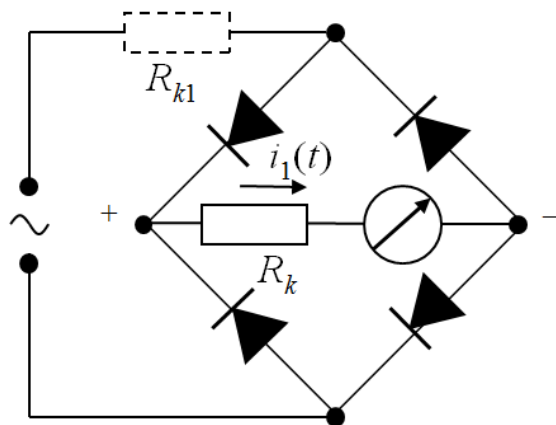
$$K_O = \frac{I_{ef}}{I_{sr}} = \frac{\frac{I_m}{\sqrt{2}}}{\frac{I_m}{\pi}} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cong 2,22144$$

- Koristeći vrednost faktora oblika instrument se može prebaždariti tako da pokazuje efektivnu vrednost naizmenične veličine iako mu je skretanje srazmerno srednoj vrednosti.

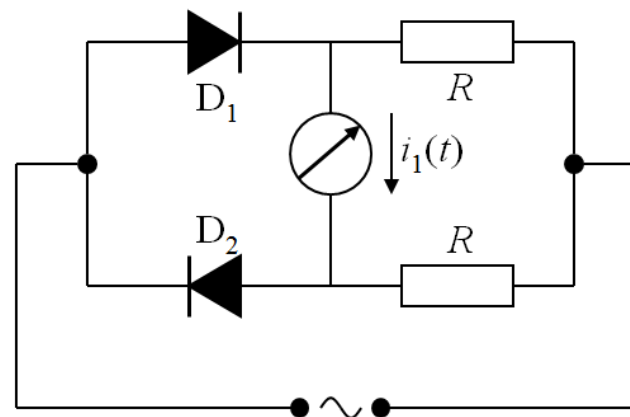
Punovalno ispravljanje

- ❖ Kod punovalnog ispravljanja u praksi postoji više mogućih šema.

Grecov spoj



Polugrecov spoj



- ❖ Kod Grecovog spoja istovremeno provode dve diode.

- ❖ Nedostaci su:

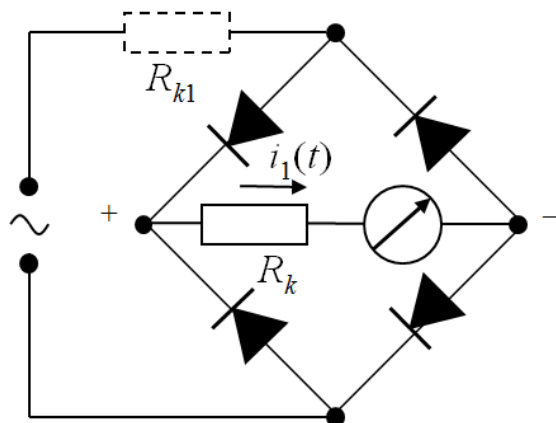
- pad napona na dve diode,
- promenu otpora dve diode usled nelinearnosti.

Zato se ispred mosta dodaje kompensacioni otpor R_{k1} kojim se kompenzuju promene otpora samog mosta.

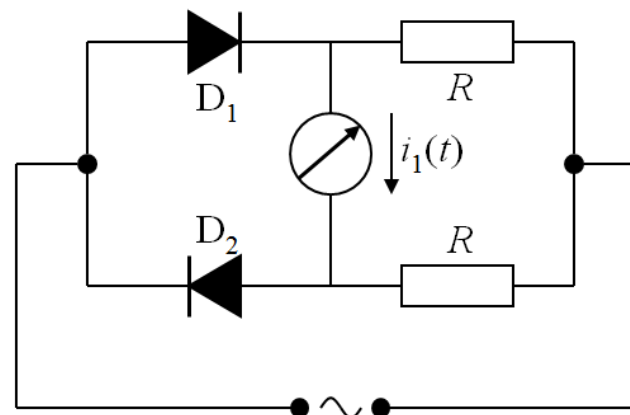
Punovalno ispravljanje

- ❖ Kod punovalnog ispravljanja u praksi postoji više mogućih šema.

Grecov spoj



Polugrecov spoj



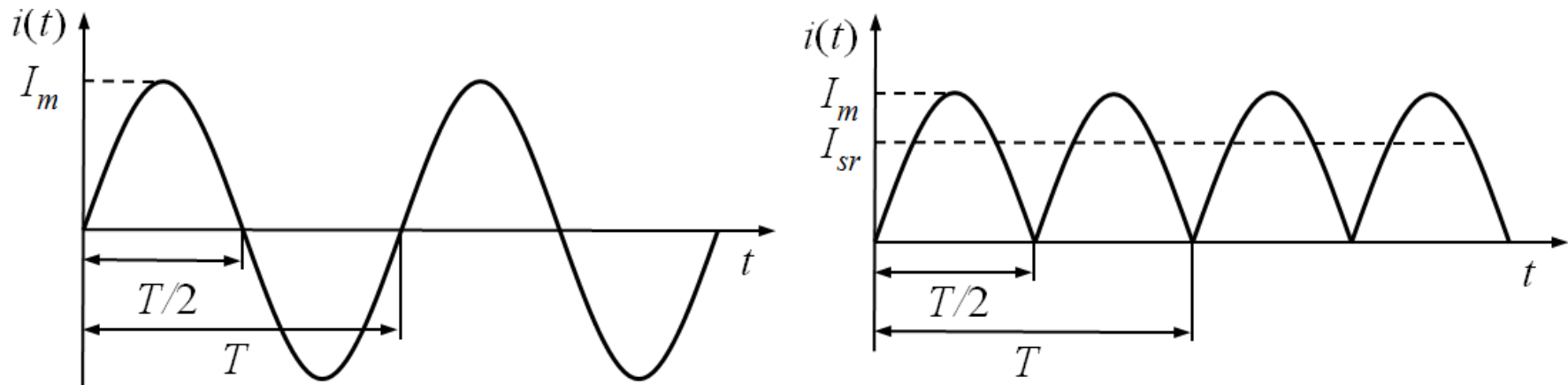
- ❖ Kod polugrecovog spoja:
 - provodi samo jedna dioda,
 - otpori R preuzimaju ulogu otpora za kompenzaciju.

Mana ove šeme:

- za vreme provođenja struja se deli na paralelnu vezu otpora R i zbira otpora instrumenta i otpora R, odnosno: $R \parallel (instr + R)$.
- Time se smanjuje osetljivost, ali se poboljšava linearnost.

Punovalno ispravljanje

- ❖ Na slici je prikazan talasni oblik struje pre i nakon ispravljanja.



- ❖ Sinusoidalni (neispravljeni) signal struje je: $i = I_m \sin \omega t$
- ❖ Srednja vrednost ispravljene struje je:

$$I_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i(t) dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt$$
$$I_{sr} = -\frac{2I_m}{\omega T} \cos \omega t \Big|_0^{T/2} = \frac{2 \cdot 2 \cdot I_m}{\omega T} = \frac{2 \cdot 2 \cdot I_m}{\frac{2\pi}{T} T} = \frac{2}{\pi} \cdot I_m$$

Punovalno ispravljanje

- ❖ Faktor oblika ispravljene struje:

$$K_o = \frac{I_{ef}}{I_{sr}} = \frac{\frac{I_m}{\sqrt{2}}}{\frac{2I_m}{\pi}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cong 1,11072$$

- Vrednost ovog faktora treba iskoristiti da se instrument prebaždari tako da pokazuje efektivnu vrednost naizmjenične veličine.

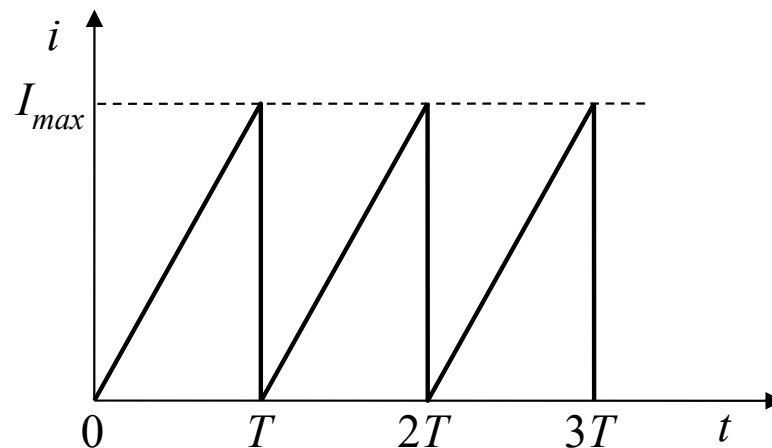
❖ U praksi, kod magnetoelektričnih instrumenata za merenje naizmjeničnih veličina uglavnom se koristi punovalno ispravljanje. Tada se ima dvostruko veća ispravljena struja, a time i veća osetljivost.

❖ Najčešće se koriste Grecov i polugrecov spoj.

❖ Komercijalne konstrukcije ovih instrumenata omogućavaju merenje struja u opsegu od 0.1 mA do 6 A i napona u opsegu od 1 V do 1000 V.

Merenje nesinusoidalnih veličina

- ❖ Ako bi se ovim instrumentima merile nesinusoidalne veličine i ako bi se direktno očitavala izmerena vrednost pravila bi se greška.
- ❖ Ova greška je funkcija faktora oblika merene veličine.
- ❖ Zato bi se moralo izvršiti preračunavanje na osnovu faktora oblika.
- ❖ Faktor oblika može da se izračuna pod uslovom da se poznaje talasni oblik merene veličine.
- ❖ Primera radi na slici je dat testerasti signal.



Merenje nesinusoidalnih veličina

- ❖ Potrebno je izmeriti efektivnu vrednost signala korišćenjem instrumenta koji ima punovalno ispravljanje ulaznog signala i koji je izbaždaren prema prostoperiodičnom signalu.
- ❖ Analitički izraz za ovaj signal dat je jednačinom:

$$i(t) = I_{\max} \frac{t}{T}, 0 \leq t \leq T$$

- ❖ Srednja vrednost testerastog signala je jednaka:

$$I_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = \frac{I_{\max}}{2}$$

Merenje nesinusoidalnih veličina

- ❖ Efektivna vrednost signala dobija se rešavanjem odgovarajućeg integrala:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_{\max}^2 \frac{t^2}{T^2} dt}$$

$$I_{ef} = \sqrt{\left. \frac{1}{T^3} I_{\max}^2 \frac{t^3}{3} \right|_0^T} = \sqrt{\frac{1}{T^3} I_{\max}^2 \frac{T^3}{3}}$$

$$I_{ef} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{3}}$$

- ❖ Vrednost faktora oblika za ovaj signal je prema tome:

$$K_o = \frac{I_{ef}}{I_{sr}} = \frac{\frac{I_{\max}}{\sqrt{3}}}{\frac{I_{\max}}{2}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cong 1.1547$$

Merenje nesinusoidalnih veličina

- ❖ Instrument je baždaren prostoperiodičnim signalom prema punovalnom ispravljanju, odnosno na osnovu faktora oblika 1.11072.
- ❖ Da bi se izmerila tačna efektivna vrednost testerastog signala pokazivanje instrumenta treba pomnožiti sa količnikom faktora oblika testerastog signala i faktora oblika punovalno ispravljenog signala, odnosno sa:

$$\frac{1.1547}{1.11072} \cong 1.03959$$

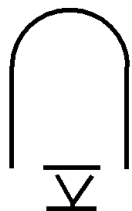
9.4.1 Magnetoelektrični instrumenti sa usmeračom

- ❖ Jedna od **mana ovih instrumenata** je uticaj sopstvene kapacitivnosti dioda, tako da se preko nje prenosi i jedna naizmenična komponenta.
- ❖ To posebno dolazi do izražaja kod viših frekvencija. Iz tog razloga frekvencijski opseg ovih instrumenata ograničen je na približno 20 kHz.
- ❖ Najveći nedostaci ovih instrumenata su velike klase tačnosti (od 1 do 5) i sistematsko odstupanje rezultata za signale koji su različiti od sinusoidalnih signala.
- ❖ Za merenje malih signala vrlo je teško primeniti ove instrumente, a ponekad je to i nemoguće jer smetnje koje prate signal mogu da budu toliko velike da ih je pri merenju teško razdvojiti od merenog signala.
- ❖ U tom slučaju je pogodno primeniti elektronske elemente koji mogu da selektivno pojačaju željeni signal.

9.4.2. Magnetoelektrični instrument sa termopretvaračem

❖ Kod ovih instrumenata termopretvarač pretvara naizmenični u jednosmerni signal.

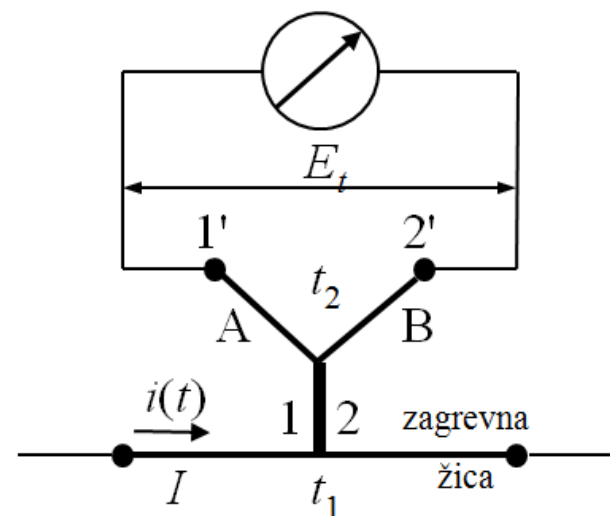
❖ Simbol



❖ Princip rada :

- termopar se sastoji od dva različita materijala A i B, koji imaju jedan zajednički kraj koji je zavaren.
- metalno su spojeni krajevi 1 i 2 - ovaj kraj termopara ima temperaturu t_1 .
- drugi kraj termopara je otvoren (tačke 1' i 2') i nalazi se na temperaturi t_2 .
- Proticanjem merene struje kroz zagrevnu žicu, dolazi do zagrevanja zajedničkog kraja.

Instrument sa termoparom



- ❖ Zagrevanjem zajedničkog kraja, na otvorenim krajevima se javlja termoelektromotorna sila E_p , koja je jednosmerna:

$$E_t(t) = f(t_1 - t_2)$$

gde su: t_1 - temp. vrućeg kraja, t_2 - temp. hladnog kraja.

- ❖ Temperatura vrućeg kraja termopara je funkcija kvadrata efektivne vrednosti struje:

$$t_1 = f(RI^2)$$

gde su: R - otpor zagrevne žice,

I - efektivna vrednost struje kroz žicu.

- ❖ Ako se temperatura hladnog kraja drži konstantnom tada je:

$$t_2 = const \rightarrow E_t(t) = f(RI^2) = f(I^2)$$

ako se zanemari promena otpora sa temperaturom.

- ❖ U praksi $E_t(t)$ je **nelinearna funkcija zavisna od upotrebljenih materijala**, pa je i **skala nelinearna**.

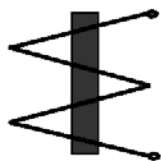
9.4.2. Magnetoelektrični instrument sa termopretvaračem

Ovi instrumenti:

- Mere efektivnu vrednost nezavisno od talasnog oblika merene veličine.
- Frekventno su nezavisni -
uobičajeni merni opseg je do 1MHz, a posebne konstrukcije su i do 100MHz.
- Služe za jednosmernu i naizmeničnu struju.

9.5 ELEKTROMAGNETNI INSTRUMENTI SA KRETNIM GVOŽĐEM

- ❖ Za razliku od magnetoelektričnih instrumenata ovde je magnet promenio ulogu.
- ❖ Kod ovih instrumenata magnet je pokretni, a kalem nepokretni deo instrumenta.
- ❖ Princip rada ovih instrumenata zasniva se na dejstvu magnetnog polja kalema, kroz koji protiče merena struja, na pokretni deo izrađen od mekog gvožđa.
- ❖ Simbol



9.5 ELEKTROMAGNETNI INSTRUMENTI SA KRETNIM GVOŽĐEM

- ❖ Elektromagnetni instrumenti sa kretnim gvožđem su po konstrukciji vrlo jednostavni merni instrumenti.
- ❖ Ranije su se koristili uglavnom za industrijska merenja.
- ❖ Poboľšane konstrukcije ovih instrumenata koristile su se i za precizna laboratorijska merenja.

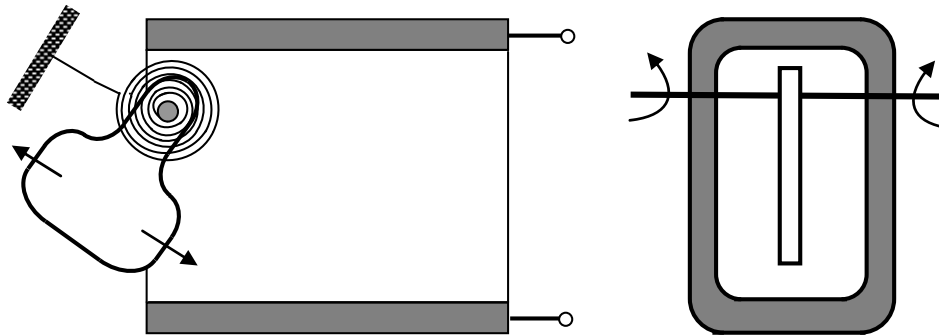
Ovi instrumenti su vrlo precizni.

Klase najpreciznijih su 0.2, a u konstrukciji sa svetlosnom kazaljkom i 0.1.

- ❖ Ovi instrumenti mere i jednosmerne i naizmenične veličine.
- ❖ Konstruktivno, postoje dva osnovna tipa ovih instrumenata:
 - sa privlačenjem kretnog organa (uvlačenjem) i
 - sa odbijanjem kretnog organa.
- ❖ Ova podela je na osnovu načina kretanja kretnog organa u odnosu na nepokretni kalem kroz koji protiče struja.

9.5 ELEKTROMAGNETNI INSTRUMENTI SA KRETNIM GVOŽĐEM

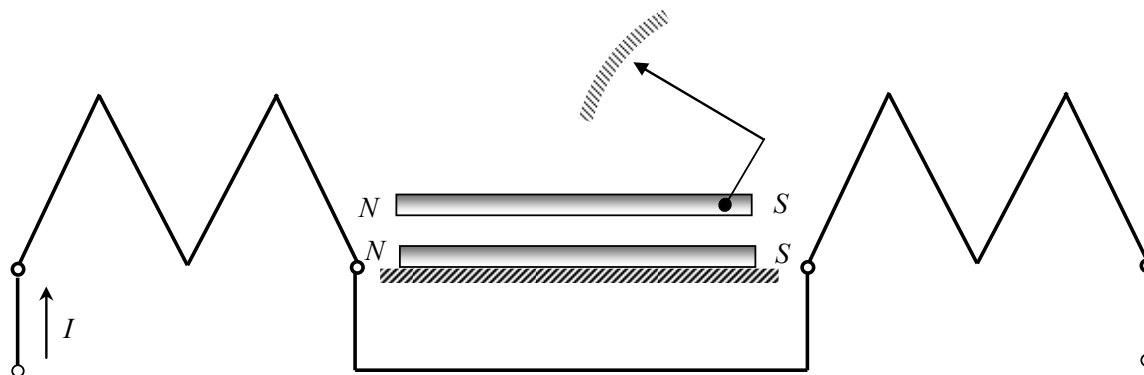
- ❖ Princip rada instrumenta **sa privlačenjem kretnog organa** prikazan je na slici.



- ❖ Prolaskom struje kroz kalem javlja se elektromagnetno polje. Usled toga dolazi do uvlačenja kretnog organa u kalem i zakretanja srazmerno struji kalema.
- ❖ Kretni sistem je pločica od feromagnetnog materijala ($\mu_r \gg 1$).
- ❖ Otporni momenat stvara spiralna **opruga, kroz koju ne protiče struja**.

9.5 ELEKTROMAGNETNI INSTRUMENTI SA KRETNIM GVOŽĐEM

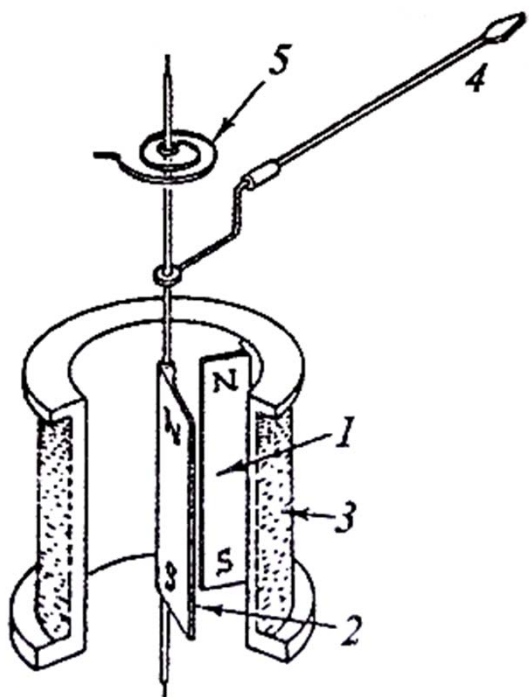
- ❖ Princip rada instrumenta **sa odbijanjem kretnog organa** prikazan je na slici.



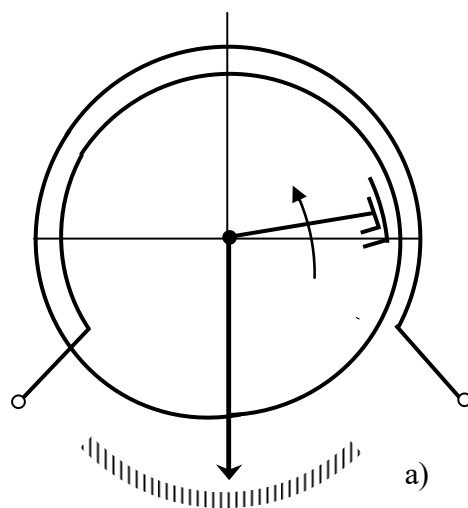
- ❖ Kod ove konstrukcije kalem je podeljen na dva identična dela zbog homogenosti polja. Kroz njega protiče struja i stvara elektromagnetno polje.
- ❖ Instrument ima dve metalne pločice od feromagnetnog materijala, sa velikom magnetnom permeabilnošću ($\mu_r \gg 1$).
- ❖ Jedna pločica je pokretna i na nju je učvršćena kazaljka. Druga pločica je nepokretna. Obe pločice se dejstvom elektromagnetnog polja magnetišu, istim polaritetom.
- ❖ Posledica iste polarizacije je da se pločice odbijaju. Pokretna pločica sa kazaljkom se zakreće i daje **skretanje na skali proporcionalno struji kroz kalem**.

9.5 ELEKTROMAGNETNI INSTRUMENTI SA KRETNIM GVOŽĐEM

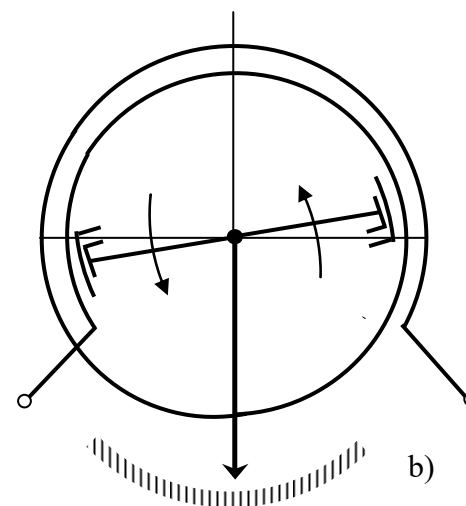
- ❖ Konstruktivno postoje dva osnovna tipa prikazana na slici.



sa dve pločice



sa četiri pločice



sa odbijanjem kretnog organa

9.5 ELEKTROMAGNETNI INSTRUMENTI SA KRETNIM GVOŽĐEM

- ❖ Nezavisno od konstruktivnog rešenja instrumenta mogu se izvesti izrazi za aktivni momenat.
- ❖ Zakretanjem kretnog sistema za ugao $d\alpha$ obavlja se mehanički rad:

$$dW_{meh} = M_a \cdot d\alpha$$

gde su M_a kretni momenat, a $d\alpha$ ugao zakretanja kretnog sistema.

- Posledica zakretanja kretnog sistema je promena elektromagnetne energije sistema za dW_{emag} .
- ❖ Pošto priraštaji energija moraju biti isti, važi da je:

$$dW_{meh} = dW_{emag}$$

- pa je aktivni momenat :

$$M_a = \frac{dW_{meh}}{d\alpha} = \frac{dW_{emag}}{d\alpha}$$

9.5 ELEKTROMAGNETNI INSTRUMENTI SA KRETNIM GVOŽĐEM

- ❖ Elektromagnetna energija sistema je:

$$W_{emag} = \frac{1}{2} L \cdot i^2(t)$$

gde su: L induktivnost sistema, a i struja koja protiče kroz kalem.

- ❖ Za aktivni momenat sada se dobija:

$$M_a = \frac{dW_{emag}}{d\alpha} = \frac{d}{d\alpha} \left[\frac{1}{2} L \cdot i^2(t) \right]$$

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

- Imajući u vidu postupak dobijanja prethodnog izraza, treba naglasiti da struja nije funkcija ugla zakretanja α .
- ❖ Otporni momenat stvarara spiralna opruga i on se može opisati izrazom:

$$M_o = c \cdot \alpha$$

9.5 ELEKTROMAGNETNI INSTRUMENTI SA KRETNIM GVOŽĐEM

- ❖ Kao što je ranije rečeno ovim tipom instrumenta mogu se meriti jednosmerne i naizmenične struje.

A) Kod merenja jednosmerne struje važi da je $i(t)=I$. Tada je aktivni momenat:

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

- ❖ Ako se izjednače aktivni i otporni momenat dobija se:

$$M_a = M_o$$

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

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

- ❖ Iz poslednjeg izraza se vidi da **skretanje instrumenta zavisi od kvadrata struje koja protiče kroz kalem.**
- ❖ Takođe, vidi se da skretanje zavisi od člana $dL/d\alpha$ i to predstavlja problem.

- ❖ Da bi skretanje zavisilo samo od kvadrata struje član $dL/d\alpha$ treba da bude konstantan.
- ❖ Ovaj uslov se ostvaruje konstruktivno, oblikovanjem kalema i metalne pločice.
- ❖ To se radi eksperimentalno pošto zavisi od geometrije kalema i pločice, i materijala pločice. Kada se to postigne važi da je:

$$\frac{dL}{d\alpha} = const \rightarrow L = k' \cdot \alpha$$

pa je skretanje instrumenta proporcionalno samo kvadratu struje:

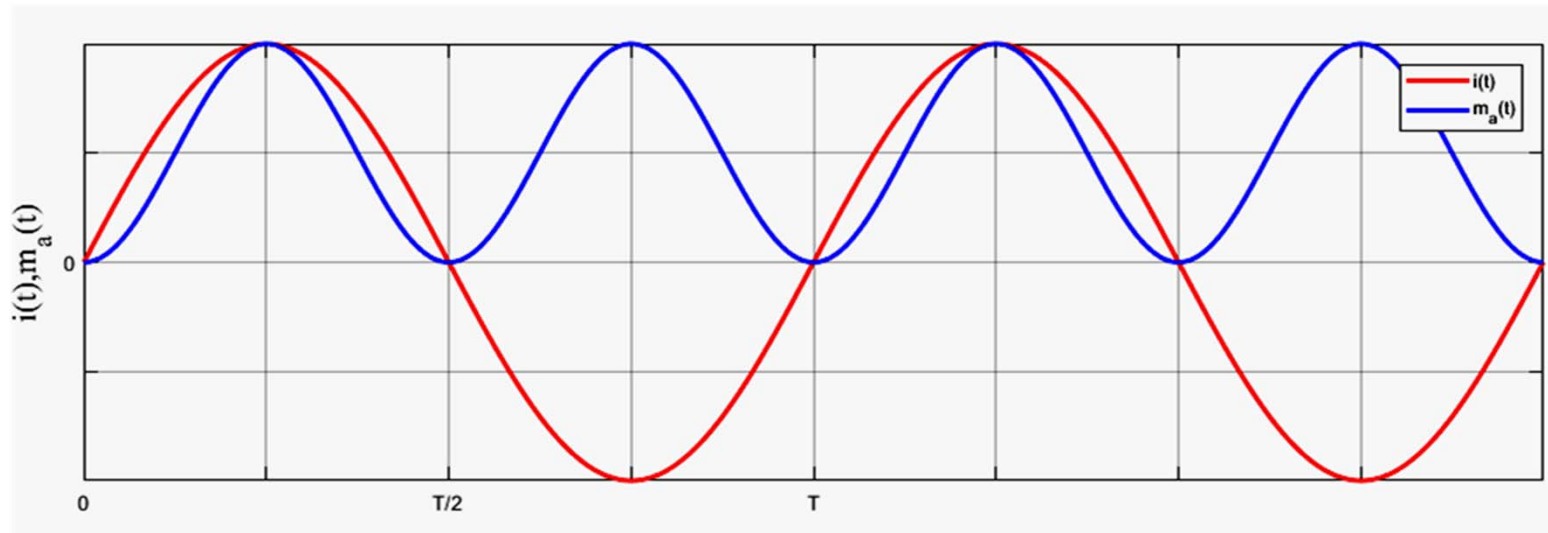
$$\alpha = \frac{1}{2c} \frac{dL}{d\alpha} I^2 = k \cdot I^2$$

- ❖ Kao što se vidi iz prethodnog izraza, uz konstruktivna rešenja, instrument može da meri jednosmernu struju.
- ❖ Skala instrumenta je kvadratna.

9.5 ELEKTROMAGNETNI INSTRUMENTI SA KRETNIM GVOŽĐEM

B) Kod merenja naizmenične struje

- Aktivni momenat je promenljiv, sa dvostrukom frekvencijom struje, jer aktivni momenat zavisi od kvadrata struje.
 - Kretni organ zbog inercije ne može da prati promene momenta i on zauzima položaj određen srednjom vrednošću aktivnog momenta.
- ❖ Na slici je prikazan talasni oblik struje i talasni oblik aktivnog momenta.



❖ Trenutna vrednost aktivnog momenta data je jednačinom:

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

❖ Srednja vrednost momenta je:

$$M_{asr} = \frac{1}{T} \int_0^T m_a(t) dt$$

❖ Uz uslov da je $\frac{dL}{d\alpha} = const$ dobija se:

$$M_{asr} = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt$$

$$M_{asr} = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} I_{ef}^2$$

❖ Pri ravnoteži momenata važi:

$$M_{asr} = M_o$$

$$\frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} I_{ef}^2 = c \cdot \alpha$$

gde je: $\frac{dL}{d\alpha} = const$

$$\alpha = \frac{1}{2c} \frac{dL}{d\alpha} I_{ef}^2 = k \cdot I_{ef}^2$$

➤ Skretanje instrumenta je proporcionalno kvadratu efektivne vrednosti struje.

➤ Ovo važi ako je ispunjen konstruktivan uslov da je promena induktivnosti sistema sa uglom skretanja konstantna.

9.5 ELEKTROMAGNETNI INSTRUMENTI SA KRETNIM GVOŽĐEM

❖ Kada se ovakav **instrument realizuje kao voltmetar** tada se na red sa instrumentom vezuje dovoljno veliki otpor R_v .

❖ Tada su trenutne vrednosti struje i napona povezane relacijom:

$$i = \frac{u}{R_v}$$

❖ U tom slučaju, skretanje instrumenta proporcionalno je kvadratu efektivne vrednosti napona, odnosno:

$$\alpha = k \cdot U^2$$

❖ I u slučaju voltmetra skala instrumenta je kvadratna.

9.5 ELEKTROMAGNETNI INSTRUMENTI SA KRETNIM GVOŽĐEM

- ❖ Maksimalna vrednost magnetopobudne sile mora biti ista za svaki strujni opseg. To znači da mora da važi:

$$\left(\sum IN\right)_{\max} = I_{ops} N_{ops} = const$$

gde su N_{ops} broj navojaka za merni opseg, a I_{ops} struja opsega.

- ❖ Strujni opsezi se menjaju menjanjem broja navojaka.

➤ To znači da za najveći merni opseg (struja kroz kalem je najveća) uzima se najmanji broj navojaka.

- ❖ Broj navojaka potreban za neki manji strujni opseg dobija se kao:

$$N_{ops} = \frac{\left(\sum IN\right)_{\max}}{I_{ops}}$$

- ❖ Svaki merni opseg ima svoju skalu!

9.5 ELEKTROMAGNETNI INSTRUMENTI SA KRETNIM GVOŽĐEM

- ❖ Za voltmetre se uzima jedan namotaj sa velikim brojem navojaka, zbog velike ulazne impedanse, ali maksimalna magnetopobudna sila je ista, pa je struja mala. Tipično je:

$$N=20000 \text{ navojaka}$$

- ❖ Struja punog skretanja za voltmetar tada je:


$$I_v = \frac{(\sum IN)_{\max}}{N_v} \text{ (A)}$$

- ❖ Za više mernih opsega dodaju se predotpori, struja punog skretanja je ista za sve opsege. Definiše se **jedinični otpor voltmetra**:

$$R_{v1} = \frac{1}{I_v} \left[\frac{\Omega}{V} \right] \quad \rightarrow I_v \text{ određena sa } (\sum IN)_{\max}$$

- ❖ Taj podatak se daje za svaki voltmetar, daje ga proizvođač.
- ❖ Na osnovu toga uvek se može odrediti maksimalna struja kroz instrument.
- ❖ Unutrašnja potrošnja voltmetra je:

$$S_{ops} = U_{ops} \cdot I_{ops}$$


$$I_v = \frac{1}{R_{v1}}$$

PRIMER 1. Ampermetar ima pet mernih opsegov: 1, 5, 20, 100 i 400A. Odrediti potrebne brojeve navojaka kalema za te opsege. Nacrtati šemu instrumenta. Neka je:

$$\left(\sum IN\right)_{\max} = 400A \text{ navojaka}$$

$$I = 400A \quad N_{400} = 1 \text{ nav} \quad (NI)_{\max} = N_{\min} I_{\max} = 400A \text{ nav.}$$

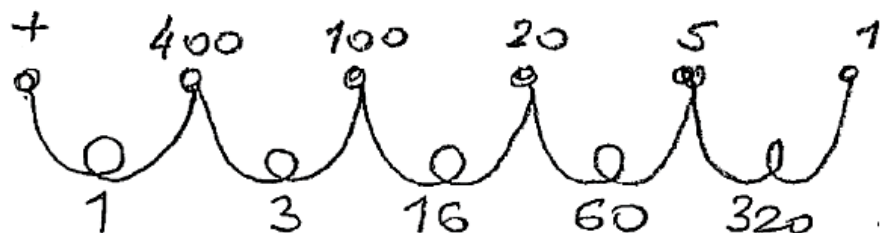
$$I = 100A \quad N_{100} = \frac{(NI)_{\max}}{I_{ops}} = \frac{400}{100} = 4 = 1 + 3 \text{ nav.}$$

$$I = 20A \quad N_{20} = \frac{(NI)_{\max}}{I_{ops}} = \frac{400}{20} = 20 = 1 + 3 + 16 \text{ nav.}$$

$$I = 5A \quad N_5 = \frac{(NI)_{\max}}{I_{ops}} = \frac{400}{5} = 80 = 1 + 3 + 16 + 60 \text{ nav.}$$

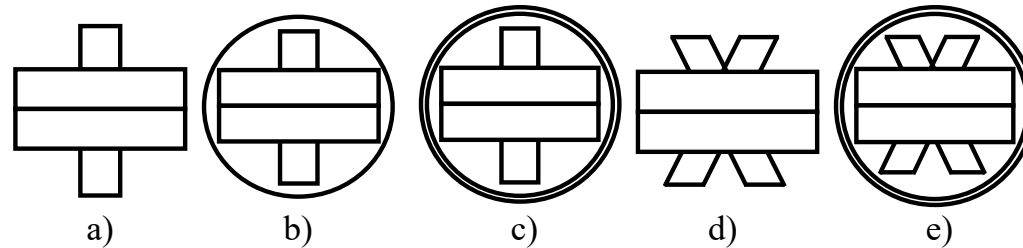
$$I = 1A \quad N_1 = \frac{(NI)_{\max}}{I_{ops}} = \frac{400}{1} = 400 = 1 + 3 + 16 + 60 + 320 \text{ nav.}$$

Šema je:



9.6. ELEKTRODINAMIČKI INSTRUMENTI

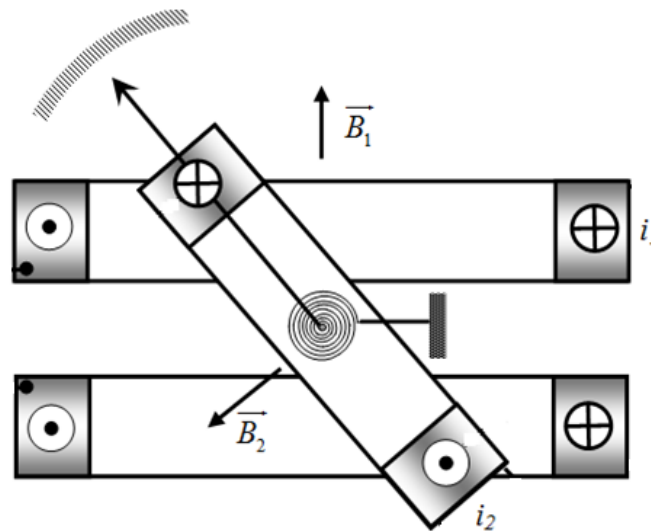
- ❖ Elektrodinamički instrumenti u osnovi se sastoje od dva nezavisna strujna kola koja čine dva kalema.
- ❖ Jedan kalem je nepokretan, a drugi koji je manjih dimenzija je pokretan.
- ❖ Simboli ovog instrumenta dati su na slici.



- ❖ Elektrodinamički instrumenti imaju nekoliko različitih simbola u zavisnosti od konstrukcije.
 - Simbol a) odgovara osnovnoj konstrukciji.
 - Simbol b) je u slučaju kada je instrument oklopljen cilindrom od mekog gvožđa.
 - Ako je nepokretni kalem sa gvozdenim jezgrom simbol je c).
 - Simbol d) je za logometarske instrumente,
 - Simbol e) za logometarske instrumente kod kojih je nepokretni kalem sa gvozdenim jezgrom.

9.6. ELEKTRODINAMIČKI INSTRUMENTI

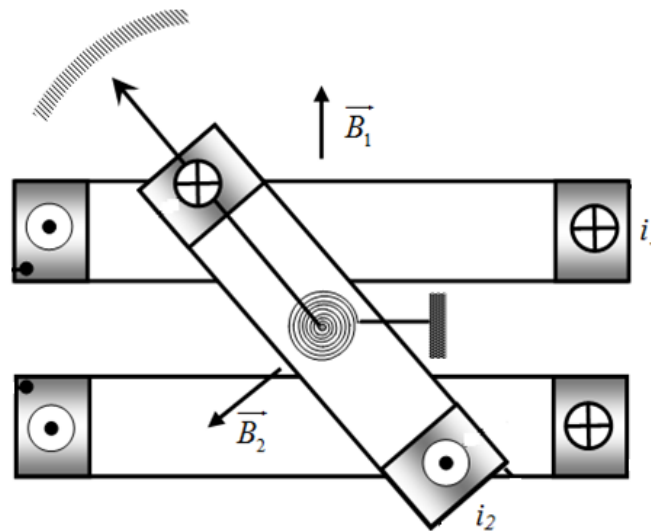
- ❖ Princip rada je isti kao kod magnetoelektričnih instrumenta sa kretnim kalemom, samo što je sada **stalni magnet zamenjen jednim namotajem koji je nepokretan**.
- ❖ **Nepokretni kalem se obično radi iz dva dela** jer se na taj način može dobiti homogeno magnetno polje. Pored toga, delovi kalema se moгу povezati i redno i paralelno i tako promeniti merni opseg.
- ❖ **Nepokretni kalem ima ulogu stalnog magneta**.
- ❖ **Pokretni kalem je u magnetnom polju nepokretnog i interakcijom ta dva polja dolazi do zakretanja pokretnog kalema**.



9.6. ELEKTRODINAMIČKI INSTRUMENTI

- ❖ Princip rada elektrodinamičkog instrumenta prikazan je na slici.
- Sa B_1 je označena indukcija nepokretnih kalemova, a sa B_2 indukcija pokretnog kalema.
- ❖ **Struja kroz nepokretni kalem stvara magnetno polje** koje ima efekat sličan stalnom magnetu.
- ❖ Na **pokretni kalem** struja se dovodi preko dve spiralne opruge. Te opruge ujedno stvaraju otporni momenat.

$$M_o = c \cdot \alpha$$



9.6. ELEKTRODINAMIČKI INSTRUMENTI

- ❖ Aktivni momenat se dobija na osnovu promene elektromagnetne energije sistema.
- ❖ Ako se kretni sistem zakrene za ugao $d\alpha$, uloženi rad je:

$$dW_{meh} = M_a \cdot d\alpha$$

- ❖ To se manifestuje kao priraštaj elektromagnetne energije sistema tako da je:

$$dW_{meh} = dW_{emag}$$

- ❖ Sada je aktivni momenat:

$$M_a = \frac{dW_{meh}}{d\alpha} = \frac{dW_{emag}}{d\alpha}$$

9.6. ELEKTRODINAMIČKI INSTRUMENTI

❖ Ukupna elektromagnetna energija sistema je:

$$W_{emag} = \frac{1}{2}L_1 \cdot i_1^2 + \frac{1}{2}L_2 \cdot i_2^2 + M \cdot i_1 \cdot i_2$$

gde su:

L_1 - induktivnost nepokretnog kalema ($L_1 = \text{const}$),

i_1 - struja nepokretnog kalema,

L_2 - induktivnost pokretnog kalema ($L_2 = \text{const}$),

i_2 - struja pokretnog kalema,

M - međusobna induktivnost ($M \neq \text{const}$, $M = f(\alpha)$)

❖ Jedina veličina koja je funkcija ugla zakretanja je međusobna induktivnost M .

Prema tome aktivni momenat je:

$$M_a = \frac{dW_{emag}}{d\alpha} = i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{dM}{d\alpha}$$

❖ Konstruktivno se rešava da bude $\frac{dM}{d\alpha} = \text{const}$. U tom slučaju aktivni momenat je:

$$M_a = k \cdot i_1 \cdot i_2$$

9.6. ELEKTRODINAMIČKI INSTRUMENTI

❖ Uslov $\frac{dM}{d\alpha} = const$ ostvaruje se na dva načina:

- konstruktivno, oblikovanjem kalemova, i
- ograničenjem ugla zakretanja na 90° (45° levo i desno, od uzdužne ose nepokretnog kalema).

❖ Pri **merenju jednosmernih struja** aktivni momenat je:

$$M_a = k \cdot I_1 \cdot I_2$$

❖ Pri ravnoteži momenata ima se:

$$M_a = M_o$$

$$k \cdot I_1 \cdot I_2 = c \cdot \alpha$$

$$\alpha = \frac{k}{c} \cdot I_1 \cdot I_2$$

❖ Kao što se vidi **skretanje instrumenta je proporcionalno proizvodu struja koje teku kroz nepokretni i pokretni kalem.**

9.6. ELEKTRODINAMIČKI INSTRUMENTI

❖ Pri **merenju naizmeničnih struja** trenutni aktivni momenat je:

$$m_a(t) = k \cdot i_1(t) \cdot i_2(t)$$

- ❖ Jasno je da kretni kalem ne može da prati brze promene kretnog momenta zbog inercije.
- ❖ On se postavlja u položaj koji odgovara srednjoj vrednosti aktivnog momenta ($\alpha \sim M_{sr}$).
- Generalno, $i_1(t)$ i $i_2(t)$ mogu biti različitih talasnih oblika i različitih učestanosti.
- Ipak, realno je da one budu istog talasnog oblika i iste učestanosti.

9.6. ELEKTRODINAMIČKI INSTRUMENTI

- ❖ Sa stanovišta merenja, realne su dve kombinacije koje zavise od načina povezivanja kalemova.
 - 1) U prvom slučaju kalemovi se vezuju na red.
Kroz njih prolazi ista struja.
Ova kombinacija se koristi za merenje struja i napona.
 - 2) U drugom slučaju kalemovi se napajaju odvojeno,
jedan strujno, a drugi naponski, što omogućava merenje snage.
- ❖ Analiziraće se svaka od ove dve kombinacije vezivanja kalemova u slučaju napajanja jednosmernim i naizmeničnim naponima i strujama.

Hvala Vam na pažnji