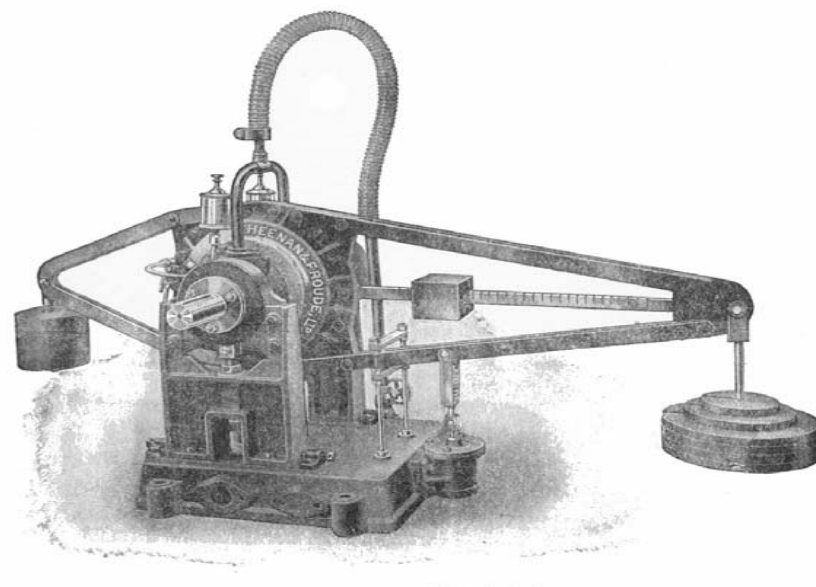




Visoka škola elektrotehike i računarstva
strukovnih studija 2015/2016
Specijalističke studije SNET

Monitoring i
Dijagnostika
Električnih
Mašina

MERENJE MOMENTA I MEHANIČKE SNAGE ELEKTRIČNIH MAŠINA



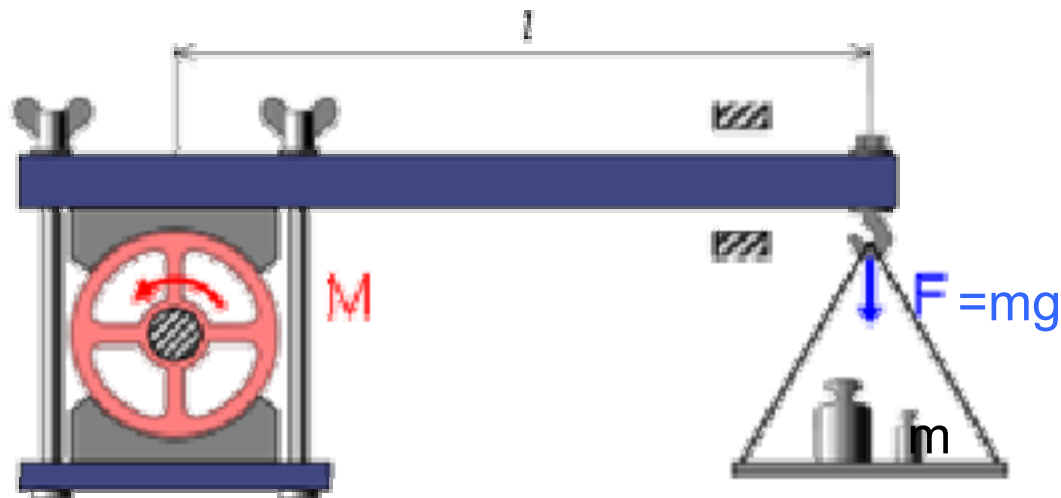
Predmetni profesor: Dr Željko Despotović, dipl.el.inž

UVOD

- Merenje momenta i mehaničke snage električnih mašina je veoma bitno kod određivanja mehaničkih gubitaka kako u praznom hodu tako i pod opterećenjem
- Veliki broj je metoda merenja momenta u ispitivanju električnih mašina: kako onih malih snaga 1W (mikromotori) tako i onih najvećih do 1MW i više, generatora na elektranama i motora u crpnim stanicama
- Sve ove metode podrazumevaju korišćenje kočnica kojim se vrši mehaničko opterećenje ispitivane mašine
- Kočnice koje se najčešće koriste su: Pronijeva kočnica, hidraulična, magnetne, histerezisne, sa vrtložnim strujama, elektrodinamometar, torziometar, električne mašine sa poznatim gubicima.

PRONIJEVA KOČNICA

- Spada u najstarije kočnice i kod nje se mehanička energija motora koji se ispituje pretvara u toplotu
- Pronašao ju je francuski matematičar i inženjer Gaspard de Prony 1821 godine
- Koči slično automobilske kočnici preko Al ili azbestnih obloga.
- Čelični točak i obloge se jako zagrevaju pa je potrebno predvideti vodeno hlađenje sa dovodom i odvodom vode
- Koristi se za manje snage
- Opterećenje se reguliše jačim ili slabijim pritiskanjem obloga
- Moment opterećenja se meri preko dužine kraka l i mase m
- Prednosti: jednostavna, lako se pravi, pregledna, mali prostor koji zauzima
- Mane: hlađenje, teško se reguliše, nemirna ravnoteža, i opterećenje ležišta zbog svoje težine



Snaga na vratilu kočnice M: $P = T \cdot r \cdot \frac{2\pi n}{60}$

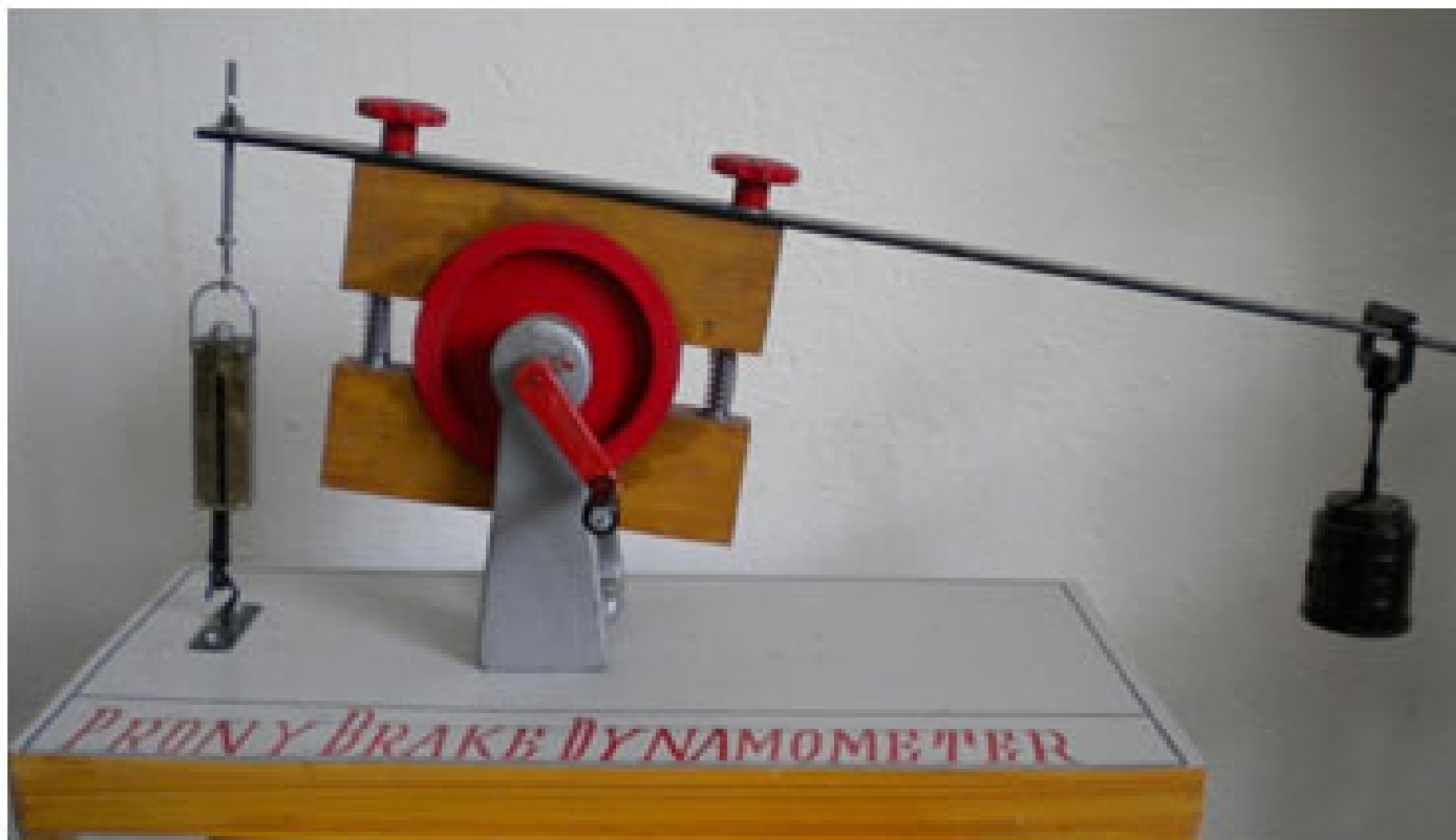
P-snaga na vratilu (W), T-sila trenja (N), r-poluprečnik vratila (m), n-brzina obrtanja vratila (ob/min)

Ravnoteža momenata: $T \cdot r = F \cdot l = mgl$

Konačno snaga P: $P = mgl \cdot \frac{2\pi n}{60}$

Momenat opterećenja je nezavisan od brzine, a snaga raste sa prvim stepenom

Motori malih snaga se mogu ispitivati pomoću kočnica sa trakom i tegovima ili dinamometrom sa oprugom

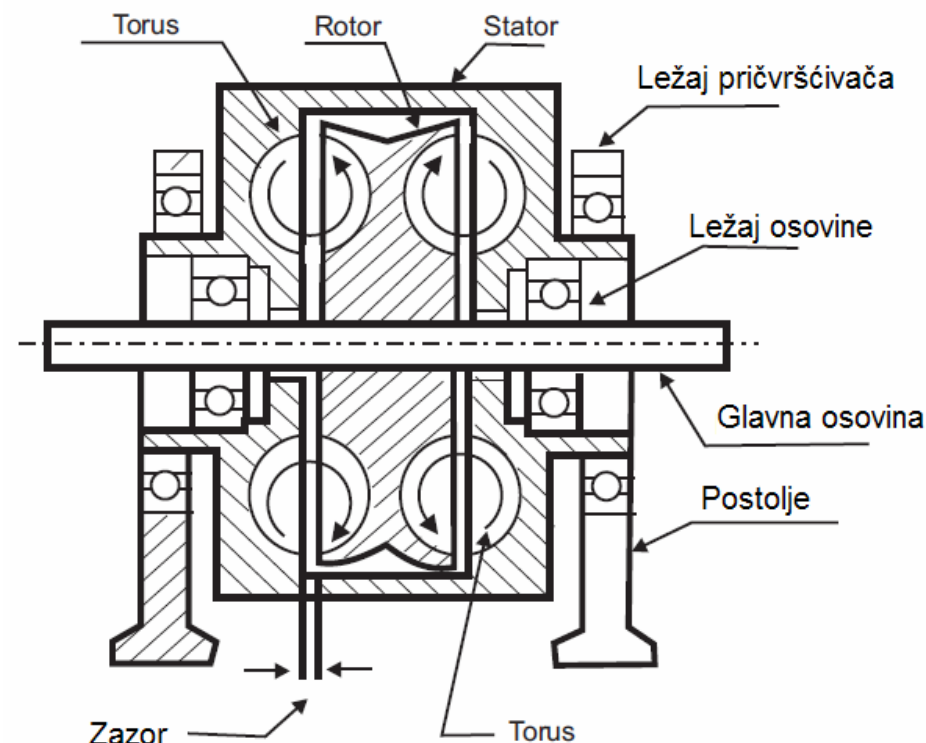


Izgled Pronijeve kočnice

www.hettmachines.com

HIDRAULIČKA KOČNICA

- Zasniwa se na korišćenju sile trenja obrtnog dela u tečnosti (obično voda) pri čemu se mehanička energija motora koji se ispituje pretvara u toplotu
- Upotrebljava se za snage od 100kW do 5MW
- **Njeno funkcionisanje se može upotrebiti sa loše konstruisanom pumpom kojoj je nametnuta cirkulacija spoljašnjeg fluida suprotno od normalnog**
- Snaga opterećenja se reguliše promenom količine tečnosti u kućištu, promenom protoka
- Nije moguća fina regulacija
- Na osovini kočnice su lopatice koje se vrte između statorskih lopatica (rebara) u kojima se nalazi voda; viskoznost teži da povuče rotor što se sprečava kontra tegom
- Moment opterećenja proporcionalan drugom stepenu, a snaga trećem stepenu brzine obrtanja



Sila otpora pri turbulentnom kretanju:
$$F_{ot} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot \rho \cdot S \cdot v^2$$

k - koeficijent koji zavisi od oblika tela, ρ -gustina fluida, S -površina tela normalno na pravac kretanja, v - brzina tela ili fluida

Sila otpora pri laminarnom kretanju:
$$F_{ot} = C \cdot \eta \cdot v$$

TIPOVI HIDRAULIČNIH (vodenih) KOČNICA

Proizvodnja Taylor Dinamometer



DS serija
(1,584 kW - 3,169 kW)



DH serija
do 800kW

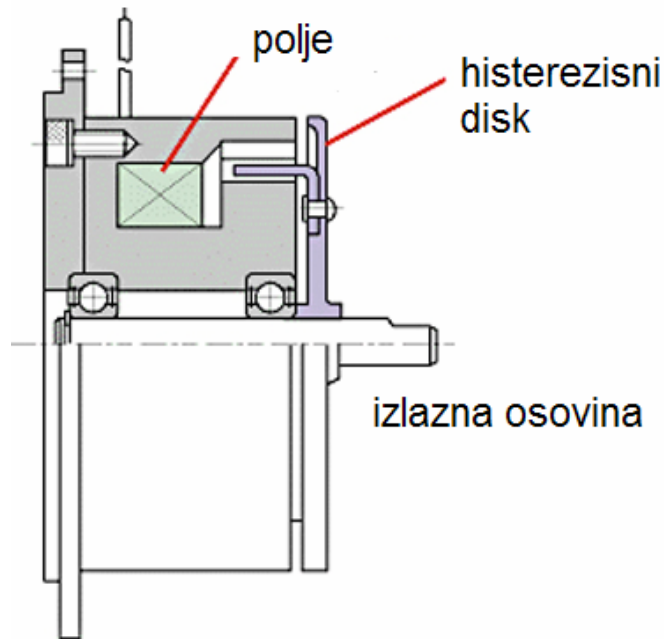
MAGNETNE KOČNICE

- To su kočnice koje rade na principu gubitaka u gvožđu
- Gubici u gvožđu se mogu podeliti na gubitke usled histerezisa proporcionalne učestanosti i gubitke usled vrtložnih struja koji su proporcionalni kvadratu učestanosti
- Otuda i kočnice: histerezisne i sa vrtložnim strujama
- To su generatori jednosmerne struje bez namotaja na induktu, čije je gvožđe tako konstruisano da ima velike gubitke usled histerezisa ili velike gubitke usled vrtložnih struja
- Nekada se prave konstrukcije sa gubicima obe vrste
- Kod ovih kočnica se meri momenat na statoru preko poluge i tegova ili nekada se koristi i torziona opruga sa kazaljkom
- U nastavku će biti više reči o:

-histerezisnoj kočnici

-kočnici sa vrtložnim strujama

HISTEREZISNA KOČNICA



- Rotor u kome se javljaju gubici usled histereza je od tvrdog čelika
- Kod tvrdog čelika je tipična velika površina histerezisnog ciklusa
- Veliki su gubici usled histereza i značajno veći od gubitaka usled vrtložnih struja
- Induktor (namotaj polja) je na statoru i pobuđuje se jednosmernom strujom
- Preko pobudne struje se reguliše momenat opterećenja
- Gubici u rotoru usled histereza su:

$$P_h = \eta \cdot f \cdot B_m^\alpha \cdot m_{Fe} = k\Omega$$

Gubici usled histereza su proporcionalni prvom stepenu brzine obrtanja dok je odgovarajući momenat konstantan i nezavisan od brzine obrtanja (kao kod Pronijeve kočnice)

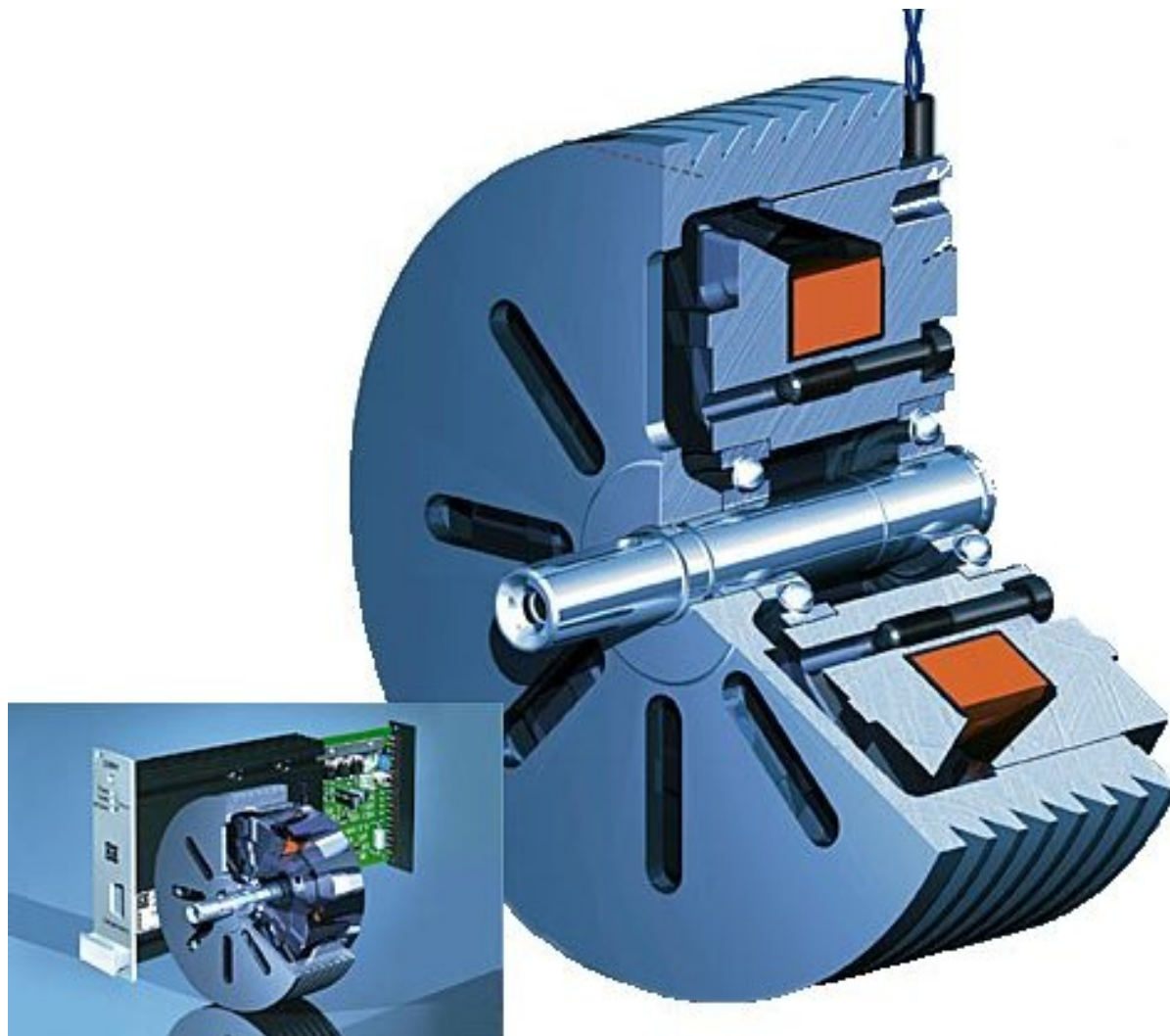
$$M = \frac{P_h}{\Omega} = k$$

Njeno funkcionisanje odgovara loše konstruisanom generatoru u kome se celokupna snaga pretvara u toplotu u obliku gubitaka usled histereza u gvožđu rotora!!

Ove kočnice imaju obično ugrađen i merač broja obrtaja sa digitalnim pokazivanjem.

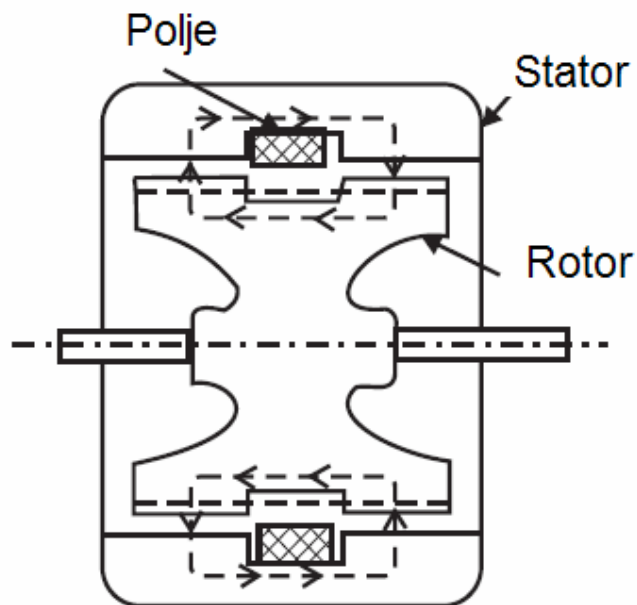
Greška u merenju momenta ne prelazi 1%, dok je greška na brzini obrtanja (digitalni brojač) 0.5%

HISTEREZISNA KOČNICA SA AKVIZICIONOM PLOČOM-PROIZVODNJE DJAUTOMATION (UK)



www.djautomation.co.uk

KOČNICA SA VRTLOŽNIM STRUJAMA



Princip rada



Izgled stvarne kočnice

- Rotor je načinjen od mekog gvožđa velike permeabilnosti, čime se potenciraju gubici usled vrtložnih struja
- Gubici usled vrtložnih struja su dati izrazom:

$$P_v = \sigma \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot m_{Fe} = k\Omega^2$$

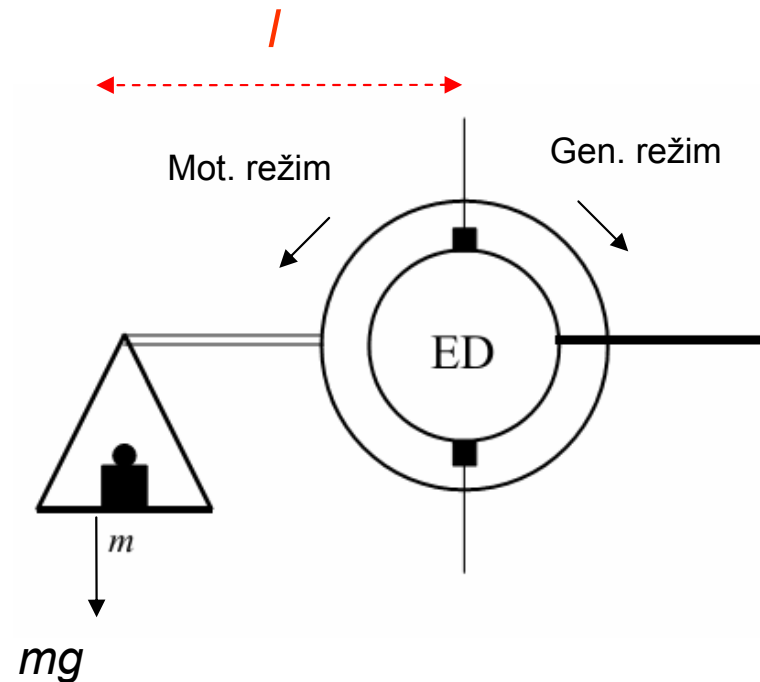
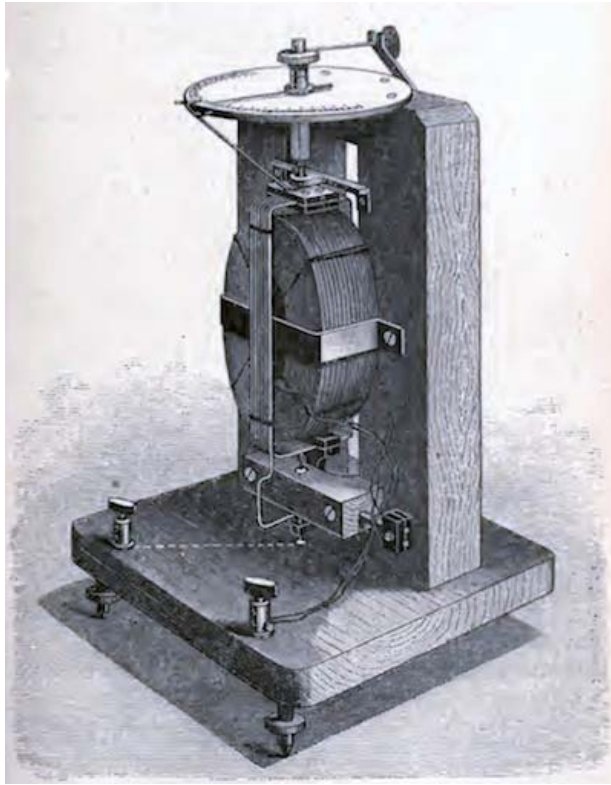
Ovi gubici su srazmerni kvadratu brzine obrtanja, dok je odgovarajući momenat:

$$M_v = \frac{P_v}{\Omega} = k\Omega$$

- Momenat usled vrtložnih struja je proporcionalan prvom stepenu brzine obrtanja, kao kod električni kočnica (generatora)
- Ovo je logično, obzirom da su gubici usled vrtložnih struja električne prirode

ELEKTRODINAMOMETAR

- Jedan od najznačajnijih uređaja za sprovođenje oglada opterećenja
- Naziva se često kao dinamo vaga, klatna mašina.
- U odnosu na prethodno opisane kočnice, predstavlja univerzalnije rešenje, jer omogućava merenje momenta na vratilu motora (funkcioniše kao pogonska mašina) ili generatora (funkcioniše kao kočnica-radna mašina) a da se pri tome energija ne gubi, a zahvaljujući svojoj konstrukciji (pokretnom statoru).
- U elektro-dinamometru su sjedinjene prednosti električnih mašina za opterećenje i pogon i kočnica u pogledu jednostavnog regulisanja opterećenja, mogućnosti rekuperacije energije i direktnog merenja momenta.
- Najpogodnije je upotrebiti mašinu za jednosmernu struju zbog jednostavnog regulisanja opterećenja i brzine obrtanja i mogućnosti dobijanja različitih karakteristika
- Grade se za snage do 500kW.
- Obično imaju ugrađen tahometar radi određivanja mehaničke snage.



Moment i snaga

$$M = m \cdot g \cdot l \quad [\text{Nm}]$$

$$P = M \cdot \omega = \frac{2\pi}{60} \cdot M \cdot n \quad [\text{W}]$$

Moment kada se primeni korekciona masa

$$M = (m \pm m_0) \cdot g \cdot l$$

(+) Gen. režim

(-) Mot. režim

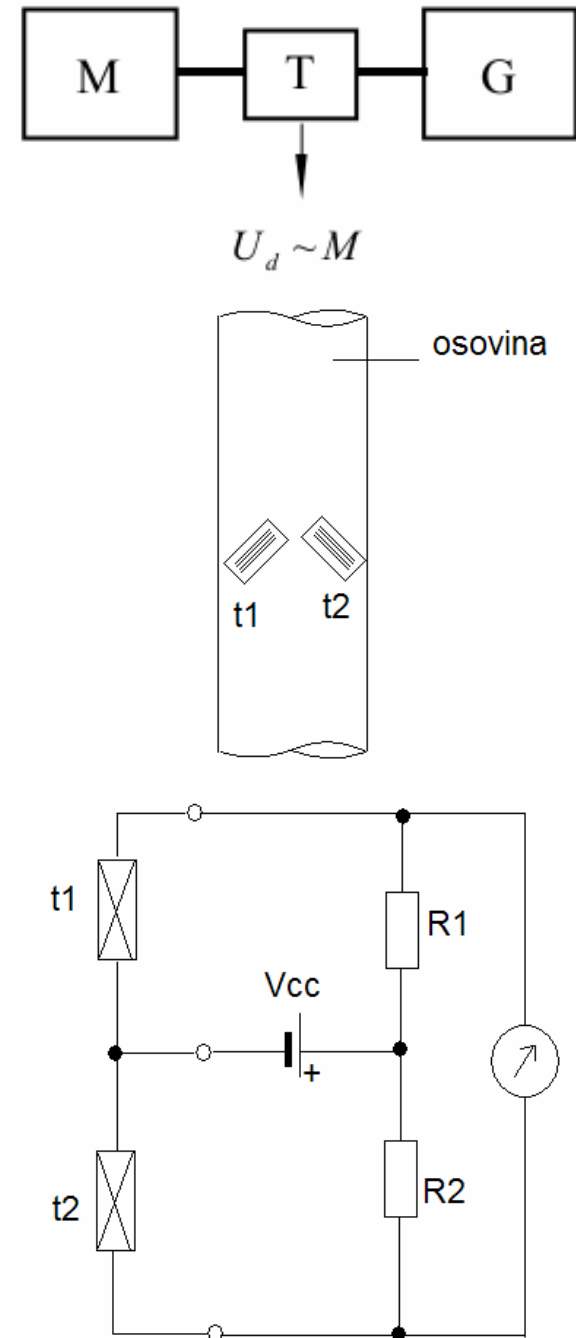
- Klasična konstrukcija je sa dva spoljašnja stojeća nepokretna ležišta i dva unutrašnja pokretna ležišta.
- Unutrašnja ležišta omogućuju da stator mašine može da se zakrene za izvestan ugao (nije čvrsto vezan za podnožje kao kod normalnih mašina).
- Obrtni momenat se meri na statoru, pri čemu koristimo činjenicu da su elektromagnetski obrtni momenti koji deluju na stator i rotor po svojoj veličini jednaki, a po smeru suprotni.
- Kod električnih mašina obrtni moment statora preuzimaju temelji, dok u ovom konkretnom slučaju stator može da se zakrene.
- Tegovima ili oprugom stvara se protiv-momenat statorskom momentu kako ne bi došlo do zakretanja.
- Pre samog merenja potrebno je baždarenje, jer postoje mehanički gubici u samom elektro-dinamometru (spoljašnja ležišta, ventilacija) čiji momenat poluga registruje i kada nema opterećenja.
- Baždarenjem elektro-dinamometra u motorskom režimu rada u praznom hodu dobija se korekciona masa $m_0 = f(n)$



Izgled jedne test ispitne stanice sa elektrodinamoterom

TORZIOMETRI

- Torziometri (ili tzv. merne osovine) se koriste za stacionarne i sporopromenljive režime, jer zbog sopstvenih oscilacija utiču na prelazna stanja.
- Princip rada je baziran na primeni osetljivih mernih traka, čiji se otpor menja uvrćanjem torzionog štapa.
- Torziometar se stavlja između dve mehanički spregnute mašine, a izlazna veličina je jednosmerni napon srazmeran torzionom naprezanju vratila tj. momentu opterećenja.
- Na rotoru torziometra zalepljene su, pod uglom od 45° osetljive otporne merne trake, t1 i t2 koje pripadaju mernom mostu.
- U neopterećenom stanju most je u ravnoteži, dok se u slučaju opterećenja vratila otpori traka t1 i t2 promene, pojavi se naponski (ili strujni) signal koji se posle pojačanja dovodi na instrument za merenje momenta.
- Izlazni signal je linearan, a registruje se promena smera momenta, jer se istovremeno menja i polaritet naponskog signala.
- Trake su osetljive na mehanička naprezanja tako da treba odabrati torziometar prema maksimalnom momentu koji se može pojaviti pri manipulaciji, npr. pri puštanju u rad asinhronog motora.
- Na statoru torziometra postavljeni su držači četkica pomoću kojih se obezbeđuju veze preko rotorskih prstenova sa mernim mostom na rotoru.
- Obično se ima pet četkica: dve za naponsko napajanje, dve za izlaz i jedna za masu.
- Signal sa mosta, umesto preko četkica, može da se prenese modulacijom preko antene.



SPOJNICE SA MERENJEM MOMENTA



Torque meter
0.1 - 77 000 Nm
Proizvodnja: Torquetronic™



Računarski modul za
akviziciju podataka,
momenat/brzina

ELEKTRIČNE MAŠINE SA POZNATIM GUBICIMA

- Električne mašine sa poznatim gubicima su mašine standardne konstrukcije koje služe za opterećenje i pogon ispitivanih mašina.
- Radeći u režimu generatora (kočnica) služe za ispitivanje motora, a radeći u režimu motora (pogonska mašina) služe za ispitivanje generatora.
- Obično se ne može direktno meriti moment opterećenja, pa se isti određuje na osnovu prethodno sprovedenih oglada za određivanje gubitaka.
- **Gubitke u električnim mašinama možemo podeliti na tri osnovne grupe:**
 - gubici koji zavise od napona, učestanosti i brzine obrtanja,
 - gubici pobude kod mašina sa posebnim pobudnim namotajem
 - gubici kojima je uzrok opterećenje mašine, u šta spadaju i razni dopunski gubici.

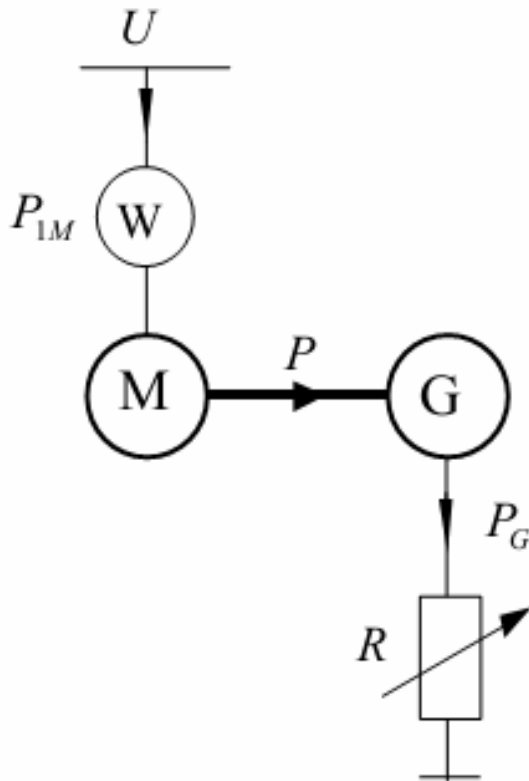
GUBICI U PRAZONOM HODU

- Među gubitke u praznom hodu spadaju gubici u aktivnom gvožđu (feromagnetskim limovima), gubici usled histerezisa i vrtložnih struja.
- Takođe ovde se ubrajaju i gubici trenja i ventilacije (ležaji, kolektorske četkice, klizni kolotovi), i dopunski (dodatni) gubici
- Gubici koji nastaju u namotajima (gubici u Cu) pri ogledu praznog hoda uglavnom se mogu zanemariti, jer su struje relativno male.
- Međutim, kod transformatora manjih snaga i kod svih asinhronih mašina, posebno sporohodnih, sa strujom magnećenja do 80% nominalne struje, treba voditi računa i o gubicima u bakru.
- Među gubitke pobude uzimamo u obzir sve gubitke koji su posledica struje pobude (gubici u bakru pobudnih namotaja, u dovodnim četkicama, u regulacionim otpornicima itd.)

GUBICI USLED OPTEREĆENJA

- Gubitke usled opterećenja čine gubitke u namotajima usled struje opterećenja (gubici u bakru), prelazne gubitke između kolektora i kliznih prstenova i četkica, kao i dopunske gubitke.
- Kod transformatora gubici usled opterećenja se mere u ogledu kratkog spoja i računski razdvajaju.
- Kod asinhronih maši na gubici u bakru i dopunski gubici se računski određuju pri opterećenju mašine, dok se kod sinhronih mašina i mašina jednosmerne struje gubici usled opterećenja mogu izmeriti ili računski odrediti.
- Dopunski gubici nastaju pri opterećenju usled vrtložnih struja, kao i usled površinskog ("skin-efekta") u namotajima mašina naizmenične struje, a ovde se ubrajaju gubici u neaktivnom gvožđu usled rasipnog magnetskog polja nastalog usled struje opterećenja.

ISPITIVANJE MOTORA SA “TVRDOM” KARAKTERISTIKOM



- U slučaju da se vrši ispitivanje mašine (motora) koja ima “tvrdu” karakteristiku mehaničku karakteristiku, $n=F(M)$, kao kočnica može da se upotrebi generator JSS sa paralelnom (otočnom) ili kombinovanom pobudom.
- Prethodno je potrebno za neku brzinu obrtanja, n , koja pripada intervalu posmatrane “tvrde” karakteristike odrediti karakteristiku zavisnost stepena iskorišćenja kočnice od opterećenja $\eta = \eta(P_G)$, gde je P_G korisna električna snaga koju generator (kočnica) predaje mreži.

-Prilikom vršenja ogleda mere se utrošena električna snaga koju ispitivani motor uzima iz mreže, P_1 , snaga P_G i brzina obrtanja.

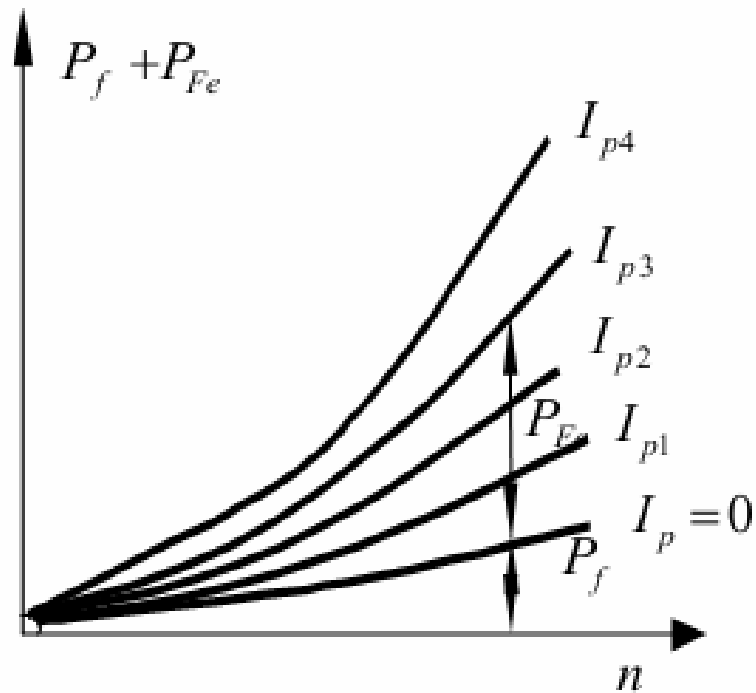
-Na osnovu ovih izmerenih veličina i očitavanja sa karakteristike $\eta = \eta(P_G)$, može se odrediti mehanička snaga na vratilu P , razvijeni obrtni momenat M i stepen iskorišćenja ispitivanog motora.

$$P = \frac{P_G}{\eta_G}, \quad M = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{P}{n}, \quad \eta_M = \frac{P}{P_{1M}}$$

ISPITIVANJE MOTORA SA “MEKOM” KARAKTERISTIKOM

- Za ispitivanje motora sa “mekom” karakteristikom, budući i da se brzina od interesa nalazi u širokom oblasti, bilo bi potrebno da se kod upotrebe generatora sa paralelnom pobudom načini familija karakteristika $\eta = \eta(P_G)$, od kojih se svaka odnosi na neku određenu brzinu.
- Dobijanje niza ovakvih karakteristika, a naročito rad sa njima nije praktičan, jer se mogu napraviti veće greške.
- Za ovu svrhu se najčešće koriste mašine za jednosmernu struju sa nezavisnom pobudom.
- Izborom nezavisnog pobuđivanja isključuju se pobudni gubici a napon na krajevima rotora može proizvoljno da se menja.
- Kakva je procedura?

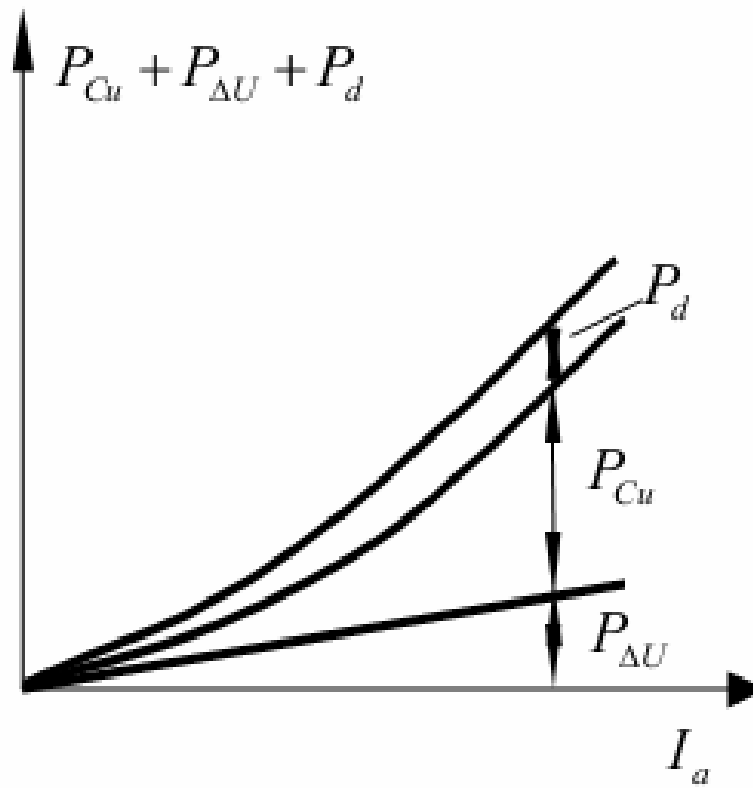
1. ODREDE SE GUBICI USLED OBRTANJA



I_p - pobudna struja koja se menja

$$P_{ob} = P_{ob}(n, I_p) = P_f(n) + P_{Fe}(n, I_p)$$

2. ODREDE SE GUBICI USLED OPTEREĆENJA



I_a- struja indukta koja se menja

$$P_t = P_t(I_a) = P_{Cu} + P_{\Delta U} + P_d$$

3. NA OSNOVU 1 i 2 ODREDE SE GUBICI USLED OPTEREĆENJA

$$P_g = P_f + P_{Fe} + P_{Cu} + P_{\Delta U} + P_d$$

3(a). Ako mašina radi kao motor mehanička (KORISNA) snaga je:

$$P = P_1 - P_g$$


utrošena električna snaga (merimo pomoću ampermetra i volmetra)

3(b). Ako mašina radi kao generator mehanička (KORISNA) snaga je:

$$P_1 = P + P_g$$


korisna električna snaga (merimo pomoću ampermetra i volmetra)

KARAKTERISTIKE MOMENTA GENERATORA JSS

Jednačina za struju:

$$I_a = \frac{E - U}{R_a} = \frac{k_E \Phi n}{R_a} - \frac{U}{R_a}$$

Jednačina za momenat:

$$M_{em} = k_M \Phi I_a = \frac{k_E k_M \Phi^2}{R_a} n - \frac{k_M \Phi U}{R_a}$$

I_a - struja indukta generatora jednosmerne struje;

R_a - ukupni otpor svih namota u rotorskom kolu generatora jednosmerne struje uključujući i prelazni otpor na komutatoru. Ukupni otpor indukta, R_a je funkcija struje indukta

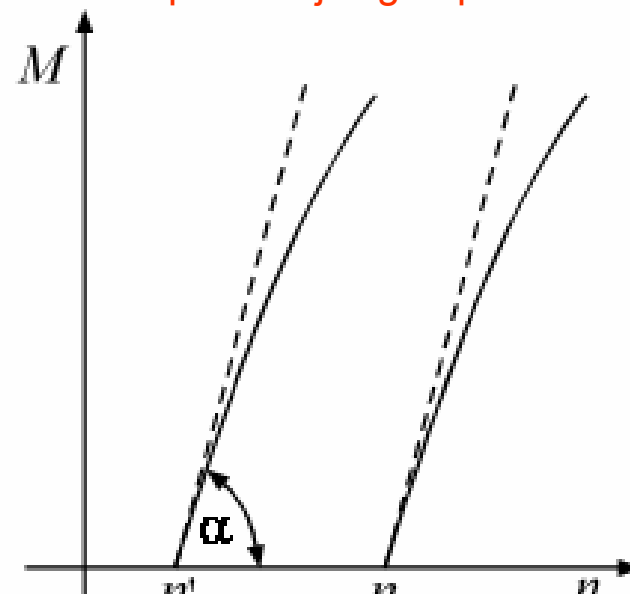
$$R_a = R_a(I_a);$$

n - brzina obrtanja rotora generatora jednosmerne struje;

k_E, k_M - konstrukcione konstante, $k_M = 9,55 k_E$;

M_{em} - razvijeni elektromagnetni moment električne kočnice (generatora jednosmerne struje).

Karakteristika momenta pri radu na mreži promenljivog napona



Za rad generatora jednosmerne struje na otpore, sva energija se troši na otporima, karakteristika ima manji nagib i prolazi kroz koordinatni početak.

Rad kočnice na mrežu je povoljniji od rada kočnice na otpore jer se neutrošeni deo energije vraća u mrežu (rekuperacija), a zbog većeg ugla karakteristike i rad je stabilniji.

Uslov za stabilan rad je da nagib momenta po brzini za kočnicu bude veći od nagiba momenta po brzini za ispitivanu mašinu:

$$\frac{d M_K}{d n} > \frac{d M}{d n}$$

Rad je utoliko stabilniji ukoliko je veća razlika između ovih nagiba!!!

REFERENTNA LITERATURA

1. Miloš Petrović, *Ispitivanje električnih mašina*, Naučna knjiga, Beograd 1988.
2. Branko Mitraković, *Ispitivanje električnih mašina*, Naučna knjiga, Beograd 1991.
3. F. Avčin, P. Jereb, *Ispitivanje električnih strojeva*, Tehniška založba Slovenije, Ljubljana 1968.
4. M. Murić, *Merenje neelektričnih veličina*,
<https://muricmilorad.files.wordpress.com/2011/11/merenje-neelektricnih-velicina.pdf>

HVALA NA PAŽNJI!!!



PITANJA??

Beograd, Decembar 2015