

Određivanje stepena iskorištenja mašina jednosmjerne struje

Igor Maletić

Student drugog ciklusa studija
Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Istočnom Sarajevu
Istočno Sarajevo, Republika Srpska
igor.maletic@yahoo.com

Sadržaj— U ovom radu su opisane metode za određivanje stepena iskorištenja i realizovano praktično određivanje stepena iskorištenja mašine jednosmjerne struje indirektnom metodom u Laboratoriji za električne mašine Elektrotehničkog fakulteta u Istočnom Sarajevu. Opisane su metode za određivanje stepena iskorištenja, posebna pažnja je posvećena indirektnoj metodi odvojenih gubitaka. Drugi dio rada je posvećen praktičnom dijelu u kojem je izvršeno određivanje stepena iskorištenja za motor jednosmjerne struje sa nezavisnom pobudom.

Ključne riječi— stepen iskorištenja; metode; električne mašine; mašine jednosmjerne struje

I. UVOD

Korisnicima električnih mašina su veoma važne tehničko-ekonomske karakteristike mašina. U razvijenim svjetskim državama, a sve više i kod nas se insistira na smanjenju gubitaka i povećanju stepena iskorištenja. Gubici u električnim mašinama određuju stepen iskorištenja i utiču na pogonske troškove. Stepen iskorištenja η , predstavlja jednu od najbitnih karakteristika mašina i definisan je kao odnos između korisne i uložene snage:

$$\eta = \frac{P_{izl}}{P_{ulz}}. \quad (1.1)$$

Korisna snaga je jednaka razlici uložene snage i ukupnih gubitaka:

$$P_{izl} = P_{ulz} - P_g. \quad (1.2)$$

Rezultate koje dobijamo daju nam informaciju o tome kako će se ispitivana mašina ponašati tokom eksploatacije.

Rad je organizovan na sljedeći način:

Drugo poglavlje opisuje metode za određivanje stepena iskorištenja mašina jednosmjerne struje. Metode za određivanje stepena iskorištenja su:

- direktna,
- indirektna,

- opozicione.

Treće poglavlje opisuje realizaciju praktičnog dijela rada, u kojem je opisan mjerni postupak, obrađeni su rezultati, grafici, mjerne šeme i specifikacija korištene opreme.

II. METODE ZA ODREĐIVANJE STEPENA ISKORIŠTENJA MAŠINA JEDNOSMJERNE STRUJE

A. DIREKTNA METODA

Direktna metoda (neposredna) je metoda kod koje se posebno mjere uložena i korisna snaga i na osnovu njih se računa stepen iskorištenja. Mjerenja uložene i korisne snage je potrebno raditi sa istom tačnošću, da bi dobijeni rezultati bili što tačniji. Izračunavanje stepena iskorištenja za motor i generator dobijamo iz sljedećih izraza:

$$\eta_M = \frac{P_{iz}}{P_{ul}} = \frac{P_{meh}}{P_{el}}, \quad (2.1)$$

$$\eta_G = \frac{P_{iz}}{P_{ul}} = \frac{P_{el}}{P_{meh}}. \quad (2.2)$$

Prilikom određivanja stepena iskorištenja potrebno je mašinu potpuno opteretiti, odnosno dovesti je u radno stanje koje će imati u pogonu. Jedan od problema koji se javlja prilikom određivanja stepena iskorištenja mašina jednosmjerne struje primjenom direktne metode je mjerenje mehaničke snage. Nedostaci direktne metode se ogledaju u sljedećem:

- velika potrošnja energije u toku ispitivanja,
- velika greška pri izračunavanju stepena iskorištenja,
- potrebno je obezbijediti odgovarajuću opremu za nominalno opterećenje mašine.

Direktna metoda pored svih nedostataka i grešaka koje se prave prilikom određivanja stepena iskorištenja ostaje jedina metoda koja se može primjeniti za određivanje stepena iskorištenja mašina male snage. [1]

B. INDIREKTNE METODE

1) METODA POVRATNE ENERGIJE

Metoda povratne energije podrazumijeva ispitivanje jedne ili više na odgovarajući način spregnutih pomoćnih mašina, pri čemu se iz pomoćnog izvora, mreže ili pogonske mašine pokriva samo onaj dio energije koji odgovara gubicima svih mašina koje učestvuju u pogonu. Pored primjene za određivanje gubitaka u radu, ove metode se koriste i za ispitivanje zagrijavanja i za provjeru funkcionisanja mašine u pogonu. [2]

2) METODA ODVOJENIH GUBITAKA

Indirektna metoda odvojenih gubitaka je veoma jednostavna i lako se može primijeniti kod mašina jednosmjerne struje. Ukupne gubitke mašine jednosmjerne struje dobijamo kao sumu gubitaka u praznom hodu, gubitaka pobude, gubitaka pri opterećenju i dodatnih gubitaka.

$$\sum P_g = P_0 + P_e + P_{obt} + P_d \quad (2.3)$$

Gubitke kod mašina jednosmjerne struje možemo podijeliti i na sljedeći način:

- gubici zavisni od opterećenja,
- gubici nezavisni od opterećenja.

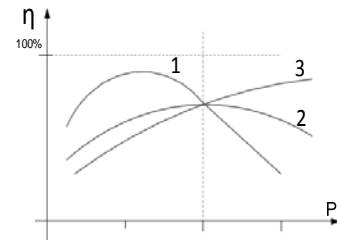
U zavisnosti od odnosa između ove dvije grupe gubitaka zavisice i izgled krive za određivanje stepena iskorištenja, prikazan na Sl. 1

- Mehanički gubici su posljedica trenja u ležištima i trenja pokretnih dijelova mašine o vazduh ili uopšte o okolni fluid i obično se nazivaju gubicima trenja i ventilacije. Mehaničke gubitke određujemo pomoću oglada praznog hoda u motorskom režimu. Radi lakšeg određivanja pojedinačnih mehaničkih gubitaka i gubitaka u gvožđu, crtamo karakteristiku koja je prava linija i prikazana je na Sl. 2. [1]
- Gubici u gvožđu se sastoje od gubitaka usljed histerezisa i gubitaka usljed vrtložnih struja. Utrošena snaga usljed histerezisa, po jedinici mase lima, proporcionalna je broju perioda u sekundi, odnosno proporcionalna je učestalosti:

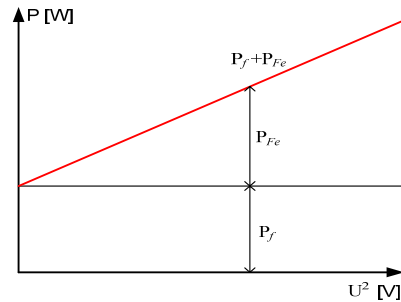
$$P_H = fW_H = k_H f B_{max}^2 \left[\frac{W}{kg} \right]. \quad (2.4)$$

Gubici usljed vihornih struja proporcionalni su kvadratu indukovane elektromotorne sile (ems) u parazitnim kolima, a obrnuto proporcionalni specifičnom otporu lima:

$$P_v \approx \frac{e^2}{\rho} \quad (2.5)$$



Slika 1. Promjena stepena iskorištenja u zavisnosti od odnosa gubitaka



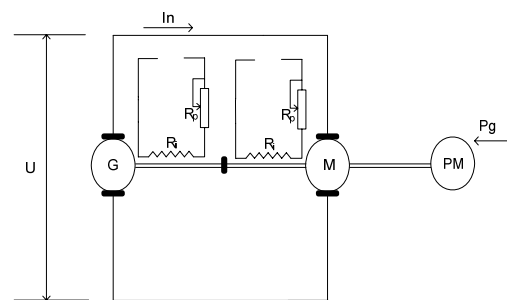
Slika 2. Zavisnost gubitaka

3) OPOZICIONE METODE

Za ove metode je nepohodno da imamo dvije mašine koje su spregnute mehanički ili električno u opoziciju tako da jedna radi kao motor, a druga kao generator. Ove metode imaju dobre osobine direktne i indirektno metode. [3] Opozicione metode su:

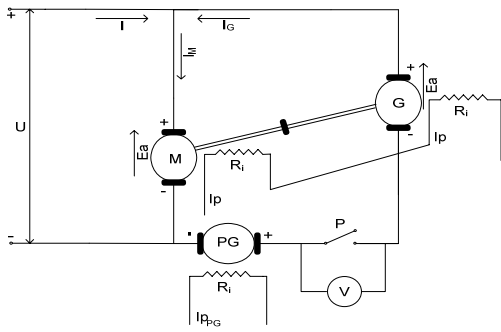
- Hopkinsonova metoda,
- Blondelova metoda,
- Hačinsonova metoda,
- Kapova metoda.

Šema ispitivanja za Hopkinsonovu metodu je data na Sl. 3.



Slika 3. Šema Hopkinsonove metode

Šema ispitivanja za Hačinsonovu metodu je data na Sl. 4.



Slika 4. Šema Hačinsonove metode

III. PRAKTIČAN RAD

U Laboratoriji za električne mašine Elektrotehničkog fakulteta, Univerziteta u Istočnom Sarajevu izvršeno je ispitivanje mašine jednosmjerne struje, sa ciljem određivanja stepena iskorištenja date mašine, primjenom indirektna metode, tj. metode odvojenih gubitaka. Prilikom oglada korištena je mašina jednosmjerne struje sa nezavisnom pobudom. Osnovni podaci, sa natpisne pločice ispitivanog motora, dati su u Tabeli 1:

Prilikom mjerenja napona pobude i armature motora jednosmjerne struje korištena su dva analogna, jednosmjerna voltmetra, na Sl. 5 označena sa V-.

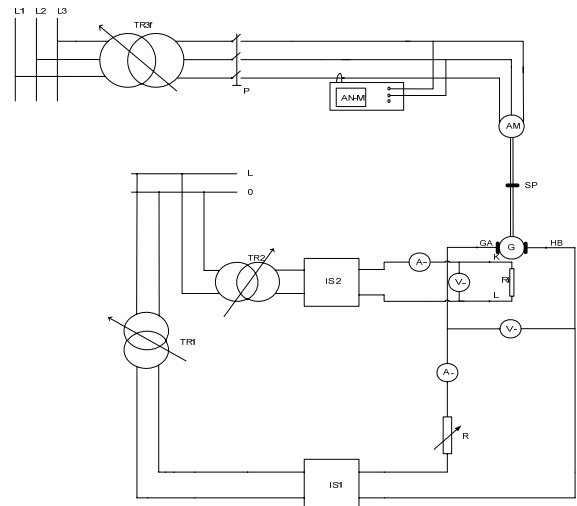
Za mjerenje jednosmjerne struje pobude i armature motora jednosmjerne struje korištena su dva analogna, jednosmjerna ampermetra, na Sl. 5 označena sa A-.

Za upuštanje u rad mašine jednosmjerne stuje korištena su i dva monofazna ispravljača označena na mjernoj šemi oznakama IS1 i IS2.

Za pokretanje asinhronog motora koristio je trofazni, regulacioni transformator, na Sl. 5 označen sa TR3f.

Mjerenja ulazne snage asinhronog motora su izvršena analizatorom mreže, na Sl. 6 označen sa AN-M.

Izgled mjerne šeme je prikazan na Sl. 5



Slika 5. Izgled mjerne šeme

Mašinu jednosmjerne struje pokrećemo, postepeno povećavajući napone na regulacionim transformatorima TR1 i TR2, kontrolišući vrijednosti na voltmetrima V- i ampermetrima A-. Asinhroni motor pokrećemo, postepeno povećavajući napon na trofaznom regulacionom transformatoru TR3f, kontrolišući ulaznu snagu na analizatoru mreže *Fluke 315*. Izgled mrežnog analizatora *Fluke 315* i način vezivanja dati su na Sl. 6.:

A. OGLAD PRAZOG HODA

Ovaj ogled je veoma važan jer na osnovu njega određujemo mehaničke gubitke i gubitke u gvožđu. Ogled praznog hoda je raden u generatorskom režimu rada. Kako je za ogled praznog hoda bila potrebna baždarena pogonska mašina sa poznatom zavisnošću izlazne od ulazne snage,, određeni su i neki od neophodnih gubitaka asinhrona mašine.

1) ODREĐIVANJE GUBITAKA U GVOŽĐU

Ovi gubici su određeni na osnovu razlike izmjerene ulazne snage u pogonsku asinhronu mašinu za dva režima: kada je ispitivana mašina bila pobuđena i nepobuđena. Ako je generator nepobuđen izlazna snaga je jednaka samo mehaničkim gubicima ispitivane mašine.

$$P_{izl} = P_{fG} \quad (3.1)$$

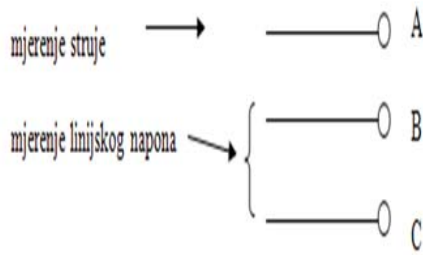
Za slučaj kada je generator pobuđen onda izlazna snaga pokriva mehaničke gubitke i gubitke u gvožđu.

$$P_{izl} = P_{fG} + P_{FeG} \quad (3.2)$$

Dobijeni rezultati mjerenja su dati u Tabeli 2.

TABELA I. OSNOVNI PODACI O MOTORU JEDNOSMjerne STRUJE

Proizvođač	VEB Elbtalwerk
Tip	GGB 132.1K
Serijski broj	216-630
Nominalni napon	230 V
Nominalna izlazna snaga	3.8 kW
Nominalna struja	15.5 A
Brzina obrtanja	2880 °/min
Temperatura	40 °C
Težina	73 kg
Pobuda	230 V



Slika 6. Analizator mreže Fluke 315 i način vezivanja analizatora na mrežu

TABELA II. REZULTATI MJERENJA MREŽNIM ANALIZATOROM

	Nepobuđena mašina	Pobuđena mašina
$U_{AN}[V]$	230,1	230,3
$U_{BN}[V]$	229,9	230,2
$U_{CN}[V]$	229,6	229,9
$I_{AN}[A]$	1,08	1,37
$I_{BN}[A]$	1,11	1,45
$I_{CN}[A]$	1,07	1,36
$P_{if}[W]$	98	223
$\cos\phi$	0,412	0,632

Pomoću dobijenih rezultata za snage u nepobuđenom i pobuđenom režimu rada, gubitke u gvožđu izračunavamo na sljedeći način:

$$P_{FeG} = P_1 - P_2 = 223 - 98 = 125 [W].$$

2) ODREĐIVANJE MEHANIČKIH GUBITAKA

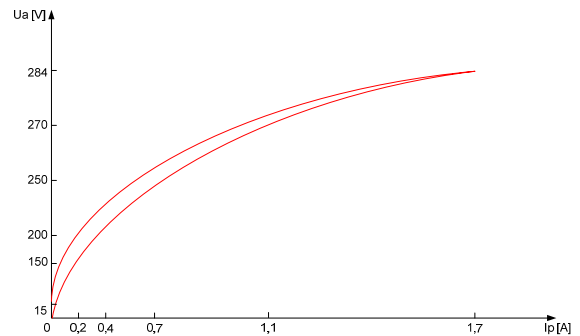
Mehanički gubici ispitivane mašine određeni su na osnovu oglada praznog hoda cijele grupe asinhroni motor-jednosmjerni generator. Prvo su određeni ukupni mehanički gubici cijele grupe, a nakon toga su od tih gubitaka oduzeti gubici asinhronne mašine. Na osnovu oglada praznog hoda (Tabela 3), osim podataka za određivanje mehaničkih gubitaka, dobijene su i vrijednosti pomoću kojih se može nacrtati karakteristika praznog hoda u generatorskom režimu rada, a koja pokazuje zavisnost elektromotorne sile praznog hoda od struje pobude za slučajeve porasta i smanjenja pobudne struje. Kriva praznog hoda u generatorskom režimu rada je prikazana na Sl. 7. Mehanički gubici određuju se za nepobuđen generator kako se ne bi pojavili i gubici u gvožđu. Koristeći trofazni regulacioni transformator napon napajanja pogonskog asinhronog motora mijenjan je u granicama od 200 V do 400 V. Mjerenja prilikom oglada praznog hoda su bilježena analizatorom kvaliteta električne energije, Fluke, tip 345. Rezultati ovog oglada su dati u Tabeli 3. Na osnovu podataka iz Tabele 3 dobija se karakteristika praznog hoda cijele grupe $P_{(Fe+f)AM+G} = \hat{f}(U)$ Mehanički gubici se dobijaju kao presjek ove krive sa ordinatom. Izvršena je njena aproksimacija i predstavljena je u funkciji od kvadrata napona. [3] Na Sl. 8 je data karakteristika praznog hoda cijele grupe. I u ovom mjerenju zanemarena je varijacija iskorištenja pogonske mašine sa radnim režimom. Dobijena karakteristika je

ekstrapolirana i dobijena je vrijednost mehaničkih gubitaka cijele grupe:

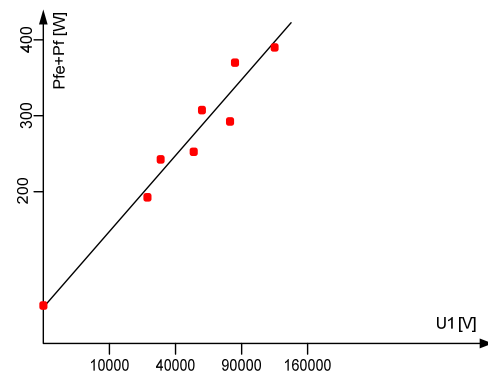
$$P_{fAM+G} = 148.92 [W]. \quad (3.3)$$

TABELA III. REZULTATI OGLEDA PRAZNOG HODA ASINHRONOG MOTORA MEHANIČKI SPREGNUTOG SA ISPITIVANIM GENERATOROM

Napon [V]	Snaga [W]	Struja [A]	$\cos\phi$
200	192	1	0,85
210	204	1,01	0,90
240	235	1,02	0,85
280	252	0,98	0,86
320	272	0,97	0,87
360	292	1,13	0,95



Slika 7. Kriva praznog hoda u generatorskom režimu rada



Slika 8. Zavisnost gubitaka praznog hoda grupe asinhroni motor-generator u funkciji kvadratnog napona

Na osnovu oglada praznog hoda, izvršenih na sličnim asinhronim mašinama, korišten je podatak da se vrijednost mehaničkih gubitaka asinhronog motora kreće oko:

$$P_{fAM} = 50 [W] \quad (3.4)$$

pa dobijamo da su mehanički gubici ispitivanog generatora jednosmjerne struje:

$$P_{fG} = P_{fAM+G} - P_{fAM} = 100 [W] \quad (3.5)$$

3) IZRAČUNAVANJE GUBITAKA POBUDE I GUBITAKA U BAKRU

Za određivanje gubitaka pobude prvo je bilo potrebno izvršiti mjerenje otpora namotaja. Metoda za koju se odlučeno je U/I metoda.

Mjerenja otpora namotaja vrše se sa strujama manjim od nominalnih, maksimalno $10\%I_n$. Prema standardu se ide i do 15%. To se radi iz razloga kako se namotaj ne bi dodatno grijao, a dovelo do pogrešnog mjerenja, s obzirom da vrijednost otpora direktno zavisi od temperature.

Vrijednosti napona i struje koje su zabilježene pri ovom mjerenju su:

$$U_p = 217 [V]$$

$$I_p = 1,2 [A].$$

Otpor pobude je računat na osnovu sljedećeg izraza:

$$R_p = \frac{U_p}{I_p} = \frac{217}{1,2} = 180,8 [\Omega]. \quad (3.6)$$

Gubici pobude se računaju na osnovu sljedećeg izraza:

$$P_p = U_p I_p = \frac{U_p^2}{R_p} = \frac{217^2}{180,8} = 260 [W]. \quad (3.7)$$

Mjerenje otpora armature, kao i u prehodnom slučaju vršeno je U/I metodom. Računamo otpor armature na osnovu sljedećeg izraza:

$$R_a = \frac{U_a}{I_a} = \frac{1,54}{1,4} = 1,1 [\Omega] \quad (3.8)$$

Na osnovu ovih podataka računamo gubitke u bakru pomoću sljedećeg izraza:

$$P_{Cu} = R_a I_n^2 = 264 [W]. \quad (3.9)$$

B. IZRAČUNAVANJE STEPENA ISKORIŠTENJA ZA DATI MOTOR PRIMJENOM INDIREKTNE METODE

Posle izvršenih mjerenja opisanih u predhodnim poglavljima možemo odrediti ukupnu sumu gubitaka mašine jednosmjerne struje. Poznavajući ukupne gubitke u mašini jednosmjerne struje možemo odrediti stepen iskorištenja za tu mašinu.

Sumu ukupnih gubitaka možemo dobiti iz sljedećeg izraza:

$$\sum P_g = P_{Fe} + P_f + P_p + P_{Cu} + P_c \quad (3.10)$$

$$\sum P_g = 125 + 100 + 260 + 264 + 31 \quad (3.11)$$

$$\sum P_g = 780 [W]. \quad (3.12)$$

Stepen iskorištenja, primjenom indirektno metode, za slučaj generatora računamo pomoću sledećeg izraza:

$$\eta_G = \frac{P_{iZ}}{P_{ul}} = \frac{P}{P + \sum P_g} = \frac{3800}{3800 + 780} \quad (3.14)$$

$$\eta_G = 0,83. \quad (3.15)$$

Da bi smo mogli nacrtati krivu iskorištenja uvodimo koeficijent $k \in (0,1 \div 1,5)$ preko kojeg definišemo struju i snagu na sledeći način:

$$k = \frac{P_{eI}}{P_{eIn}} = \frac{P_{eI}}{3800} \quad (3.16)$$

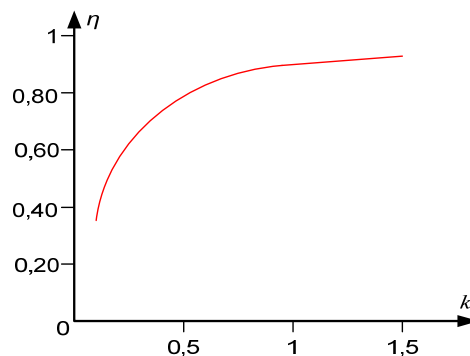
$$k = \frac{I_a}{I_{an}} = \frac{I_a}{15,5}. \quad (3.17)$$

Izračunate vrijednosti promjene stepena iskorištenja su prikazane u Tabeli 4.

TABELA IV. IZRAČUNATE VRIJEDNOSTI PROMJENE STEPENA ISKORIŠTENJA U GENERATORSKOM REŽIMU RADA

k	0,10	0,30	0,50	0,70	1	1,30	1,50
η_G	0,40	0,60	0,75	0,81	0,83	0,90	0,91

Promjena stepena iskorištenja data je na Sl. 9.



Slika 9. Promjena stepena iskorištenja u slučaju generatora

Stepen iskorištenja, primjenom indirektno metode, za slučaj motora računamo pomoću sledećeg izraza:

$$\eta_M = \frac{P_{iZ}}{P_{ul}} = \frac{P_{iZ} - \sum P_g}{P_{iZ}} = \frac{3800 - 780}{3800}. \quad (3.18)$$

$$\eta_M = 0,80 \quad (3.19)$$

Da bi smo mogli nacrtati krivu iskorištenja uvodimo koeficijent $k \in (0,1 \div 1,5)$ preko kojeg definišemo struju i snagu na sledeći način:

$$k = \frac{P_{me\dot{h}}}{P_{me\dot{h}_n}} \quad (3.20)$$

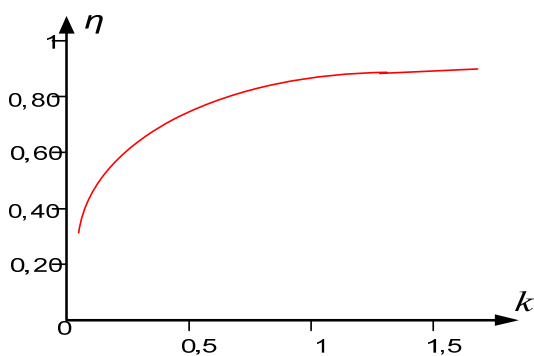
$$k = \frac{I_a}{I_{an}} = \frac{I_a}{15,5} \quad (3.21)$$

Izračunate vrijednosti promjene stepena iskorištenja su prikazane u Tabeli 5.

TABELA V. *IZRAČUNATE VRIJEDNOSTI PROMJENE STEPENA ISKORIŠTENJA U MOTORSKOM REŽIMU RADA*

k	0,10	0,30	0,50	0,70	1	1,30	1,50
η_G	0,20	0,50	0,76	0,79	0,80	0,88	0,90

Promjena stepena iskorištenja data je na Sl. 10.



Slika 10. Promjena stepena iskorištenja u slučaju motora

IV. ZAKLJUČAK

Analizirajući dobijene rezultate za ispitivanu mašinu zaključujemo da su u okviru očekivanih. Na kraju možemo zaključiti da je indirektna metoda odvojenih gubitaka, za određivanje stepena iskorištenja najjednostavnija i da daje najtačnije rezultate.

Mašina ima maksimalan stepen iskorištenja kada su gubici nezavisni o opterećenju jednaki gubicima zavisnim o opterećenju. Ukoliko se maksimum stepena iskorištenja javlja pri nominalnom opterećenju znači da je mašina optimalno dimenzionisana s obzirom na gubitke.

Za analizirani motor dobijeno je da kriva stepena iskorištenja raste sa opterećenjem sve do nominalnog tereta, što znači da

su gubici nezavisni od opterećenja veći od gubitaka koji zavise od tereta.

ZAHVALNICA

Istraživanja u ovom radu vršena su u okviru izrade diplomskog rada na prvom ciklusu studija na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Istočnom Sarajevu pod mentorstvom doc. dr Petra Matića. Pomoć pri izradi rada pružio je asistent Srđan Jokić.

LITERATURA

- [1]. F. Avčin, P. Jereb: Ispitivanje električnih strojeva, Tehnička založba Slovenije, Ljubljana 1968.
- [2]. Radenko Wolf: Ispitivanje električnih strojeva, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb 1964.
- [3]. Brankica Malović: Određivanje stepena iskorištenja mašina jednosmjerne struje, Diplomski rad, Banja Luka 2003.
- [4]. www.scribd.com.

ABSTRACT

In this work we described methods to determine the degree efficiency and realized practically determine the degree of efficiency DC machines indirect method in the Lab for Electrical Machines at Faculty of Electrical Engineering in East Sarajevo. In methods for determining the degree of efficiency, special attention was paid to the indirect method of separate losses. The second part is devoted to the practical part in which it was determined the degree efficiency the DC motor with independent excitation.

Determining the degree of efficiency at direct current machine

Igor Maletić

Student of second cycle of studies

Faculty of electrical engineering, University of East Sarajevo

East Sarajevo, Republic of Srpska

igor.maletic@yahoo.com