



Fakultet
elektrotehnike i
računarstva



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA
ZAVOD ZA ELEKTROSTROJARSTVO I AUTOMATIZACIJU

ELEKTROMEHANIČKE PRETVORBE ENERGIJE

Laboratorijske vježbe

1. laboratorijska vježba - Mjerenje otpora namota i određivanje
krivulje magnetiziranja DC stroja

Autori:

Izv. prof. dr. sc. Stjepan Stipetić

Prof. dr. sc. Damir Žarko

Dora Penić dipl. ing.

Mario Klanac mag. ing.



Svrha vježbe

- Identifikacija vrste stroja i njegovih nazivnih podataka
 - Mjerenje otpora namota
 - Provedba pokusa praznog hoda istosmjernog motora
 - Određivanje gubitaka u praznom hodu

Zadatak vježbe

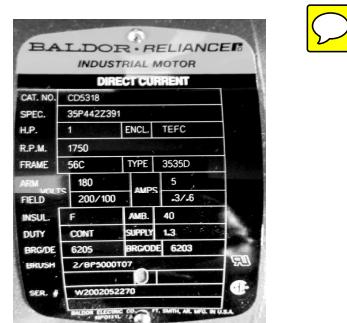
- S natpisne pločice ispitivanog stroja očitati potrebne nazivne podatke: U_n , I_n , P_n , n_n , proizvođač, tip, serijski broj stroja (ili inventarski broj)
 - Odrediti vrstu stroja i spoj namota stroja
 - Skicirati raspored stezaljki
 - Izmjeriti otpor namota
 - Snimiti ovisnost struje uzbude o naponu armature istosmjernog stroja
 - Nacrtati krivulju magnetiziranja
 - Snimiti ovisnost snage koju armturni krug uzima iz mreže, u ovisnosti o naponu armature istosmjernog motora u praznom hodu
 - Nacrtati krivulju užih gubitaka praznog hoda
 - Odrediti gubitke trenja i ventilacije

1. Identifikacija vrste stroja

1.1. Natpisna pločica

Redovito su na natpisnoj pločici istosmjernog stroja navedeni podaci za: napon, struju, snagu, brzinu vrtnje, spoj namota, vrstu zaštite, vrstu pogona, godinu proizvodnje, klasu izolacije pojedinih namota, propise kojima odgovara gradnja stroja, tvornički broj, tip, vrstu izvedbe, naziv proizvodača. Primjer natpisne pločice dan je na slici 1.1.

Natpisna pločica sadrži osnovne podatke o konstrukciji stroja te o njegovim mogućnostima u eksploataciji. Svaka veća intervencija na stroju zahtijeva izmjenu ili dopunu natpisne pločice (npr. pri prematanju, promjeni načina hlađenja i sl.) s obaveznom naznakom imena izvođača ovih promjena.



Slika 1.1. Natpisna pločica istosmjernog stroja Baldor CD5318

1.2. Namoti istosmjernog stroja

Namoti istosmjernog stroja mogu biti:

- namot armature (smješten na rotoru), protjecanjem djeluje u poprečnoj osi stroja
 - uzbudni namoti (nezavisne, poredne, serijske uzbude) osnovni(glavni) i dodatni uzbudni namoti smješteni na statoru na glavnim polovima s djelovanjem u uzdužnoj osi stroja
 - namot pomoćnih polova i kompenzacijski namot (smješteni na pomoćne polove na statoru i u polnu papuću glavnih polova) s djelovanjem u poprečnoj osi stroja

1.3. Oznake stezaljki prema propisima

Stezaljke istosmjernih strojeva se prema propisima označavaju:

- A1-A2 namot armature
 - B1-B2 namot pomoćnih polova
 - C1-C2 kompenzacijski namot
 - D1-D2 namot serijske uzbude
 - E1-E2 namot poredne uzbude

- F1-F2 namot nezavisne uzbude

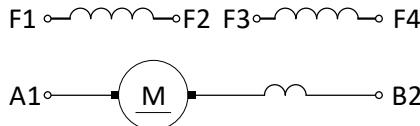
Za druge specifične slučajeve slični je princip označavanja. Na primjer:

$$\left. \begin{array}{l} 1C1 (C1)-1C2 (C2) \\ 2C1 (C3)-2C2 (C4) \end{array} \right\} \text{Podijeljeni namot kompenzacije}$$

$$\left. \begin{array}{l} 1F1 (F1)-1F2 (F2) \\ 2F1 (F3)-2F2 (F4) \end{array} \right\} \text{Dva odvojena namota nezavisne uzbude}$$

Dva uzbudna namota imaju potpomagajuće magnetsko djelovanje ako u oba namota struja prolazi od stezaljke s nižim (višim) brojem dodanim iza slova oznake namota k stezaljci s višim (nižim) brojem dodanom iza slova oznake namota.

Magnetska polja namota pomoćnih polova i kompenzacijskog namota imaju ispravni polaritet jedno prema drugom i prema magnetskom polju namota armature, ako u svim ovim namotima struja prolazi od stezaljke s nižim (višim) brojem dodanom iza slova oznake namota k stezaljci s višim (nižim) brojem dodanom iza slova oznake namota.



Slika 1.2. Označavanje stezaljki kod stroja s dva uzbudna namota

2. OTPOR NAMOTA

Uobičajene metode mjerjenja otpora namota su:

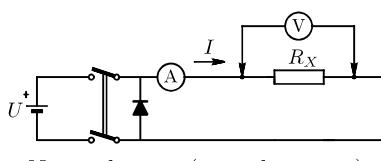
- mjerjenjem struje i napona, (tzv. U-I metoda),
- Thomsonovim mostom,
- Wheatstoneovim mostom i
- digitalnim mjeračem otpora.

U-I metoda (u odgovarajućem spoju i uz korištenje odgovarajućeg instrumentarija), prikladna je za sve veličine otpora. Thomsonov most se koristi za otpore od 0,001 do 1 Ω , a Wheatstoneov most za otpore veće od 1 Ω . Posebnu pažnju treba posvetiti kod mjerjenja otpora namota sa znatnim induktivitetom, koji pri mjerenu može izazvati uništenje osjetljivog nul instrumenta. Instrumenti za direktno mjerjenje otpora za veće otpore imaju priključak sa 2 mjerna vodiča, kao Wheatstoneov most, dok za male otpore imaju priključak sa 4 mjerna vodiča (2 strujna i 2 naponska), kako bi se eliminirao utjecaj otpora mjernih vodova na točnost mjerjenja. Stoga se za male otpore obično koriste posebni mjerni vodiči-sonde.

2.1. U-I metoda mjerjenja otpora namota

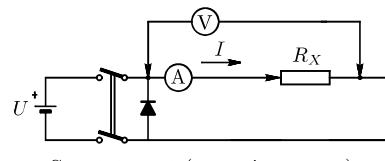
U-I metoda je univerzalno primjenjiva i jednostavna. Ovisno o veličini otpora namota koji se mjeri R_X (slika 2.1), koristi se tzv. naponski ili strujni spoj, kako bi pogreška pri mjerenu bila što manja. Najčešće je otpor voltmetra R_V poznat, pa se lakše računa korekcija u slučaju korištenja naponskog spoja.

$$R_X = \frac{U}{I - \frac{U}{R_V}}$$



Naponski spoj (za male otpore)

$$R_X = \frac{U - I \cdot R_A}{I}$$



Strujni spoj (za veće otpore)

Slika 2.1. Sheme za provedbu naponskog i strujnog spoja U-I metode

2.2. Utjecaj temperature na veličinu otpora

Otpor namota ovisi o njegovoj temperaturi i raste s porastom temperature. Zato se kod svakog mjerjenja otpora obavezno mora mjeriti i temperatura namota. Kod mnogih mjerjenja se postupa i obratno; iz izmjerena otpora toplog namota, a uz poznati otpor hladnog namota, računa se promjena temperature namota. Ovako određenu temperaturu smatramo prosječnom. Temperatura najtoplijeg mesta u namotu je 5 - 15 °C veća od prosječne, ovisno o načinu mjerjenja.

Za promjenu otpora s temperaturom, za bakrene namote, vrijedi:

$$R_\vartheta = R_{\vartheta_0} \cdot \frac{235 + \vartheta}{235 + \vartheta_0}$$

gdje je:

R_ϑ - otpor kod temperature ϑ (topli otpor)

R_{ϑ_0} - otpor kod temperature ϑ_0 (hladni otpor)

235 - konstanta za bakar kod 20°C, temperaturni koeficijent bakra iznosi $1 / (235 + \vartheta_0)$

Često se temperatura "hladnog" namota podudara s temperaturom okoline. Uz poznati "hladni" i "topli" otpor (R_{ϑ_0} , R_ϑ) te temperaturu hladnog namota računa se prosječna temperatura ϑ toplog namota:

$$\vartheta = \frac{R_\vartheta \cdot (235 + \vartheta_0)}{R_{\vartheta_0}} - 235 = \left(\frac{R_\vartheta}{R_{\vartheta_0}} - 1 \right) \cdot (235 + \vartheta_0) + \vartheta_0$$

2.3. Dozvoljena trajna temperatura namota po propisima

Iznose dozvoljene trajne temperature namota određuju propisi prema kojima se ti iznosi određuju ovisno o klasi izolacije namota. Trajno povišenje temperature za 6 °C uzrokuje skraćenje životne dobi izolacije na polovinu.



Klasa izolacije	Maks. temperatura (°C)	Temperatura okoline (°C)	Rezerva za najtoplje mjesto (°C)	Dozvoljena nadtemperatura (K)	Materijal
Y	90	40			PVC - mekana plastika
A	105	40	5	60	papir, tkanina
B	130	40	10	80	izolacija na bazi poliestera
F	155	40	15	100	izolacija na bazi poliestera
H	180	40			tinjac, staklo
C	> 180	40			tinjac, staklo

2.4. Provedba mjerjenja otpora namota

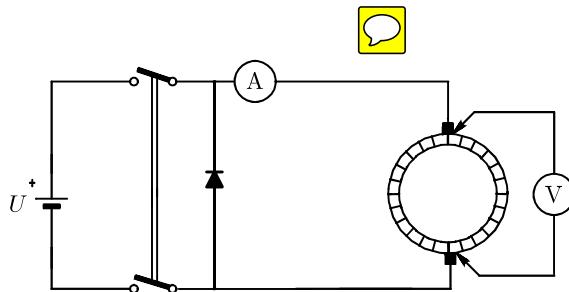
Mjerjenje se provodi U-I metodom prema sl. 2.2. Istosmjernim izvorom podešava se veličina mjerne struje. Veličinu mjerne struje treba odabrati prema veličini nazivne struje dotičnog namota i to tako, da ne prelazi 10 % nazivne struje, jer se samo tada može zanemariti povećanje otpora uslijed zagrijavanja koje izaziva mjerna struja.

Mjerno područje klasičnih pokaznih instrumenata (ampermetra i voltmetra) treba tako odabrati, da im otklon bude što veći (preko 2/3 punog otklona), kako bi pogreška mjerjenja bila što manja. Obavezno se mora izmjeriti i zabilježiti temperatura namota (odnosno okoline), kod koje je vršeno mjerjenje otpora. Kada nema podatka o temperaturi okoline, prepostavlja se 20 °C.

Posporij, to je veći induktivitet. Zato se očitanje napona voltmetrom smije provesti tek kad struja dosegne svoju konačnu vrijednost. Naime, kod priključenja istosmjernog napona na namot koji zapravo predstavlja serijski RL krug, struja raste po eksponencijalni određenoj vremenskom konstantom namota, a koja može iznositi i nekoliko minuta. Ukoliko se vrijednost struje očita odmah nakon uključenja, dobiva se veća vrijednost otpora od stvarne. Zbog toga se s očitavanjem treba pričekati cca 5 vremenskih konstanti. S druge strane, u tom vremenu može se, uslijed prolaska struje, povećati temperatura namota u odnosu na početnu vrijednost. Prva poteškoća (spori porast struje) se rješava stavljanjem predotpora u mjerni krug uz upotrebu višeg mjernog napona pri čemu se ukupna vremenska konstanta mjernog kruga smanjuje. Druga poteškoća (porast temperature namota uslijed mjerne struje) može se smanjiti upotrebom što osjetljivijeg voltmetra, koji omogućuje mjerjenje s malim iznosom struje. Mjerjenje se vrši mjernom strujom iznosa do 10 %

I_n , jer je pri tome zagrijanje namota mjerena tokom mjerena do 1 % nazivnog. Prije isključivanja struje potrebno je odspojiti voltmetar (milivoltmetar), kako ne bi došlo do njegovog oštećenja zbog inducirana visokog napona pri isključivanju struje u krugu induktivitet. Često se koriste posebni mjeri šiljci s priključcima za strujni i naponski mjeri krug, kod kojih se najprije odspaja voltmetar, a tek onda prekida strujni krug.

Prilikom mjerena otpora namota armature potrebno je mjerena pada napona provesti direktno na kolektoru (da se ne mjeri i pad napona četkice i prelazni pad napona na kontaktu kolektor – četkica, slika 2.2) .



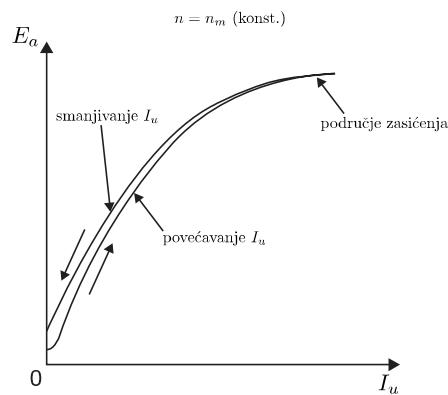
Slika 2.2. Mjerene otpora namota armature U-I metodom

3. Pokus praznog hoda

Praznim hodom naziva se stanje u kome je električni stroj naponski i magnetski normalno opterećen te je bez pravog vanjskog opterećenja (mehaničkog ili električnog). Pokus praznog hoda daje nam uvid u magnetsko stanje stroja, gubitke i mehaničko ponašanje stroja u vrtnji. Izvodi se pri nazivnoj brzini vrtnje, nazivnom naponu i (kod AC strojeva) pri nazivnoj frekvenciji. Prema načinu izvođenja postupka, razlikujemo motorski i generatorski postupak. Najvažniji podatak koji se može dobiti iz pokusa praznog hoda je krivulja/karakteristika praznog hoda. Osim karakteristike praznog hoda u pokusu praznog hoda mjeri se i gubici čijom obradom se može doći do podatka o gubicima trenja i ventilacije.

3.1. Karakteristika praznog hoda

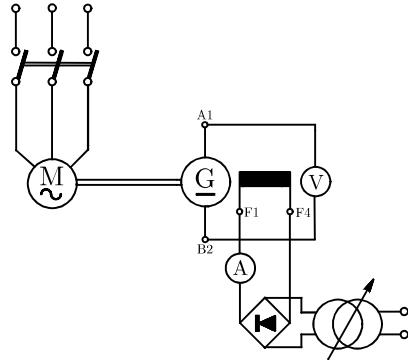
Krivulja magnetiziranja (karakteristika praznog hoda, petlja histereze) prikazuje ovisnost inducirana napona E (koji je, uz zanemarenje pada napona na četkicama i namotu armature jednak napunu na stazaljkama stroja U_0 u praznom hodu) u ovisnosti o uzbudnoj struci I_u uz konstantnu brzinu vrtnje (sl. 3.1).



Slika 3.1. Krivulja magnetiziranja istosmjernog stroja

3.2. Generatorska metoda

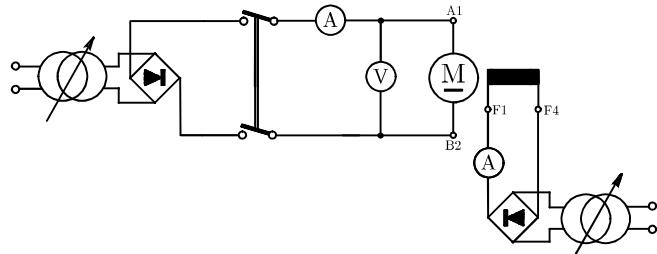
Kod ove metode ispitivani stroj radi kao generator u praznom hodu, pri čemu pogonski stroj održava konstantnu brzinu vrtnje. Uzbudna struja ispitivanog istosmjernog stroja mijenja se od maksimalne pozitivne vrijednosti do maksimalne negativne vrijednosti i obrnuto. Mijenjajući uzbudnu struju u cijelom navedenom rasponu dobiva se cijela petlja histereze.



Slika 3.2. Shema spoja snimanja krivulje magnetiziranja korištenjem generatorske metode

3.3. Motorska metoda

Za motorsku metodu nije potreban dodatni pogonski stroj. Ispitivani stroj se priključuje na istosmjernu mrežu promjenjivog napona kao motor u praznom hodu, dok se uzbudna napaja iz posebnog nezavisnog izvora. Povišenjem napona U_0 istosmjerne mreže povećat će se brzina vrtnje n . Ako se tada poveća uzbudna struja da se brzina vrtnje opet smanji na onu početnu kod koje se snima karakteristika zasićenja, dobiva se par vrijednosti U_0, I_u . Za male vrijednosti uzbudne struje ovakvo snimanje ne može se provesti jer bismo za pokrivanje gubitaka trebali velike iznose armaturne struje. U tom slučaju gubici na otporima u rotorskom krugu ne bi više bili zanemarivi, i više ne bismo imali stanje praznog hoda. Također, velika struja bi mogla oštetiti kolektor. Motorska metoda praznog hoda ne može se primijeniti kod strojeva sa serijskom uzbudom, kod kojih je uzbudna struja ujedno i struja opterećenja. Kao motor, istosmjerni stroj sa serijskom uzbudom ne može raditi u praznom hodu zbog opasnosti od pobjega.



Slika 3.3. Shema spoja motorske metode pokusa praznog hoda

3.4. Gubici u praznom hodu

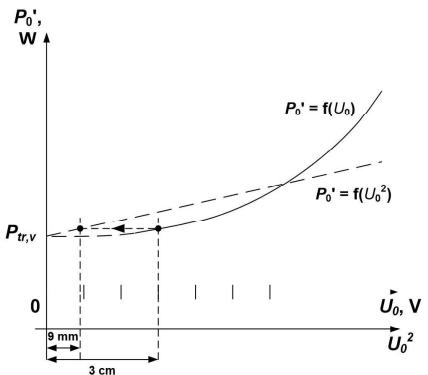
Gubici praznog hoda jednaki su snazi koju armaturni krug u praznom hodu uzima iz mreže. U praznom hodu neopterećenog stroja mreža pokriva:

- gubitke u željezu uzrokovane histerezom i vrtložnim strujama P_{Fe} ,
- gubitke u namotima armature P_{Cua} ,
- gubitke četkica P_{ctk} ,
- gubitke trenja i ventilacije $P_{tr,v}$

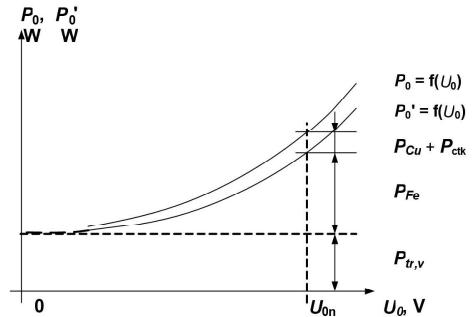
U dijagram se unose (vidi sliku 3.5):

- mjereni gubici praznog hoda P_0 ,
- uži gubici praznog hoda dobivaju se odbijanjem gubitaka u namotu $P_{Cua} = R_{st} \cdot I_0^2$ i gubitaka četkica $P_{ctk} = \Delta U \cdot I_0$ od P_0 , za svaku točku ($P'_0 = P_0 - P_{Cua} - P_{ctk}$),
- gubici trenja i ventilacije $P_{tr,v}$ ekstrapolacijom karakteristike $P'_0 = f(U_0)$ do 0 dobiveni $P_{tr,v}$, koji su konstantni u cijelom području. Ekstrapolacija se provodi tako da se nacrtava krivulja $P'_0 = f(U_0)$. U području 30-70 % U_n ova krivulja je približno linearna, te se njenom linearnom aproksimacijom do ordinate pouzdano dobiva vrijednost $P_{tr,v}$, kao na slici 3.5.
- razliku između P'_0 i $P_{tr,v}$ čine ukupni gubici u željezu P_{Fe}

Kvadratnu aproksimaciju najlakše (bez posebnog računanja) na milimetarskom papiru ostvarimo tako da očitamo vrijednost snage za "okrugli" broj centimetara napona. Zatim za istu vrijednost snage nanesemo kvadrat broja centimetara u milimetrima (npr. za 3 cm napona nanesemo



Slika 3.4. Aproksimacija gubitaka pomoću kvadratne skale



Slika 3.5. Rasподјела gubitaka praznog hoda istosmjernog motora

$3^2 = 9 \text{ mm}$). Ovako iskonstruirana krivulja će biti približno pravac u području 30-70 % U_n , ovisno o zasićenju. Njen nagib će biti dovoljno velik, da možemo za napon jednak nuli očitati pouzdano gubitke trenja i ventilacije. Kod manjih strojeva, gdje brzina znatno pada s naponom i struja iz mreže raste, ovu aproksimaciju radimo na krivulji užih gubitaka.

3.5. Provedba mjerenja u pokusu praznog hoda

U ovoj vježbi pokus praznog hoda provodi se motorskom metodom prema slici ???. Istosmjerni motor potrebno je zaletiti na nazivnu brzinu vrtnje podešavanjem uzbude i armature. Tijekom pokusa mjeri se napon i struja armature, snaga koju armturni krug uzima iz mreže, uzbudna struja i brzina vrtnje. Da bi se dobila karakteristika praznog hoda mjerenja se ponavljaju uz promijjenjeni napon armature, dok se brzina vrtnje drži konstantnom promjenom uzbude. Mjerenje započeti pri naponu armature u iznosu od 120 % U_n , te potom smanjivati napon armature dok uzbudna struja ne padne na otprilike 30 % svoje nazivne vrijednosti. Na početku pokusa uzbuda se postepeno povećava do nazivne vrijednosti, te se zatim uključuje napajanje armature. Prilikom uključenja armature u krug treba paziti na vrijednost napona, jer zbog malog otpora i induciranog napona $E = 0$ u mirovanju postoji opasnost od velike struje prilikom uključenja. Kako bi se izbjegla prevelika struja armature, napon armature je potrebno postepeno povećavati dok se stroj ne zavrти na nazivnu brzinu.

Literatura

- [1] Materijali s predavanja
<https://www.fer.unizg.hr/predmet/epe/materijali>
- [2] Wolf R.: Ispitivanje električnih strojeva; skripta
- [3] Gašparac I., Cettolo M.: Ispitivanje električnih strojeva; skripta
- [4] Stephen J. Chapman: Electric Machinery Fundamentals, McGraw-Hill, International Edition, 2005. ISBN: 0073529540