PREDGOVOR

Pisati knjigu nije lako; pisati knjigu za studente je izuzetno teško, jer su studenti prvo rešeto za dobru, jasnu i kvalitetnu knjigu; pisati knjigu za sve ljude koje zanima ova oblast pravi je izazov.

Mašine jednosmjerne struje (MJSS) su principski najjasnije električne mašine. To su mašine kod kojih se može najbolje shvatiti fizika obrtnih električnih mašina. Štaviše, MJSS su „mjesto" gdje se najbolje razumije elektromagnetna sila i moment. Zbog toga je glavni cilj ove knjige da se studenti, koristeći istu, detaljnije upoznaju sa praktičnom primjenom ovih zakona elektrotehnike. Štaviše, ova knjiga treba da posluži kao polazni udžbenik za gradivo električnih mašina kako bi se nakon savladavanja osnovnih znanja mogli upustiti u stručnu literaturu i detaljnije proučavanje i rješavanje pojedinih inženjerskih problema.

Knjiga je organizovana u deset poglavlja. U prvom poglavlju, *Opšte informacije o obrtnim električnim mašinama*, date su, veoma kratko, osnovne informacije o obrtnim električnim mašinama, podjelama i režimima rada. U drugom poglavlju, *Opšte informacije o MJSS,* opisana je prije svega konstrukcija mašina jednosmjerne struje, kao i bazični problem MJSS – reakcija armature, koji uzrokuje usložnjavanje konstrukcije mašine. U trećem poglavlju, *Princip rada MJSS*, opisan je princip rada mašine i u motornom i u generatorskom režimu rada. Osnovne matematičke jednačine MJSS u stacionarnom stanju, kao i zamjenska šema iste, opisane su u istoimenom, četvrtom poglavlju knjige. U petom poglavlju, *Karakteristike MJSS*, predstavljene su karakteristike motora i generatora JSS, zajedno sa opisom odgovarajućih šema za izvođenje ogleda na mašini. Osnovne komponentne energetske elektronike koje se koriste kod upravljanja motorom JSS opisane su u šestom poglavlju (*Osnovni elementi energetske elektronike značajni kod upravljanja MJSS*), dok je problem startovanja motora JSS opisan u sedmom poglavlju (*Startovanje motora JSS*). Regulacija brzine motora JSS i kočenje motora JSS opisani su u istoimenim - osmom i devetom poglavlju, respektivno. U posljednjem poglavlju *Simulacija radnih režima motora JSS korišćenjem Matlab*/*Simulinka* prikazani su rezultati simulacije radnih režima motora JSS.

Nakon većine obrađenih poglavlja, predstavljenu materiju prate zadaci. Prikazani zadaci u ovoj knjizi su dominantno bazirani na vježbama iz Rotacionih mašina, koje je godinama držala na Elektrotehničkom fakultetu u Podgorici, mr Milanka Žugić. Isti su dopunjeni brojnim zadacima koje izvode profesori sa fakulteta u regionu i zemlji, zadacima sa rokova koje su dobijali studenti ETF, sa odsjeka Energetika i Automatika u Podgorici, kao i sa nekim zadacima sa studenstkih takmičenja - Elektrijada.

Glavni krivac za pisanje ove knjige je prof. dr Milutin Ostojić, redovni profesor u penziji Elektrotehničkog fakulteta u Podgorici. Osim što mi je bila čast da budem student prof. Ostojića, prof. Ostojić je bio i moj mentor na diplomskim i master studijama. Tok pisanja knjige je odslikao profesorova predavanja, zbog kojih sam i lično zavolio električne mašine. Nadam se i da će svi koji budu pročitali ovu knjigu uvidjeti ljepotu fizike električnih mašina i zavoljeti svijet istih.

Posebnu zahvalnost dugujem recenzentima ove knjige - prof. dr Milutinu Petronijeviću sa Elektronskog fakulteta u Nišu, koji je, prije svega, imao strpljenja za moje pisanje, i koji je izuzetno pedantno, predano i posvećeno iz nekolika navrata čitao moj materijal, kao i prof. dr Nerdini Mehinović, sa Fakulteta Elektrotehnike iz Tuzle, koja je, osim konkretnih komentara koji su doprinijeli poboljšanju kvalitetu knjige, bila moja velika podrška da izvedem pisanje materijala do kraja. Osim recenzentima, posebnu zahvalnost dugujem saradniku, mr Mihailu Micevu, koji mi je pomogao oko pripreme i klasifikacije zadataka.

Na kraju, pozivam sve čitaoce, a prvenstveno studente, da mi dostave sve sugestije, predloge i komentare u cilju poboljšanja kvaliteta izložene materije.

U Podgorici, novembar 2020.

Doc. dr Martin Ćalasan

Sadržaj

1. Opšte informacije o obrtnim električnim mašinama 5
2. Opšte informacije o MJSS 6
2.1 Konstrukcija MJSS 6
2.2 Komutatorski aparat i četkice MJSS 11
2.3 Namotaji kod MJSS 12
2.4 Reakcija armature MJSS 16
2.5 Komutacija MJSS 21
2.6 Ostale opšte informacije o MJSS 22
3. Princip rada MJSS 24
3.1 Princip rada generatora JSS 24
3.2 Princip rada motora JSS 27
4. Osnovne matematičke jednačine i zamjenska šema MJSS 29
4.1 Izraz za indukovanu EMS 29
4.2 Naponska jednačina MJSS 30
4.3 Izraz za elektromagnetni moment MJSS 31
4.4 Momentna jednačina MJSS 32
4.5 Gubici i efikasnost MJSS 32
4.6 Zamjenska šema MJSS 33
ZADACI 37
5. Karakteristike MJSS 40
5.1 Karakteristike generatora JSS 40
5.1.1 Karakteristika praznog hoda generatora JSS 40
5.1.2 Karakteristika opterećenja generatora JSS sa nezavisnom pobudom 42
5.1.3 Karakteristika regulacije generatora JSS 43
5.1.4 Karakteristika kratkog spoja generatora JSS 44
5.1.5 Izlazna karakteristika generatora JSS sa nezavisnom pobudom 45
5.1.6 Izlazna karakteristika generatora JSS sa paralelnom pobudom 47
5.1.6 Izlazna karakteristika generatora JSS sa rednom pobudom 50
5.1.7 Izlazna karakteristika generatora JSS sa složenom pobudom 52
5.2 Karakteristike motora JSS 54
5.2.1 Izlazne karakteristike motora JSS sa nezavisnom pobudom 54
5.2.2 Izlazne karakteristike motora JSS sa paralelnom pobudom 56
5.2.3 Izlazne karakteristike motora JSS sa rednom pobudom 57

5.2.4 Izlazne karakteristike motora JSS sa složenom pobudom 60
ZADACI 62
6. Osnovni elementi energetske elektronike značajni kod upravljanja MJSS 65
6.1. Ispravljači 65
6.2. DC/DC pretvarači 68
ZADACI 72
7. Startovanje motora JSS 75
ZADACI 80
8. Regulacija brzine obrtanja motora JSS 82
8.1 Regulacija brzine obrtanja MJSS sa nezavisnom pobudom 82
8.1.1 Regulacija brzine motora JSS sa nezavisnom pobudom promjenom napona napajanja armature 82
8.1.2 Regulacija brzine motora JSS sa nezavisnom pobudom promjenom otpornosti namotaja armature 83
8.1.3 Regulacija brzine motora JSS sa nezavisnom pobudom promjenom fluksa 84
8.1.4 Dvozonska regulacija brzine motora JSS 85
8.2 Regulacija brzine obrtanja motora JSS sa paralelnom pobudom 87
8.2.1 Regulacija brzine motora JSS sa paralelnom pobudom promjenom napona napajanja armature 87
8.2.2 Regulacija brzine motora JSS sa paralelnom pobudom promjenom otpornosti namotaja armature 88
8.2.3 Šantiranjem namotaja armature i povećavanjem ukupnog otpora armaturnog kola 89
8.3 Regulacija brzine obrtanja motora JSS sa rednom pobudom 90
8.3.1 Regulacija brzine motora JSS sa rednom pobudom promjenom napona napajanja armature 90
8.3.2 Regulacija brzine motora JSS sa rednom pobudom promjenom otpornosti namotaja armature 91
8.3.3 Regulacija brzine motora JSS sa rednom pobudom šantiranjem pobudnog namotaja 92
ZADACI 94
9. Kočenje motora JSS 104
9.1 Kočenje motora JSS sa nezavisnom pobudom 104
9.1.1 Generatorsko kočenje motora JSS sa nezavisnom pobudom 104
9.1.2 Protivstrujno kočenje 106
9.2 Kočenje motora JSS sa paralelnom pobudom 108

9.2.1 Dinamičko kočenje motora JSS sa paralelnom pobudom 108

9.2.2 Kočenje motora JSS sa paralelnom pobudom promjenom napona napajanja armature 108

9.2.3 Protivstrujno kočenje - dodavanjem otpora u kolo armature 109

9.3 Kočenje motora JSS sa rednom pobudom 110

9.3.1 Dinamičko kočenje 110

9.3.2 Protivstrujno kočenje 112

ZADACI 114

10. Simulacija radnih režima motora JSS korišćenjem Matlab/Simulinka 118

10.1 Uticaj napona napajanja na vrijednost struje startovanja i brzinu praznog hoda 120

10.2 Uticaj dodatne otpornosti u kolo rotora na vrijednost struje startovanja i brzinu praznog hoda 122

10.3 Start motora JSS koristeći sekciju otpornika 124

10.4 Regulacija brzine motora JSS sa nezavisnom pobudom promjenom napona napajanja armature 127

10.5 Regulacija brzine motora JSS sa nezavisnom pobudom promjenom otpornosti namotaja armature 129

10.6 Promjena smjera napona napajanja motora JSS sa nezavisnom pobudom 132

10.7 Regulacija brzine obrtanja motora JSS sa nezavisnom pobudom promjenom fluksa 134

10.8 Regulacija brzine obrtanja motora JSS sa paralelnom pobudom šantiranjem namotaja armature i povećavanjem ukupnog otpora armaturnog kola 138

10.9 Regulacija brzine obrtanja motora JSS sa rednom pobudom promjenom napona napajanja 140

11. Literatura 144

1. Opšte informacije o obrtnim električnim mašinama

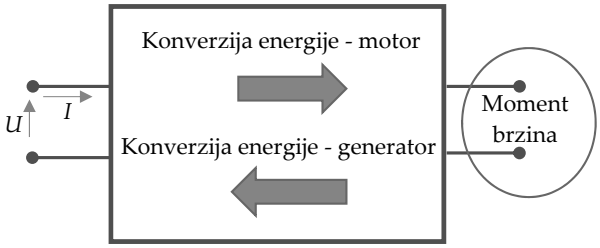
Sve obrtne električne mašine se mogu grupisati u dvije velike kategorije:

- Mašine jednosmjerne struje i
- Mašine naizmjenične struje, čiji su glavni predstavnici sinhrone i asinhrone mašine.

Međutim, u literaturi, podjela obrtnih električnih mašina može biti sprovedena i prema:

- Snazi – mikro, mili, srednje i velike mašine,
- Upravljivosti – lako upravljive, sa pokretnim statorom, ...
- Primjeni – kao generatori, kao motori, specijalne namjene, ...
- Dimenzijama - mikro, mili, rotacione, linearne ... i slično.

Zajedničko za sve obrtne električne mašine jeste to da one mogu raditi i kao generatori i kao motori (slika 1.1). Kada se kaže da mašina radi kao motor podrazumijeva se da mašina koristi električnu energiju i obavlja neki mehanički rad. Sa druge strane, kada se kaže da mašina radi kao generator, podrazumijeva se da mašina koristi mehaničku energiju i proizvodi električnu energiju. Prema tome, za svaku električnu mašinu se može reći da je reverzibilna. Međutim, neke mašine se više koriste kao generatori, a druge kao motori.



Slika 1.1 Konverzija energije kod električnih mašina

Na svakoj električnoj mašini se nalazi natpisna pločica. Natpisna pločica u stvari daje osnovne informacije o vrijednosti snage, naponu, struji, izolaciji, i slično. Osim tehničkih podataka, na natpisnoj pločici mogu biti navedeni i podaci o proizvođaču, godini proizvodnje itd. Vrijednosti napona, struje, snage i slično, koje su date na natpisnoj pločici predstavljaju *nominalne* ili *naznačene* (eng. *rated*) podatke. Kada bi mašina uvijek radila sa nominalnim podacima moglo bi se reći da bi njen radni vijek bio beskonačan. Međutim, u stvarnosti, mašine rade u uslovima promjenjivog napona, opterećenja, vremenskih prilika, prašine, vlage, itd. što sve utiče na skraćenje radnog vijeka iste.

2. Opšte informacije o MJSS

Prvi motor JednoSmjerne Struje (JSS) konstruisao je *Moritz Hermann Jacobi* 1838. godine u Petrogradu (Rusija). Ovaj motor je služio za pokretanje čamca po rijeci Nevi. Na poboljšanju verzija Mašina JednoSmjerne Struje (MJSS ili engl. *Direct current – DC machine*) u istoriji se pominju i *Werner Siemens* (otkrio je dinamoelektrični princip 1866. godine), *Zenobe Theophil Gramme* (konstruisao je generator sa namotajem na prstenu), *Friedrich von Hefner-Alteneck* (postavio je namotaje na rotoru 1875. godine) i drugi.

Do 60-ih godina prošlog vijeka, MJSS u motornom režimu rada su bile nezamjenljive. Međutim, 70-ih godina primat ovoj mašini preuzima asinhrona mašina, prije svega zbog lakšeg napajanja i regulacije brzine.

MJSS i dalje ima primjenu u:

- brojnim proizvodnim sistemima,
- sistemima gdje se zahtijeva širok dijapazon brzina,
- sistemima gdje se zahtijeva smanjena vrijednost elektromagnetnog polja i slično.

Posebno treba istaći da su principi upravljanja MJSS povod za razvoj brojnih strategija upravljanja kod naizmjeničnih mašina. Naime, jasnoća upravljanja MJSS, okarakterisana raspregnutom kontrolom polja i momenta, je ideja vodilja za razvoj algoritama koji će omogućiti da se na isti način upravlja mašinama naizmjenične struje.

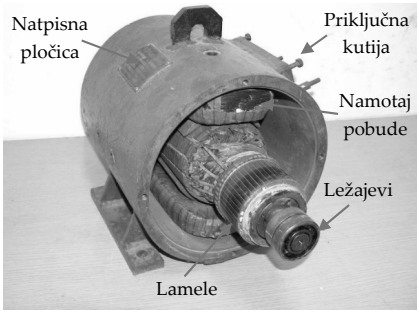
2.1 Konstrukcija MJSS

Konstrukcijski gledano, MJSS ima dva osnovna dijela:

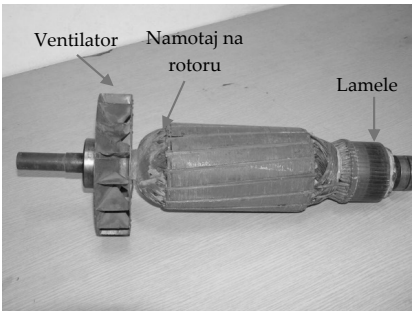
- nepokretni dio $\rightarrow$ stator i
- pokretni dio $\rightarrow$ rotor.

Postoje različite varijante mašina jednosmjerne struje. Međutim, najčešća varijanta jeste da je stator šuplji cilindar, dok je rotor valjkastog oblika. Izgled statora i rotora MJSS dat je na slici 2.1.

Na statoru MJSS se montiraju polovi (engl. *pole*), čiji je zadatak da kanališu polje (fluks, tj. magnetnu indukciju B) u mašini (slika 2.2a). Kod MJSS, uvijek mora biti paran broj polova, a isti su pričvršćeni za magnetno kolo statora sa unutrašnje strane. Na polove se postavljaju namotaji pobude (engl. *field winding*) čiji je zadatak da formiraju magnetni fluks, tj. polje u mašini (slika 2.2b). Sami namotaji oko korespodentnih polova se povezuju tako da potpomažu formiranje fluksa jedan drugom (slika 2.3). Takođe, prije nego se na polove postavi namotaj, isti se premazuju zaštitnom izolacijom.



a)



b)

Slika 2.1 Izgled a) statora i b) rotora MJSS

Putanja fluksa namotaja pobude, nacrtana na slici 2.3, je sljedeća – fluks prolazi kroz jedan pol (npr. sjeverni), zatim prolazi kroz vazdušni prostor (u mašinama je često korišćen termin za vazdušni prostor - *međugvožđe*), zatim kroz rotor (dužina puta fluksa l''), pa opet kroz međugvožđe, pa opet kroz magnetni materijal suprotno postavljenog pola (južni pol), i na kraju kroz stator (dužina puta fluksa l').

Stator MJSS (slika 2.1) se pravi od punog feromagnetnog materijala, a ne od limova. Razlog za ovo je taj što kroz namotaj na statoru (tj. pobudni namotaj postavljen oko polova statora) protiče jednosmjerna struja koja stvara konstantan fluks.

Napomena - *Gubici usljed histerezisa su srazmjerni frekvenciji magnetnog polja, dok su gubici usljed vihornih struja srazmjeni kvadratu frekvencije. Prema tome, ako je fluks konstantan tada praktično ne postoje gubici usljed histerezisa i vihornih struja, tj. gubici u gvožđu.*

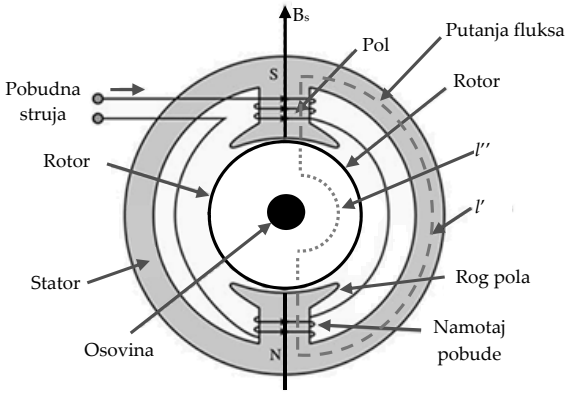


a)



b)

Slika 2.2 a) Pol statora, b) Pobudni namotaj i pol statora



Slika 2.3 Poprečni presjek MJSS

Da li se rotor pravi od punog materijala?

Kada se propusti struja kroz namotaj pobude, shodno smjeru fluksa, gornji dio rotora se magneti od *a* ka *b*, dok se južni dio magneti od *c* ka *d* (slika 2.4). Međutim, kako se rotor okreće, i kada se zarotira za 180^0 onda će prethodni dio od *c* do *d* da se magneti u pravcu od *d* ka *c*. Prema tome, jasno je da se rotor magneti naizmjenično (na slici 2.4 može se pratiti i kretanje tačke M). Zbog toga, kako je rotor izložen naizmjeničnom magnetnom polju, isti se pravi od dinamo limova da bi se smanjili gubici usljed histerezisa i od vihornih struja.

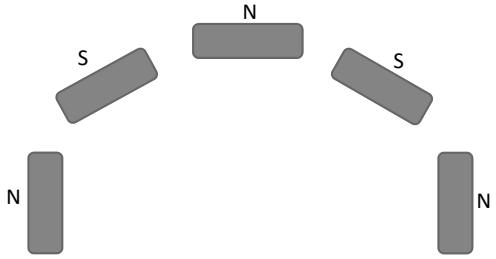


Slika 2.4 Magnećenje rotora MJSS

Napomena – *Debljina dinamo limova je najčešće 0.5mm ili 0.35mm. Tokom proizvodnje mašine limovi se sijeku, premazuju zaštitinim materijalom i žare u peći na temperaturi od* $1000°C$ *u cilju poboljšanja magnetnih karakteristika. Nakon žarenja, vrši se proces hlađenja istih koji doprinosi formiranju oksidne izolacije između limova, a koja zatvara i sprječava formiranje vihornih struja.*

Međutim, postavlja se pitanje od čega su napravljeni polovi MJSS?

Da bi se odgovorilo na ovo pitanje, mora se pogledati malo šira slika. Prvo, polovi na statoru se nazivaju sjeverni, i njima korespondentni, pomjerni za 180 električnih stepeni, južni pol. Međutim, u mašini može biti veći broj polova, koji se u toj situaciji naizmjenično smjenjuju (slika 2.5), pa imamo sjeverni – južni – sjeverni - južni itd. pol (N - S - N – S- ...).



Slika 2.5 Raspored dijela polova statora MJSS

Pošto se oko polova statora nalazi namotaj koji formira fluks u mašini, pol mora da bude napravljen od materijala koji dobro kanališe magnetni fluks. U suprotnom, dolaziće do povećanja flukseva rasipanja, a samim tim do grijanja pojedinih djelova pola, povećanih gubitaka i slično.

Drugo, da bi se odgovorilo na prethodno pitanje oko konstrukcije polova, potrebno je osvrnuti se i na žljebove na rotoru mašine. Žljebovi kod MJSS većih snaga su najčešće pravougaoni, dok su zupci trapezni. Kod mašina manjih snaga situacija je obrnuta – žljebovi su trapezni, dok su zupci pravougaoni (slika 2.6). Treba naglasiti da se dimenzije žljeba određuju prema dozvoljenoj magnetnoj indukciji u zupcima i dimenzijama izolovanih provodnika, tako da žljeb, zubac i provodnik/provodnici unutar njega čine jednu skladnu cjelinu.



Slika 2.6 Oblici žljebova kod MJSS

U žljebove mašine postavljaju se namotaji, bakarni provodnici, pa je jasno da se u žljebovima nalaze nemagnetni materijali. Isto tako, treba napomenuti da se između namotaja u žljebovima i magnetskog materijala rotora postavlja izolacija. Zbog toga, kada naiđe žljeb ispod pola prilikom rotacije rotora - fluks pobude opada, a kada naiđe zub ispod pola – fluks pobude raste. Prema tome, prisutna je pulsacija fluksa. Pošto je broj žljebova veliki, frekvencija pulsacije fluksa je velika pa se u tom regionu mogu pojaviti gubici usljed histerezisa i vihornih struja. Zbog toga se polovi MJSS prave od limova, da