

ENERGETSKA UČINKOVITOST ELEKTRIČNIH MOTORA

Marković, Karlo

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:007171>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-06**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH
TEHNOLOGIJA
Preddiplomski studij

ENERGETSKA UČINKOVITOST ELEKTRIČNIH
MOTORA
Završni rad

Karlo Marković

Osijek, 2019.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1 Zadatak završnog rada	1
2. UVOD U ELEKTROMOTORE	2
2.1 Podjela motora s obzirom na momentnu karakteristiku	3
3. ISTOSMJERNI MOTORI	5
3.1 Podjela istosmjerni motora s obzirom na način spajanja namota statora i rotora	6
4. SINKRONI STROJEVI	8
4.1 Princip rada sinkroni strojeva	9
4.2 Podjela sinkroni strojeva	9
5. ASINKRONI STROJEVI	12
5.1 Princip rada i uporaba asinkroni strojeva	12
5.2 Podjela asinkronih strojeva	13
6. ENERGETSKA UČINKOVITOST MOTORA	15
6.1 Poboljšanja motora	16
6.2 Frekvencijski pretvarači	19
6.3 Određivanje energetske učinkovitosti motora	20
6.4 Izbor motora	21
6.5 Podjela gubitaka kod AC elektromotora	21
6.6 Faktori učinkovitosti elektromotora	23
6.6.1 Utjecaj temperature na učinkovitost	24
6.6.2 Utjecaj održavanja elektromotora na učinkovitost	24
6.6.3 Motori visoke učinkovitosti	24
6.7 Materijali, optimizacije i alternative AC elektromotora	25
6.7.1 Materijali motora	25

6.7.2 Materijali jezgre	25
6.7.3 Materijali rotorskog kaveza	26
6.7.4 Optimizacija geometrije statora, rotora i zračnog raspora	26
6.7.5 Alternative trenutno korištenih elektromotora.....	27
7. STANDARDI ENERGETSKE UČINKOVITOSTI.....	29
7.1 IEC/EN 60034-30-1: 2014.....	29
7.2 Europski standard minimalnih energetske performansi.....	29
8. PRIMJER PRORAČUNA UŠTEDE ELEKTRIČNE ENERGIJE ZAMJENOM STAROGA MOTORA S NOVIM VEĆE UČINKOVITOSTI.....	31
ZAKLJUČAK.....	36
LITERATURA	37
SAŽETAK	39
ŽIVOTOPIS.....	40

1. UVOD

Razvojem industrije i masovne proizvodnje povećao se broj velikih potrošača električne energije kao što su sinkroni, asinkroni i istosmjerni motori. To povećanje uzrokovalo je veće opterećenje mreže i veću potrebu za električnom energijom. Danas su pogoni, u kojima se nalaze elektromotori, daleko najveći potrošači električne energije. Da bi se regulirala potrošnja električne energije elektromotora, uvedeni su standardi energetske učinkovitosti, koju motori ako ne zadovoljavaju ne mogu biti prodavani na tržištu države koja provodi te standarde. Većina standarda energetske učinkovitosti danas je međunarodna i velika većina industrijski razvijenoga svijeta provodi manjeviše iste standarde. Razlog je tome jeftinija i brža proizvodnja elektromotora jer se ne moraju proizvoditi elektromotori iste snage za različite standarde energetske učinkovitosti. Energetska učinkovitost elektromotora ovisi o tome koje je taj motor optimalne snage i građe za uvjete u kojima radi. Motor koji je prevelike snage za pogon u kojem se nalazi imat će malu učinkovitost zbog nedovoljnog opterećenja, također motor koji radi u okolini koja je veće temperature od one za koju je građen imat će veće gubitke zagrijavanja i kraći životni vijek. U završnom radu je opisan princip rada istosmjerni i izmjenični motora te navedena podjela motora po konstrukciji. Zatim su dane formule za računanje energetske učinkovitosti i najjednostavniji načini da se ona poveća. U nastavku je objašnjena podjela gubitaka u elektromotoru i navedeni materijali za izradu pojedini dijelova elektromotora. Na kraju su ukratko objašnjeni standardi energetske učinkovitosti i napravljen primjer proračuna uštede električne energije zamjenom starog motora novim veće učinkovitosti.

1.1 Zadatak završnog rada

Navesti podjelu i opisati najvažnije vrste elektromotora, navesti što sve utječe na energetska učinkovitost, kako povećati energetska učinkovitost, koji gubici su prisutni kod elektromotora, koji se materijali koriste pri proizvodnji elektromotora, podjela elektromotora po standardima energetske učinkovitosti, primjer proračuna uštede električne energije zamjenom starog elektromotora novim većeg standarda energetske učinkovitosti.

2. UVOD U ELEKTROMOTORE

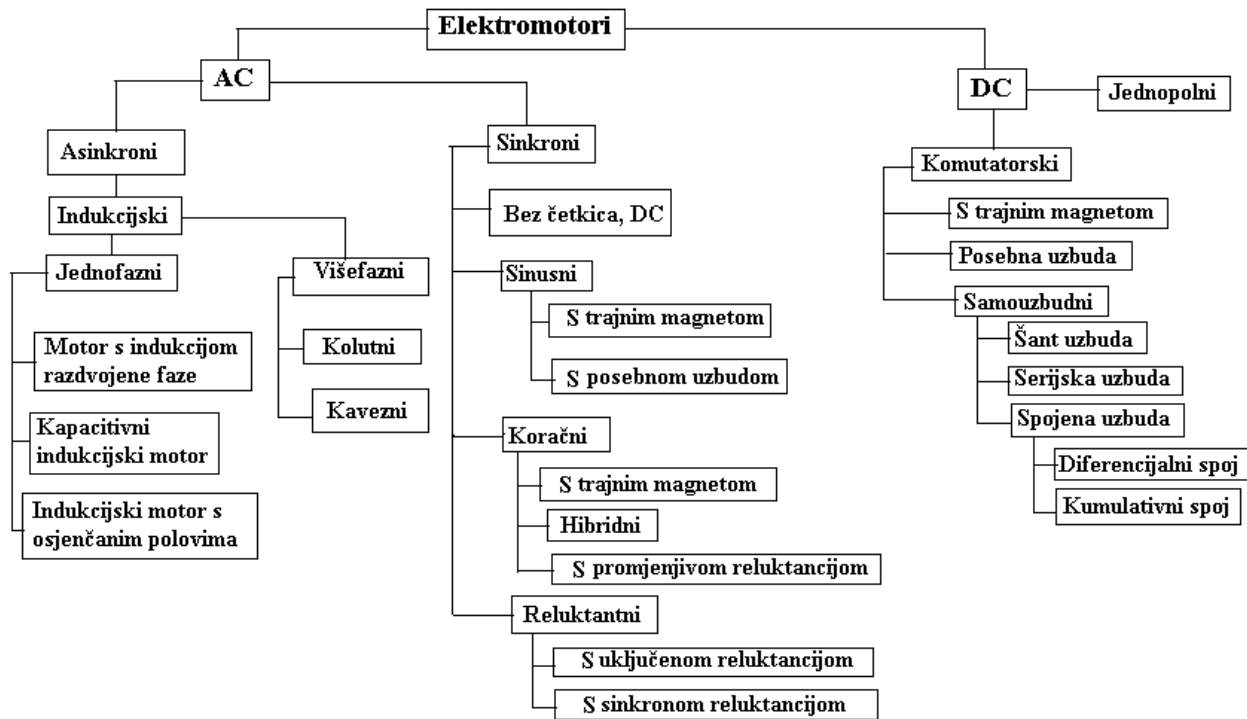
Pod elektromotore podrazumijevamo dijelove vozila (vlak), strojeva (industrijska drobilica) i uređaja (mikser) koji služe za pretvaranje električne energije u mehaničku u svrhu obavljanja nekakvog rada. Elektromotori se koriste i kao generatori, tj. pretvaraju mehaničku energiju u električnu te se kao takvi koriste u elektranama za generiranje električne energije.

Teoretski svaki elektromotor može biti generator, ali odabir generatora najviše ovisi o brzini vrtnje rotora koja će biti korištena, snazi generatora i mreži na koju je spojen generator. Prema podacima studije iz 2011. godine Međunarodne Energetske Agencije (engl. *International Energy Agency - IEA*) elektromotori i pogoni koje oni pokreću su najveći potrošači električne energije na svijetu te čine oko 45% ukupne potrošnje električne energije dvostruko više od drugog najvećeg potrošača rasvjete [1].

Elektromotori se međusobno mogu razlikovati prema:

- Obliku napona napajanja:
 - istosmjerni DC
 - izmjenični AC
- Načinu pretvorbe energije: kontinuirano i diskontinuirano
- Obliku mehaničke karakteristike $n=f(M)$: sinkrona, serijska i poredna
- Položaju pri radu: horizontalno i vertikalno
- Načinu gibanja: translacijski i rotacijski
- Vrsti uzbude: istosmjerno magnetsko polje, okretno ili translacijsko magnetsko polje, upravljivo ili pernametno magnetsko polje...
- Konstrukcijskoj izvedbi rotora: unutarnji ili vanjski, cilindrični, pločasti ili zvonasti

- Stupnju zaštite: otvorena izvedba, zaštita od prodora krutih tijela, zaštita od prodora tekućina



Slika 2.1 Podjela elektromotora [2]

2.1 Podjela motora s obzirom na momentnu karakteristiku

Kod elektromotora iznos klizanja se kreće od 0 do 1 te nam govori kolika je brzina rotora motora u usporedbi sa sinkronom brzinom, tj. brzinom magnetskog polja. Ako je klizanje 1 znači da motor miruje i njegova brzina je 0, a ako je klizanje 0 motor se vrti sinkronom (maksimalnom) brzinom. Kada opteretimo motor koji se okreće nazivnom brzinom doći će do povećanja klizanja, tj. smanjenja brzine rotora, a to uzrokuje povećanje momenta motora. Taj proces se odvija dok se moment motora ne izjednači s momentom tereta. Povećanjem momenta motora raste i inducirana struja u rotoru. Ako opteretimo motor teretom dok miruje $n = 0$ okr/min bitan je potezni moment

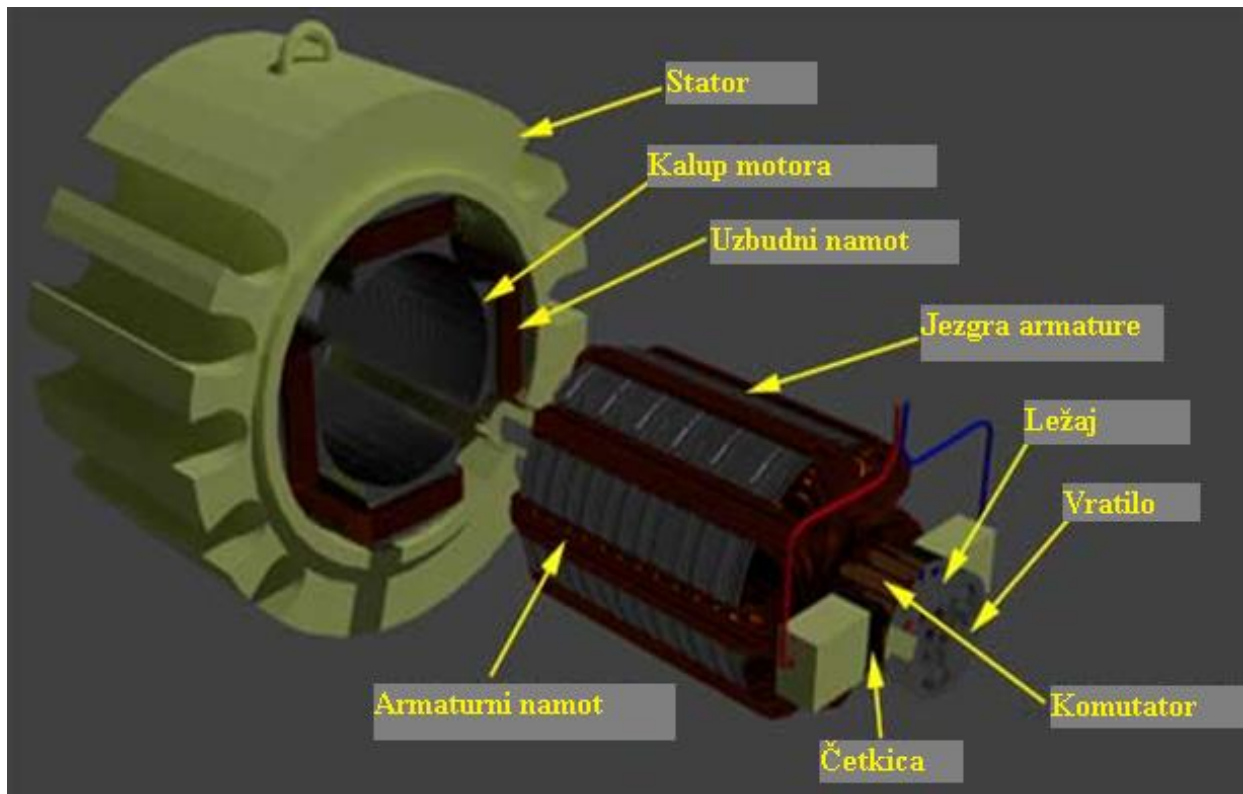
koji govori koliko momenta razvija motor pri pokretanju te ako je moment tereta veći od poteznog momenta motor se neće pokrenuti. Američka agencija Nacionalno Udruženje Proizvođača Elektronike (engl. *National Electrical Manufacturers Association - NEMA*) [3] definirala je tipove elektromotora s obzirom na njihovu momentnu karakteristiku. Pri definiranju tipova elektromotora gledaju se karakteristike : potezni moment, potezna struja, prekretni moment i nazivno klizanje.

Podjela električnih motora prema *NEMA* [3] kriterijima:

- A tip - u ovu grupu ubrajamo motore s malim momentom i klizanjem. Ovi motori imaju mali potezni moment i poteznu struju. Potezni moment im je oko 125 % nazivnog, a prekretni moment oko 160 % nazivnog dok je klizanje do 5 % i potezna struja do 800 % nazivne. Upotrebljava se za ventilatore i pumpe.
- B tip – ovoj grupi pripadaju motori za opću "uporabu". Potezni moment im ovisi o veličini te se kreće od 80 % do 275 % nazivnog momenta, prekretni moment je između 175 % i 300 % nazivnog momenta. Potezna struja je do 600 % nazivne, a klizanje do 5 %. Koristi se u komercijalnim i stambenim zgradama u sustavima za grijanje, ventilaciju i klimatizaciju prostora.
- C tip - ovdje pripadaju kavezni motori kojima je zajedničko da imaju relativno malu razliku između poteznog i prekretnog momenta. Potezni moment im se kreće od 200 % do 250 % nazivnog dok im je prekretni moment do 300 % nazivnog. Potezna struja je do 600 % nazivne te klizanje do 5 %. Koriste se za terete s velikim statičkim trenjem i početnim momentom.
- D tip - ovdje pripadaju elektromotori s velikim poteznim momentom i klizanjem. Potezni moment im je oko 275 % nazivnog, potezna struja je do 600 % nazivne, a klizanje do 15 %. Koristi se kod strojeva za dizanje velikih tereta poput kranova i dizala.

3. ISTOSMJERNI MOTORI

Rad istosmjernog motora temelji se na stvaranju elektromagnetske sile na vodič koji se nalazi u magnetskom polju. Da bi istosmjerni motor mogao raditi potrebno je ispuniti dva uvjeta. Prvi kaže da je potrebno stvoriti magnetsko polje u motoru, a drugi da u rotorskim vodičima treba prolaziti struja. Magnetsko polje stvara se spajanjem statorskog namota na istosmjerni napon, a struja u rotoru se dobiva preko četkica i kolektora. Statorskim namotom prolazi istosmjerna struja koja stvara stalno magnetsko polje. U rotorske vodiče struja dolazi preko kolektora i četkica i to tako da vodiči s gornje strane kolektora imaju struju jednog, a vodiči s donje strane kolektora suprotnog smjera. U vodičima rotora nastaje elektromagnetska sila koja ih nastoji izbaciti iz magnetskog polja. Budući da je rotor na osovini dolazi do zakretanja rotora. Na mjesto izbačenih vodiča dolaze novi vodiči pošto je kružno gibanje i postupak se neprestano ponavlja. Motor počinje ubrzavati sve dok se elektromagnetska sila i sila otpora (tereta) ne izjednače. Motor u tom trenutku prestaje ubrzavati i drži konstantnu brzinu.



Slika 3.1. Građa istosmjernog motora [4]

3.1 Podjela istosmjerni motora s obzirom na način spajanja namota statora i rotora

Statorski i rotorski namoti u istosmjernom motoru mogu se međusobno spajati na različite načine, što uzrokuje različite karakteristike tih strojeva, te karakteristike određuju primjenu tih motora.

- Nezavisni spoj namota - nezavisni motor

Nezavisni spoj namota je takav da i statorski i rotorski namot imaju svoj zaseban izvor napajanja, to omogućuje regulaciju struje kroz oba namota posebno i dobiti velika raznolikost karakteristika. U pravilu, karakteristike su dosta "tvrde", tj. slabo se mijenjaju.

Ovakav motor se koristi za:

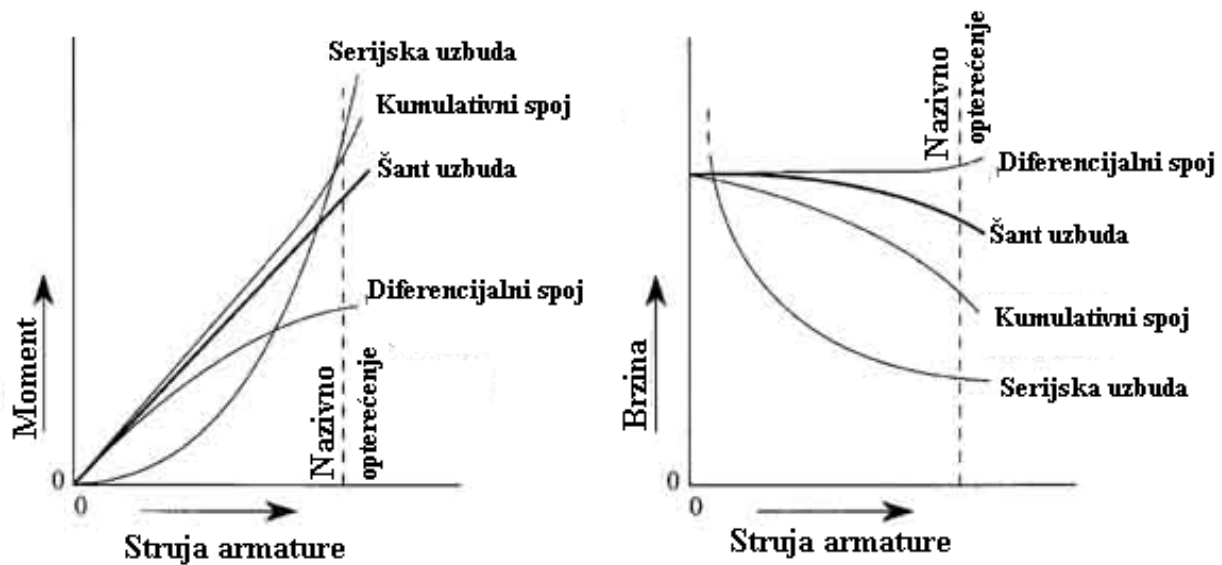
- -slučajeve kada trebamo regulirati napon generatora, odnosno regulirati brzinu vrtnje motora
- -pogone koji trebaju približno stalnu brzinu bez obzira na veličinu tereta
- -pogone s potrebom za regulacijom brzine vrtnje u velikim rasponima
- -pogone s regulatorima, ali samo kod izuzetno zahtjevnih i važnih pogona jer traži dva odvojena izvora napajanja za stator i rotor, što povećava cijenu.

- Poredni (paralelni) spoj namota - poredni motor

Namoti statora i rotora spojeni su paralelno na isti istosmjerni izvor napona. Karakteristike takvih strojeva slične su nezavisnom spoju, ali moment opada nešto više porastom brzine u usporedbi s nezavisnim motorom. Koristi se češće od nezavisnog motora iako ima nešto lošiju karakteristiku zato što mu je potreban jedan izvor napajanja umjesto dva što ga čini jeftinijim i lakše ostvarivim. Koristi se za regulaciju manje zahtjevnih pogona i pokretanje pogona bez regulacije.

- Serijski spoj namota - Serijski motor

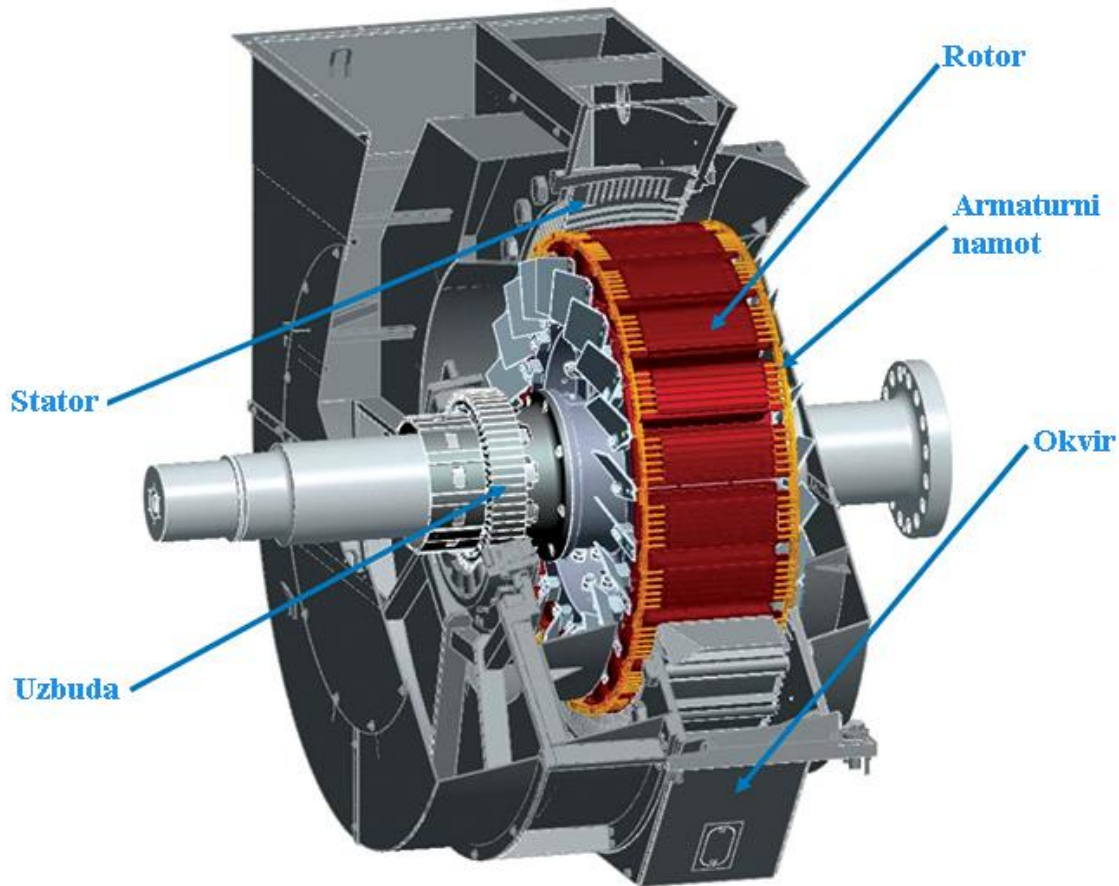
Namoti statora i rotora spojeni su serijski na isti izvor napajanja. Struje kroz oba namota su iste, što uzrokuje naglo opadanje momenta povećanjem brzine motora. Radi toga su karakteristike veoma meke i nepovoljne za veći broj namjena. Nije pogodan za slučajeve gdje je potrebna regulacija brzine vrtnje, a glavna mu je prednost veliki potezni moment te se zbog toga koristi u industriji gdje je potrebno pomicanje velikih tereta.



Slika 3.2. Karakteristike istosmjernih motora [5]

4. SINKRONI STROJEVI

Sinkroni strojevi se proizvode u rasponima od nekoliko mW do nekoliko GW. Jako su zastupljeni u velikim elektranama u ulozi generatora. Armaturni je namot sinkronog stroja najčešće trofazan i u većini slučajeva smješten na statoru stroja te je simetrično raspoređen u utorima po obodu stroja. Uloga armaturnog namota je induciranje napona pod utjecajem promjene magnetskog toka. Na rotoru se nalazi uzбудni namot na posebno oblikovanim istaknutim polovima kod sinkroni strojeva za manje brzine ili u utorima cilindričnog rotora kod sinkroni strojeva za velike brzine, ali postoje i sinkroni strojevi bez uzbudnog namota to su najčešće jako mali sinkroni strojevi koji rade na drugim osnovama kao na primjer induktorski, reluktantni, histerezni strojevi. Sinkroni strojevi se rijetko izvode s uzbudom na statoru, a armaturom na rotoru.



Slika 4.1 Građa sinkronog motora [6]

4.1 Princip rada sinkroni strojeva

Uzbudnim namotom teče istosmjerna struja i stvara uzbudno protjecanje, odnosno magnetski tok. Magnetsko polje koje stvara uzbuda na rotoru vrti se uslijed mehaničke vrtnje rotora. U vodičima statorskog namota inducira se elektromotorna sila, i kad je stroj opterećen poteku struje. Struje u statorskom namotu stvore okretno protjecanje koje se vrti jednakom brzinom kao i rotor, dakle sinkrono s rotorom. Po tome je ova vrsta stroja i nazvana sinkroni stroj.

4.2 Podjela sinkroni strojeva

Prema vrsti pogonskog stroja razlikuju se:

- turbogeneratori
- hidrogeneratori
- kompenzatori
- motori

Prema konstrukciji rotora se razlikuju strojevi s:

- cilindričnim rotorom
- istaknutim polovima

Prema brzini vrtnje dijele se na:

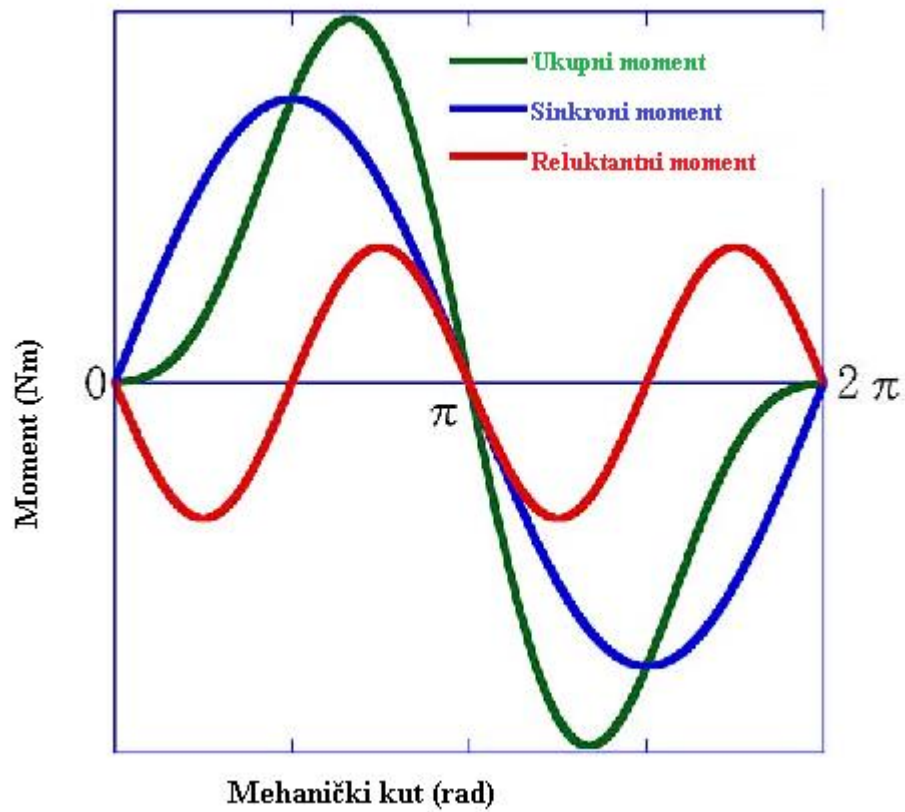
- brzohodne
- strojeve srednje brzine
- sporohodne

Turbogeneratori - brzohodni strojevi koji se pogone parnim ili plinskim turbinama koje imaju veliku brzinu vrtnje. Rade se samo s horizontalnom osovinom te mogu biti dvopolni ili četveropolni. Imaju relativno mali promjer rotora (do oko 1 metar) s obzirom na njegovu duljinu zbog centrifugalnih sila koje se povećavaju kvadratom brzine vrtnje. Zbog velike brzine vrtnje mora se koristiti cilindrični rotor i malen broj polova da bi se ostvarila frekvencija od 50 Hz. Kako rotor mora imati barem 2 pola maksimalna brzina stroja za mreže od 50 Hz je 3000 okr/min što je i najčešća brzina u Europi, ali se za najveće turbogeneratore od 1 do 2 GVA koristi i brzina od 1500 okr/min (četveropolni).

Hidrogeneratori - sporohodni strojevi s istaknutim polovima, najčešće horizontalnom osovinom i brzinom vrtnje od 50 do 1000 okr/min. Zbog male brzine vrtnje rotora hidrogenerator mora imati više pari polova i veći promjer rotora (do 20 metara) u usporedbi s turbogeneratorom da bi se ostvarila velika izlazna snaga na 50 Hz.

Kompenzatori - posebna vrsta sinkronih strojeva koji ne služe za pretvorbu mehaničke u električnu energiju ili obratno, nego služe za opskrbu mreže jalovom energijom. Rade samostalno bez pogonskog stroja, velikih snaga 10 do 200 MVA najčešće sa 6 ili 8 istaknutih polova. Danas se rijetko koriste.

Sinkroni motori - rade se u širokom rasponu brzina vrtnje i snage od nekoliko mW do nekoliko stotina MW. Prije su se najčešće koristili u pogonima s konstantnom brzinom vrtnje dok se danas sve više koriste u regularnim pogonima i reverzibilnim hidroelektranama gdje rade kao generatori kad je potrebno proizvoditi električnu energiju, a u vrijeme kad postoji višak električne energije rade kao motori i pumpaju vodu u akumulacijsko jezero.



Slika 4.2 Momentna karakteristika sinkronog motora [7]

5. ASINKRONI STROJEVI

Stator asinkronog stroja ima raspoređeni namot, najčešće trofazni. Kad se takav namot priključi na simetričan višefazni sustav napona, njime poteku struje koje stvore protjecanje konstantnog iznosa i konstantne brzine vrtnje okretnog magnetskog polja. Stator asinkronog stroja se izvodi kao i stator sinkronog stroja približno jednake snage.



Slika 5.1 Građa asinkronog motora [8]

5.1 Princip rada i uporaba asinkroni strojeva

Razlika između rotora sinkronog i asinkronog stroja je u tome što sinkroni stroj ima istaknute polove ili cilindrični rotor s namotom koji se spaja na vanjski istosmjerni izvor te tako nastaje protjecanje rotora. S druge strane rotor asinkronog stroja nema istaknute polove, a namoti su raspoređeni po obodu rotora te nisu spojeni na vanjski izvor. Napon se u rotorskom namotu inducira okretnim magnetskim poljem statora zato što brzina rotora nije jednaka brzini okretnog magnetskog polja statora, a struje se u rotorskom namotu pojave kada se na rotor priključi nekakav teret.

Rotorski namot asinkronog stroja je uvijek višefazni, a broj faza rotora ne mora biti jednak broju faza statora. Rotorski krug se kratko spaja na rotoru ili se spaja s vanjskim radnim otporom preko kliznih prstena. Asinkroni strojevi su najkorišteniji strojevi u industriji zbog svoje jednostavnosti, pouzdanosti i povoljne cijene koja ostvarena proizvodnjom ovih motora u velikim serijama posebice kod malih strojeva te se, najčešće koriste kao motori.

5.2 Podjela asinkronih strojeva

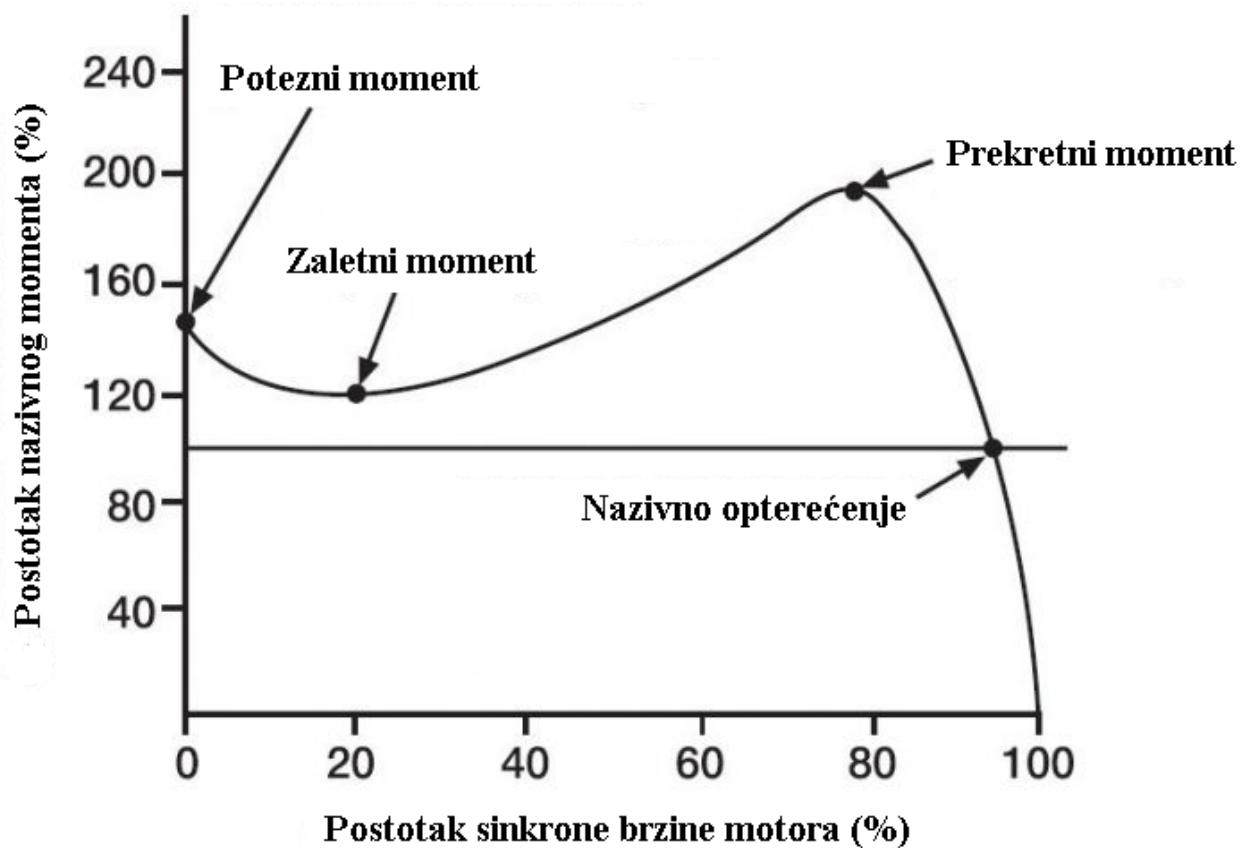
Podjela asinkronih motora po konstrukciji rotora:

- kolutne
- kavezne: uložni ili lijevani kavezni namot

Kolutni motori - rotorski namot ovog motora je najčešće trofazan kojem su početci spojeni u zvijezdu, a na krajevima namota su klizni koluti pomoću kojih se preko četkica može u seriju sa svakom fazom rotora spojiti dodatni vanjski otpor. Klizni kolutovi se nalaze na osovini rotora i međusobno su izolirani. Po njima klize četkice koje se preko dodatnih otpora spajaju s rotorskim namotom. Iznos dodatnog otpora može se podesiti jer su otpornici stepenasti. Kada vanjski otpornici nisu potrebni četkice se podignu s kliznih koluta pomoću posebnog uređaja, rotorski namot se kratko spoji na rotoru. Pomoću dodatnih vanjskih otpora povećavamo ili smanjujemo ukupni radni otpor pojedine faze rotora. Promjenom otpora faza rotora mijenjamo karakteristike momenta i struje asinkronog motora.

Kavezni motor - rotorski namot kaveznog motora izveden je tako da je u svakom utoru rotora po jedan vodič u obliku štapa. Štapovi su s obje strane rotora kratko spojeni prstenovima i čine kavez motora, tj. njegov višefazni rotorski namot. Postoje izvedbe s više od jednog kaveza. Svaki štap kaveza rotora je jedna faza pa je ukupan broj faza rotora jednak broju štapova kaveza rotorskog namota. Različiti oblici štapova kaveza i broj kaveza daju različite karakteristike motora. Broj faza rotora je proizvoljan ako su svi namoti međusobno simetrični, a simetričnost namota je uvjet za

induciranje višefaznog sustava simetričnih napona i struja te stvaranje momenta.



Slika 5.2 Momentna karakteristika asinkronog motora [9]

6. ENERGETSKA UČINKOVITOST MOTORA

Energetsku učinkovitost motora možemo definirati kao omjer dobivene mehaničke snage i snage koju motor povlači iz mreže prema formuli (6.1).

$$\eta_M = \frac{P_M}{P_R} \quad (6.1)$$

Mehanička snaga je funkcija momenta motora koju možemo izračunati formulom za konjsku snagu (6.2).

$$HP = \frac{T \cdot n}{5252} \quad (6.2)$$

Zatim je potrebno dobivenu konjsku snagu pomnožiti sa 746 da bismo imali rezultat u SI sustavu.

$$1 \text{ HP} = 746 \text{ W} \quad (6.3)$$

Izračunata mehanička snaga ovom formulom nije snaga koju motor povlači iz mreže zato što se na tu snagu moraju dodati gubici samog rada elektromotora. U te gubitke se ubrajaju gubici zagrijavanja namota statora i rotora, gubici petlje histereze, vrtložnih struja i gubici trenja i ventilacije koji su relativno mali u usporedbi s ostalim gubicima, te iznose do 13 % ukupnih gubitaka rada motora, povećanjem snage motora rastu i gubici trenja i hlađenja. Ostali gubici koji nisu navedeni ovise o opterećenju motora i okolini u kojoj motor radi te mogu iznositi do 18 % ukupnih gubitaka. Prosječna učinkovitost asinkroni motora uzevši sve u obzir se kreće oko 87.4 %.

6.1 Poboljšanja motora

Kako je vrijeme prolazilo uvodile su promjene u pravljenu elektromotora u svrhu povećanja energetske učinkovitosti, a neke od tih promjena su:

- Povećanje debljine žica namota statora da bi se smanjili gubici zagrijavanja, pošto deblje žice imaju manji otpor, a gubici zagrijavanja ovise o otporu žice po formuli $P=R \cdot I^2$. Također korištenjem bakra umjesto aluminijske žice za izradu žica namota također smanjujemo otpor.
- Isto kao kod statora na rotoru možemo isto povećati debljinu žica namota i debljinu štapova kaveza kod kaveznog motora da bi smanjili otpor i zagrijavanje.
- Uporaba kvalitetnijeg željeza radi smanjenja gubitaka petlje histereze i vrtložnih struja

Prema [3] u tablici (6.1) je prikazana usporedba minimalne dopuštene energetske učinkovitosti za Europsku Uniju i SAD za 4 polne trofazne elektromotore (IEA, 2011). U slučaju Europske Unije EU ekodizajn direktiva nalaže da svi elektromotori nazivne snage između 0.75 KW i 375 KW i prodani poslije 1. siječnja 2015.godine moraju ispunjavati IE3 minimalni nivo energetske učinkovitosti. Međutim, elektromotori koji su samo IE2 nivoa energetske učinkovitosti mogu se koristiti ako rade sa sustavom za kontrolu brzine (frekvencijski pretvarač, engl. *adjustable speed drives* - ASD).

Tablica (6.1) Energetske učinkovitosti motora 4 pola [3]

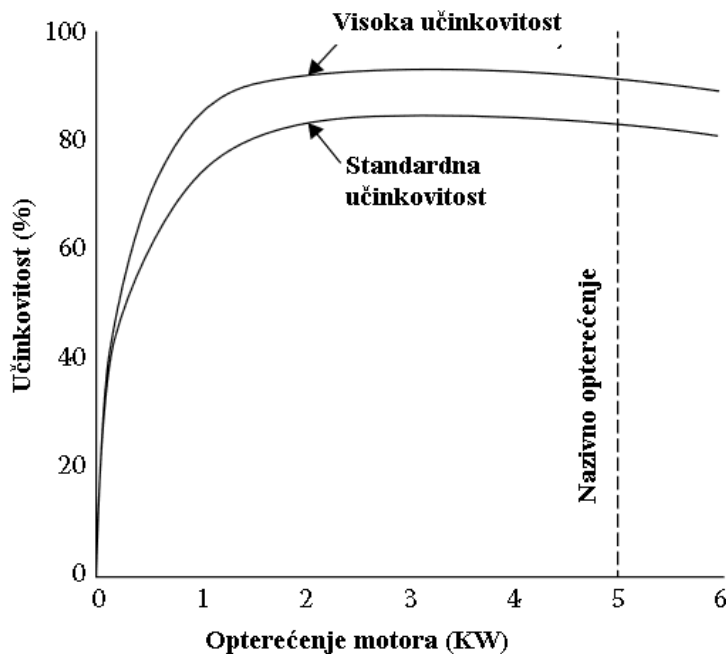
Izlazna mehanička snaga motora u KW	EU IE2 nivo energetske učinkovitosti (50 Hz)	EU IE3 nivo energetske učinkovitosti (50 Hz)	NEMA motori visoke učinkovitosti (60 Hz)
0.75	0.796	0.825	0.855
1.12	0.814	0.841	0.865
1.50	0.828	0.853	0.865
2.25	0.843	0.867	0.895
3.73	0.866	0.886	0.895
5.60	0.877	0.896	0.910
7.46	0.887	0.904	0.917
11.20	0.898	0.914	0.930
14.92	0.906	0.921	0.930
18.65	0.912	0.926	0.936
22.38	0.916	0.930	0.941
29.84	0.923	0.936	0.941
37.30	0.927	0.939	0.945
44.76	0.931	0.942	0.950
55.95	0.935	0.946	0.950
74.60	0.940	0.950	0.954
93.25	0.942	0.952	0.954
111.9	0.945	0.954	0.958
149.2	0.951	0.960	0.958

Gubici zagrijavanja namota statora i rotora se ne mijenjaju znatno povećanjem veličine i snage elektromotora što nas dovodi do zaključka da veći elektromotori imaju veću energetske učinkovitost u usporedbi s elektromotorima manje snage (tablica 6.2). Generalno vrijedi da

učinkovitost motora ovisi o tome koliko je opterećen što se vidi u grafu 6.1, ali na to utječu i karakteristike motora. Standardni motori na oko 50 % opterećenosti imaju maksimalnu učinkovitost te se ta učinkovitost znatno ne mijenja do 100 % opterećenosti. Asinkroni motori su osjetljivi na oscilacije u naponu, dozvoljena granica je + -10 % nazivnog napona pri čemu će manji napon rezultirati lošijom momentnom karakteristikom motora dok preveliki napon uzrokuje veća zagrijavanja namota i kraći životni vijek motora.

Tablica 6.2. Energetske učinkovitosti motora 4 pola[3]

Izlazna mehanička snaga motora u KW	Srednja nazivna učinkovitost motora prosječne učinkovitosti	Srednja nazivna učinkovitost motora visoke učinkovitosti
0.75	0.730	0.830
1.12	0.750	0.830
1.50	0.770	0.830
2.25	0.800	0.865
3.73	0.820	0.876
5.60	0.840	0.885
7.46	0.850	0.896
11.20	0.860	0.910
14.92	0.875	0.916
18.65	0.880	0.926
22.38	0.885	0.928
29.84	0.895	0.930
37.30	0.900	0.932
44.76	0.905	0.933
55.95	0.910	0.935
74.60	0.915	0.940
93.25	0.920	0.942
111.9	0.925	0.946
149.2	0.930	0.953



Graf (6.1) Ovisnost učinkovitosti o opterećenju [3]

6.2 Frekvencijski pretvarači

Frekvencijski pretvarač (engl. *Adjustable Speed Drives - ASD*) je sklop preko kojeg se elektromotor spaja na mrežu i služi za štednju električne energije tako što po potrebi regulira brzinu elektromotora bez mehaničkog djelovanja na motor. Regulacija se radi tako da ulazni izmjenični napon pretvara u istosmjerni, a zatim opet u izmjenični, ali s drugom frekvencijom koja mijenja brzinu elektromotora. Najčešća primjena ovih sustava je za regulaciju brzine motora koji služe ventilaciju prostora. Da bi se mogla odrediti energetska učinkovitost takvih sustava potrebno je poznavati gubitke u cijelom sustavu što je teško za odrediti zato što su instrumenti za mjerenja prilagođeni za sinusoidna mjerenja dok su za *ASD* sustave tipični nesinusoidalni oblici napona i struja.

6.3 Određivanje energetske učinkovitosti motora

Postoje 3 metode za određivanje uštede električne energije zamjenom starog motora novim energetski učinkovitim.

1. Pojednostavljena metoda - najkorištenija metoda koja podrazumijeva da vrijede dvije pretpostavke: 1. Motor je nazivno opterećen i 2. Nema promjene brzine vrtnje motora. Ušteda u snazi je jednaka:

$$\Delta P_R = P_M * \left(\frac{1}{\eta_e} - \frac{1}{\eta_r} \right) \quad (6.4)$$

Procijenjena ušteda u potrošnji električne energije nastale zamjenom motora je jednaka:

$$\Delta kWh = \Delta P_R * N_h * LF_M \quad (6.5)$$

2. Metoda mehaničke ocjene snage - u ovoj metodi se pretpostavlja da maksimalna struja koju motor povlači iz mreže proporcionalna srednjoj mehaničkoj snazi koju motor razvija. Snaga motora koji će zamijeniti stari motor je jednaka:

$$P_{r,e} = \frac{P_M}{\eta_{op,e}} * LF_{M,e} * PDF_{M,e} \quad (6.6)$$

Kako se u ovoj metodi postojeći motor zamjenjuje manjim i učinkovitijim koji je više opterećen od starog, novi faktor opterećenja je jednak:

$$LF_r = LF_e * \frac{P_{M,r}}{P_{M,e}} \quad (6.7)$$

Veće opterećenje motora uzrokuje veće klizanje čime se povećavaju gubici klizanja:

$$SLIP_p = \left(\frac{\omega_{M,r}}{\omega_{M,e}} \right)^3 \quad (6.8)$$

Snaga koju novi motor povlači iz mreže bit će jednaka:

$$P_{R,r} = \frac{P_{M,r}}{\eta_{op,r}} * LF_{M,r} * PDF_{M,r} * SLIP_p \quad (6.9)$$

3. Metoda mjerenja polja - kod ove metode snaga koju povlači motor se mjeri direktno mjerenjem struje, napona i faktora snage motora. Faktor opterećenja se aproksimira kao omjer struje koju povlači motor iz mreže i nazivne struje motora, ako nije moguće direktno izmjeriti snagu motora ona se računa prema formuli:

$$P_{R,E} = \sqrt{3} * E_M * I_M * pf_M \quad (6.10)$$

A faktor opterećenja je jednak:

$$LF_{M,E} = \frac{I_M}{I_{FL}} \quad (6.11)$$

6.4 Izbor motora

Izbor ovisi najviše o:

- Mreži koja je dostupna istosmjerna ili izmjenična, jednofazna ili trofazna
- Potrebna snaga motora, dimenzije, intervali rada motora
- Okolina u kojoj radi motor što utječe na njegovu izvedbu koja može biti: otvorena izvedba s hlađenjem zrakom pomoću ventilatora, izvedba sa zaštitom od ulaska stranih tijela u motor i izvedba sa zaštitom od izazivanja požara ili eksplozije za rad u opasnoj okolini

6.5 Podjela gubitaka kod AC elektromotora

Iznos gubitaka na pojedinim elementima elektromotora ovisi o principu rada, izvedbi elektromotora, snazi motora, opterećenju i okolini elektromotora. Kod elektromotora manjih snaga najveći gubici su u zagrijavanju namota statora te iznose oko 50 % ukupnih gubitaka, dok se kod motora većih snaga gubici statora kreću oko 25 % ukupnih gubitaka. Lutajući gubici su vrsta gubitaka koji su uzrokovani parazitskim učincima neidealnog rada motora te imaju sve veći značaj porastom snage motora te iznose preko 10 % ukupnih gubitaka kod motora velike snage. Gubici trenja i hlađenja također rastu povećanjem snage motora te se kreću od 5 % kod motora malih snaga do oko 13 % kod motora velikih snaga. Gubici čiji se udio u ukupnim gubicima značajnije ne

mijenja su gubici zagrijavanja namota rotora i gubici u željezu (petlja histereze) te iznose po oko 20 % svaki.

Elektromagnetni gubici u namotima i željezu se dijele na temeljne, prostorne harmonike i vremenske harmonike. Vremenski harmonici su zanemarivo mali ako imamo konstantnu brzinu vrtnje i kvalitetan izvor napajanja elektromotora, ali se moraju uzeti u obzir ako koristimo pretvarače kao izvore napajanja. Prostorni harmonici su uzrokovani konstrukcijskim ograničenjima kao što su ekscentričnost i magnetsko zasićenje. Sve harmoničke komponente stvaraju dodatne gubitke u namotima statora i rotora.

Gubici se mogu još podijeliti na konstantne i gubitke ovisne o opterećenju. Gubici koji se smatraju konstantnim su gubici trenja i ventilacije i gubici u željezu (petlja histereze). Ti gubici ovise o geometriji elektromotora i materijalima izrade. Za određivanje tih gubitaka koristi se pokus praznog hoda. Gubici koji su ovisni o opterećenju su gubici zagrijavanja namota statora i rotora i lutajući gubici opterećenja. Gubici namota statora se određuju se pomoću struje statora pri zadanom opterećenju i otporu namota statora koji se korigira s obzirom na temperaturu stroja pri mjerenju. Gubici u namotima rotora su ovisni o opterećenju motora te se mogu približno odrediti pomoću iznosa klizanja rotora pri nekom opterećenju. Zadnja vrsta gubitaka ovisnih o opterećenju stroja su lutajući gubici koji su uzrokovani sljedećim ograničenjima stroja:

- Ograničenja magnetskih svojstava električnog čelika u jezgri motora dovode do lokalnog zasićenja
- uporaba praktične geometrije s utorima i diskretnim umjesto potpuno sinusoidnim namotom uzrokuje prostorne harmonike i vrtložne struje
- Nesavršenost izrade kaveza rotora što uzrokuje pojavu parazitnih struja

U lutajuće gubitke se ubrajaju gubici koji se pojavljuju pri opterećenju u jezgri i drugim metalnim dijelovima stroja i gubici vrtložnih struja u statorskim i rotorskim namotima uzrokovanim strujnim poljima koja propuštaju. Lutajući gubici su zbog svoje neistraženosti često predmet istraživačkih i znanstvenih radova.

Utjecajem dodatnih harmonika povećavaju se gubici u namotima motora, ali što je još gore harmonijska izobličenja izazivaju povećanje vibracija i oscilacija motora što dovodi do trajnih oštećenja ako se ništa ne poduzme. Tipičan izvor harmonijskih izobličenja su frekvencijski pretvarači za regulaciju brzine elektromotora te je preporučljivo uz njih koristiti harmonijske filtere za zaštitu od izobličenja.

6.6 Faktori učinkovitosti elektromotora

Nazivna učinkovitost motora se određuje s obzirom na njegove nazivne veličine koje su tvornički određene pri optimalnoj temperaturi u skladu sa zadanim standardima određivanja učinkovitosti. U praksi se teško ostvaruju idealni uvjeti rada za postizanje nazivne učinkovitosti i snage te može doći do oštećenja elektromotora zbog pregrijavanja ako motor dovoljno dugo radi u uvjetima koji nisu predviđeni. Jedan od načina na koji možemo zaštititi elektromotor od oštećenja zbog pregrijavanja je da radi na snazi manjoj od nazivne čime se smanjuje zagrijavanje, ali i potezni i prekretni moment. Najvažniji faktori koji uzrokuju zagrijavanje veće od predviđenog su:

- Opterećenje elektromotora veće od nazivnog
- Temperatura okoline koja je često veća od predviđene
- Neredovito održavanje motora
- Loša kvaliteta napajanja elektromotora

6.6.1 Utjecaj temperature na učinkovitost

Temperatura ima jako velik utjecaj na gubitke kod elektromotora. Otpori namota statora i rotora se povećavaju za oko 4 % pri povećanju temperature od 10 K što povećava gubitke zagrijavanja, ali treba imati na umu da utjecaj temperature na otpor namota kod motora većih snaga je manji za 0.2 do 2 %. Gubici ventilacije se smanjuju povećanjem temperature za 4 do 5 % pri povećanju temperature od 10 K pod uvjetom da je vlažnost zraka 80 % i atmosferski tlak. Kao i gubici ventilacije gubici u željezu su manji povećanjem temperature za do 1 % pri povećanju temperature od 10 K ovisno o kvaliteti lima i gustoći magnetskog toka.

6.6.2 Utjecaj održavanja elektromotora na učinkovitost

Okolina u kojoj elektromotor radi može zahtijevati posebno održavanje pogona kao na primjer u pogonima gdje je zrak onečišćen prašinom i ostacima materijala, u takvim pogonima potrebno je redovno čistiti rashladne peraje na elektromotorima zato što naslage prašine smanjuju učinkovitost hlađenja motora, a čak i ako ne dođe do pregrijavanja zbog lošeg hlađenja veće temperature motora skraćuju njegov životni vijek. Uz rashladne peraje potrebno je obratiti pozornost na ležajeve koji uvijek trebaju biti dovoljno podmazani i zamijenjeni, ako su u lošem stanju, da bi gubitke trenja sveli na minimum.

6.6.3 Motori visoke učinkovitosti

Sve strože međunarodne i nacionalne norme i propisi minimalne učinkovitosti koju moraju zadovoljiti motori na tržištu prisili su proizvođače da u prioritetima imaju učinkovitost motora. Najveće uštede električne energije se ostvaruju prilagođavanjem brzine i momenta elektromotora teretu kojim je opterećen pomoću frekvencijskih pretvarača, ali time se ne povećava sama učinkovitost elektromotora. Najjednostavniji tradicionalni načini povećanja učinkovitosti su korištenje debljih materijala za namote i jezgru stroja te korištenje drugih učinkovitijih materijala za namote i jezgru stroja. Oba pristupa imaju svoje prednosti i nedostatke, ali da bi neki motor bio motor visoke učinkovitosti potrebne su radikalnije promjene pošto je cijena jedan od bitnijih faktora

izbora motora, a tradicionalni načini povećanja učinkovitosti mogu značajno povećati cijenu motora. Motor visoke učinkovitosti se ističe optimalnim omjerom cijene i učinkovitosti što zahtjeva izmjene u dizajnu, materijalima, dimenzijama i načinu proizvodnje u odnosu na standardne motore.

6.7 Materijali, optimizacije i alternative AC elektromotora

6.7.1 Materijali motora

Povoljna cijena sirovina metala za izradu motora omogućila je proizvođačima motora da učinkovitost svojih motora povećavaju debljanjem vodiča namota i štapova kaveza rotora te boljim čelikom jezgre. To je trajalo do 2004. godine kada je cijena sirovina počela rasti te su se proizvođači motora bavili dizajnom i tolerancijama motora kako bi mu povećali učinkovitost. To je razlog zbog kojeg se danas proizvodnja motora visoke učinkovitosti temelji na suradnji dobavljača sirovina za proizvodnju i dizajnera motora radi postizanja najboljeg omjera cijene proizvodnje i kvalitete materijala izrade.

6.7.2 Materijali jezgre

Magnetski krug koji se sastoji od statora i rotora je najskuplji i najvažniji dio elektromotora koji mu omogućuje stvaranje momenta u svrhu obavljanja rada. Izrađen je od feromagnetskog materijala kao što je konstrukcijski i električni čelik koji imaju 100 do 50 000 puta veću permeabilnost od paramagnetski i dijamagnetski materijala. U magnetskom krugu nastaju gubici petlje histereze i vrtložnih struja koje možemo smanjiti uporabom materijala s manjom permeabilnošću, ali ćemo tada povećati gubite u bakru zbog veće struje u namotima. Materijali od kojih se prave jezgre motora su meko magnetni s lošom vodljivosti radi smanjenja gubitaka vrtložni struja, a najčešće korišteni materijali su:

- Silikonski čelik

- Legura nikal željezo
- Legura kobalt željezo
- Praškasta jezgra
- Amorfni i nano kristalni magnetni materijali

6.7.3 Materijali rotorskog kaveza

Džulovi gubici nastaju uslijed prolaska struje kroz rotorski kavez čiji je otpor određen vodljivosti materijala štapova rotorskog kaveza te njihovom duljinom i poprečnim presjekom. Zbog visoke cijene materijala s velikom vodljivošću kao materijal za rotorski kavez se koriste aluminij i bakar. Za masovnu proizvodnju elektromotora malih i srednjih snaga koriste se kavezi od aluminija zato što daje dovoljno dobru učinkovitost uz povoljnu cijenu proizvodnje, ali se u zadnjih nekoliko godina aluminij sve više zamjenjuje s bakrom zbog sve strožih normi minimalne učinkovitosti motora. Veća učinkovitost motora s rotorskim kavezom od bakra ostvarena je 70% boljom vodljivosti bakra u usporedbi s aluminijem što za posljedicu ima manje gubitke vrtložnih struja.

6.7.4 Optimizacija geometrije statora, rotora i zračnog raspora

Cilj optimizacije geometrije statora, rotora i zračnog raspora je povećati učinkovitost motora uz što veću uštedu na materijalu i cijeni proizvodnje bez da se znatno promjeni željena momentna karakteristika. Danas računalni softveri imaju veliku ulogu u optimizaciji i proračunima motora. Primjer jednog takvog softvera je FEM (engl. *finite-modeling software*). Pomoću njega možemo relativno precizno odrediti gubitke motora uz minimalne troškove te električno, magnetsko, mehaničko i temperaturno ponašanje motora još dok je u fazi dizajniranja. Da bi softver odredio optimalnu geometriju statora, rotora i zračnog raspora potrebni su mu podaci kao što je gustoća magnetski silnica i struje, momentna karakteristika, temperaturna distribucija i gubici.

6.7.5 Alternative trenutno korištenih elektromotora

Trenutno najkorišteniji elektromotori su asinkroni elektromotori čija je tehnologija dugo proučavana i približavaju se granicama najveće moguće učinkovitosti ostvarive u realnim financijskim okvirima. Tijekom vremena pojavile su se alternative čija cijena opada prolaskom vremena i sve većom proizvodnjom. Potencijalna zamjena za tradicionalne asinkrone motore je sinkroni motor s promjenjivom reluktancijom. Ti motori se ističu visokom izdržljivošću i učinkovitošću te su pogodni za pogon hibridni i električni automobila. Razlog zbog kojeg još nisu zamijenili tradicionalne asinkrone motore je njihova bučnost i vibracije u radu te valovitost momentne karakteristike. Za rad ovih motora potreban je složen kontroler i točna povratna informacija o položaju za profiliranje trenutnih valnih oblika.

Još jedna alternativa tradicionalnim motorima je sinkroni motor s permanentnim magnetom. Prednosti ovih motora su sljedeće:

- Veća učinkovitost ostvarena je permanentnim magnetima u rotoru koji stvaraju magnetski tok te time smanjuju struju magnetiziranja statora i induciranu struju rotora gotovo na nulu. Uz to zbog sinkronog rada motora gubici u željezu se svode samo na gubitke harmonika.
- Manje dimenzije motora za istu snagu u usporedbi s tradicionalnim motorima što je ostvareno manjim gubicima zagrijavanja, a time i manjom radnom temperaturom što omogućuje veće statorske struje i snagu.
- Manja potreba za hlađenjem omogućuje im veliku učinkovitost na malim brzinama rada
- Veći intervali servisa motora
- Manja težina rotora omogućuje dinamičniji rad

Loša strana motora s permanentnim magnetom je da ne mogu biti direktno spojeni na mrežu zato što im je potreban pretvarač s kontrolom s obzirom na orijentaciju polja (engl. *field oriented control*) što povećava gubitke i troškove nabave.

Kao zamjena za motore koji rade s konstantnom brzinom postoje hibridi asinkroni kavezni motora i sinkroni motora sa permanentnim magnetima koji imaju rotorski kavez s magnetima. Prednost ovih motora je što se mogu direktno spojiti na mrežu bez pretvarača te imaju 1 % do 2 % veću učinkovitost u usporedbi s premium motorima iste snage.

7. STANDARDI ENERGETSKE UČINKOVITOSTI

Standardi energetske učinkovitosti služe kao mjera kojom se proizvođači i kupci elektromotora potiču i prisiljavaju na korištenje i proizvodnju elektromotora koji su optimalne učinkovitosti s obzirom na trenutno dostupnu tehnologiju i cijenu proizvodnje. Ta mjera potiče proizvođače da investiraju u razvijanje novih načina i materijala izrade motora sa učinkovitijim radom čime bi se zadovoljile norme i osigurala viša konkurentnost na tržištu. Kupci elektromotora s druge strane dobivaju manje troškove rada motora te uz to manje opterećuju elektroenergetsku mrežu.

7.1 IEC/EN 60034-30-1: 2014

Standard IEC/EN 60034-30-1: 2014 je nadogradnja na standard IEC/EN 60034-30: 2008 iz 2008. U odnosu na standard iz 2008. standard iz 2014. obuhvaća 8-polne motore i uvodi IE4 standard energetske učinkovitosti za elektromotore koji rade na sinusoidalnom naponu. Standard iz 2014. obuhvaća motore svih konstrukcija koji se spajaju na mrežu uključujući jednofazne motore dok se standard iz 2008. odnosi samo na trofazne motore. Motori na koje se odnosi novi standard su motori koji rade na nazivnim naponima 50 do 1000 V frekvencije 50 i 60 Hz, imaju 2, 4, 6 ili 8 polova, snage su između 0.12 i 1000 kW, rade na temperaturi okoline između -20 i 60 °C i nalaze se na nadmorskoj visini do 4000 m. Ovaj standard ne obuhvaća motore s više od 8 polova i motore integrirane u strojeve kao pumpe i kompresore koji ne mogu biti testirani odvojeno te motore za rad u eksplozivnim okolinama. Također, standard definira da proizvođač mora navesti učinkovitost motora i kako je došao do te učinkovitosti. Ovi standardi služe kao osnova za donošenje međunarodnih standarada učinkovitosti kako bi se osigurala jednoličnost motora na svakom tržištu te smanjila cijena proizvodnje.

7.2 Europski standard minimalnih energetske performansi

EU MEPS (engl. *European Minimum Energy Performance Standard*, Europski standard minimalnih energetske performansi) je standard temeljen na IEC standardu te u Europi 2017. godine postavlja IE3 standard kao minimalni standard učinkovitosti za većinu novih trofaznih motora snage 0.75 do 375 kW. IE2 standard motori još uvijek mogu biti na tržištu, ali se moraju

koristiti u kombinaciji s frekvencijskim pretvaračima da bi se zadovoljio standard učinkovitosti. 2017. godine je bila uvedena treća faza EU MEPS standarda gdje su u prve dvije faze elektromotori morali prvo zadovoljiti IE2 standard, a zatim je u drugoj fazi 2015. godine IE3 standard uveden kao minimum za motore od 7.5 do 375 kW. U idućoj četvrtoj fazi EU MEPS-a najizglednije je uklanjanje IE2 standard motora u kombinaciji s frekvencijskim pretvaračima s tržišta iz razloga što su IE3 standard motori sve pristupačniji. Danas svaka razvijena država ima svoju verziju MEPS-a temeljena na IEC standardima te je jako slična ako ne i ista kao i EU MEPS. Najveće razlike u standardima su kod elektromotora manjih snaga. Od 2014. godine Kina i SAD su počele implementaciju standarda energetske učinkovitosti za motore visokih napona (preko 1000 V nazivno) te se očekuje od Europe da im se što prije priključi.

Tablica 7.1. Minimalna učinkovitost motora po IE4 standardu [3]

Snaga motora u kW	2 pola	4 pola	6 polova	8 polova
0.12	0.665	0.698	0.649	0.623
0.2	0.719	0.758	0.714	0.684
0.25	0.743	0.779	0.741	0.708
0.4	0.789	0.817	0.787	0.749
0.55	0.815	0.839	0.809	0.77
0.75	0.835	0.857	0.827	0.784
1.5	0.865	0.882	0.859	0.826
3	0.891	0.904	0.886	0.859
4	0.9	0.911	0.895	0.871
5.5	0.909	0.919	0.905	0.883
7.5	0.917	0.926	0.913	0.893
15	0.933	0.939	0.929	0.912
18.5	0.937	0.942	0.934	0.917
30	0.945	0.949	0.942	0.927
45	0.95	0.954	0.948	0.934
90	0.958	0.961	0.956	0.944
200	0.965	0.967	0.963	0.954
400	0.965	0.967	0.966	0.954

8. PRIMJER PRORAČUNA UŠTEDE ELEKTRIČNE ENERGIJE ZAMJENOM STAROGA MOTORA S NOVIM VEĆE UČINKOVITOSTI

Proračun je rađen za asinkroni motor koji je dio jedinice za ventilaciju svečanane dvorane, taj motor pogoni ventilator koji uvlači svjež zrak izvana te ga usmjerava u sustav za cirkulaciju gdje se filtrira i pušta u dvoranu. Motor koji služi za to je Imofa TZR 01-450.



Slika 8.1 Asinkroni motor IE2 standarda



Slika 8.2 Ventilator

Za precizan proračun učinkovitosti potrebno je imati podatke pokusa opterećenja toga motora. S obzirom da je taj motor proizveden 1997. godine na internetu nema nikakvih podataka o njemu te su jedini podaci koji su mi bili dostupni oni s natpisne pločice, što nije dovoljno za pouzdan proračun učinkovitosti. Iz toga razloga sam se odlučio za proračun koristiti asinkroni motor za koji sam radio pokus opterećenja na laboratorijskim vježbama. To je Končar asinkroni motor istih nazivnih vrijednosti struje (zvijezda i trokut spoj), snage i napona (zvijezda i trokut spoj) kao i motor korišten u jedinici za ventilaciju svečane dvorane. Motor jedinice za ventilaciju je prema podacima motora za koji je izveden pokus opterećenja motor koji zadovoljava IE2 standarde minimalne nazivne učinkovitosti. Minimalna nazivna učinkovitost motora koji zadovoljava IE2 standard mora biti 85.8 % (2 polni asinkroni motor), a pokusom opterećenja Končarovog motora dobili smo nazivnu učinkovitost od 87.6 %. Motor jedinice za ventilaciju godišnje radi oko 1700 sati od toga 25 % vremena na 70 % nazivne snage, ostatak vremena na 100 % nazivne snage. Na 70 % nazivne snage učinkovitost mu je 86.1 % dok mu je na 100 % učinkovitost 87.6 % (nazivna učinkovitost), prema ovim podacima za proračun je korištena srednja učinkovitost koja iznosi 87.225 %. U proračunu će se ušteda energije izraziti na godišnjoj razini. Motor s kojim će

zamijenjen stari motor je isto asinkroni motor iste nazivne snage, ali zadovoljava trenutno najstrože IE4 standarde. Pretpostavit ćemo da je njegova nazivna učinkovitost 90 % što je ujedno i minimalna učinkovitost koju mora imati asinkroni motor sa 2 pola da bi zadovoljio IE4 standard učinkovitosti. Također, ćemo pretpostaviti da je to njegova i srednja učinkovitost pošto nemamo nikakav konkretan motor za usporedbu pa ne znamo kolika mu je učinkovitost na 70 % nazivne snage. Zadnja pretpostavka je da i stari i novi motor na 70 % i na 100 % nazivne snage imaju, tj. daju, proizvode po 4 kW mehaničke snage što nema smisla i nije točno, tako da je ovo samo okviran primjer bez jalovih gubitaka.

Ovdje se računaju samo mehanički gubici, može se doći i do prividne snage pa i jalove snage tako da se mehanička snaga podijeli s faktorom snage, ali pošto smo uzeli da je mehanička snaga uvijek ista ne možemo izračunati točan iznos jalovih gubitaka zato što kao i mehanička snaga tako faktor snage opada sa smanjenjem opterećenja motora.

Proizvođač: Končar

Vrsta stroja: asinkroni motor

Nazivna snaga: 4 kW, 5.726 kVA

Nazivni napon: 380/660 V

Nazivna struja: 8.7/5 A

Faktor snage: 0.82

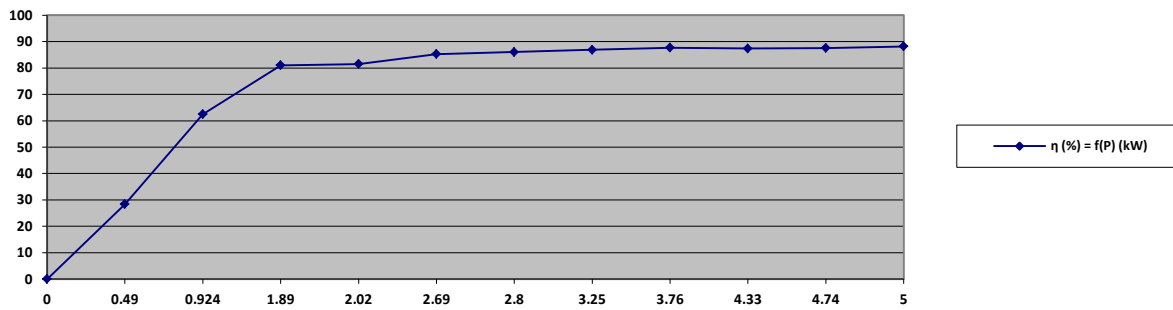
Frekvencija: 50 Hz

Brzina vrtnje: 1420 o/min

Vrijeme rada motora: 1700 sati/godišnje

Srednja učinkovitost starog motora: 87.225 % $(0.25 \cdot 86.1 + 0.75 \cdot 87.6)$

Srednja učinkovitost novog motora: 90 %



Graf 8.1 Graf ovisnosti učinkovitosti o opterećenju motora na temelju kojeg je rađen proračun

$$P_{stari\ motor} = \frac{\text{mehanička snaga}}{\text{srednja učinkovitost}} = \frac{4}{0.87225} = 4.585\ kW$$

Ovo je mehanička snaga na izlazu plus gubici trenja i ventilacije. Od toga 585 W su gubici trenja i ventilacije što je 14.6 % mehaničke snage koju daje motor na izlazu.

$$W_{stari\ motor} = P_{stari\ motor} * \text{vrijeme rada motora} = 4.585 * 1700 = 7794.5\ kWh$$

Godišnji iznos energije koju stari motor pretvori u rad (moment) i toplinu pomoću gubitaka trenja i ventilacije

$$P_{novi\ motor} = \frac{\text{mehanička snaga}}{\text{srednja učinkovitost}} = \frac{4}{0.9} = 4.444\ kW$$

Gubici trenja i ventilacije novog IE4 motora su 444 W što je 24.11 % manje nego kod starog IE2 motora

$$W_{novi\ motor} = P_{novi\ motor} * \text{vrijeme rada motora} = 4.444 * 1700 = 7554.8\ kWh$$

Godišnji iznos energije koju novi motor pretvori u rad (moment) i toplinu pomoću gubitaka trenja i ventilacije

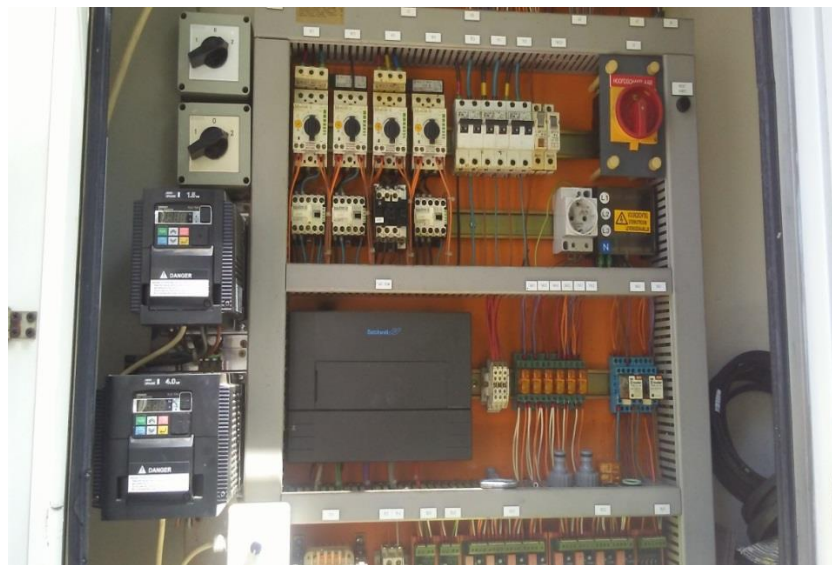
$$\Delta W = W_{stari\ motor} - W_{novi\ motor} = 7794.5 - 7554.8 = 239.7\ kWh$$

Godišnja ušteda energije zamjenom starog motora novim iste nazivne snage je 3.07 % ako se u obzir uzmu samo gubici trenja i ventilacije.

Pod pretpostavkom da je motor spojen na dvotarifno brojilo, godišnja novčana ušteda kreće se od 201.60 kn do 98.40 kn ovisno koliki je dio vremena motor radio na nižoj noćnoj tarifi i cijeni po kojoj opskrbljivač prodaje električnu energiju. Za računanje novčane uštede u obzir se uzimala cijena energije, prijenosa i distribucije.

Tablica 8.1 cijena kWh električne energije na noćnoj i dnevnoj tarifi

	Energija	Prijenos	Distribucija
Cijena dnevne tarife (kn/kWh)	0.49	0.11	0.24
Cijena noćne tarife (kn/kWh)	0.24	0.05	0.12



Slika 8.3 Razvodna kutija s frekvencijskim pretvaračima za upravljanje motorima od 4 i 1.6 kW

ZAKLJUČAK

S obzirom na cijenu električne energije i cijenu elektromotora ulaganje u moderniji i učinkovitiji elektromotor je isplativ jedino ako elektromotor radi veći dio godine i trošak električne energije predstavlja značajne troškove poslovanja. Jedna od glavnih osobina elektromotora je velika učinkovitost u usporedbi s ostalim motorima i ta se učinkovitost nije značajno povećala već više od 10 godina zbog samog dizajna motora koji se nije značajno mijenjao, već su se materijali poboljšavali i preciznost proizvodnje povećala. To je uzrokovalo povećanje učinkovitosti elektromotora od 5 do 10 % ovisno o tipu i snazi motora u usporedbi sa elektromotorima iz prošlog tisućljeća. Veliku ulogu u povećanju učinkovitosti elektromotora ima i Europska Unija koja je uvođenjem standarada minimalne energetske učinkovitosti prisilila proizvođače da ulažu u proizvodni proces i materijale od kojih proizvode motore. Napredak u pogledu energetske učinkovitosti je ključan za stabilnost opskrbe električnom energijom iz razloga što je sve više motornih potrošača električne energije koji koriste elektromotore za pogon od automobila i kamiona pa do romobila i dronova sa elektromotorom. Svijet se sve više okreće električnoj energiji kao "gorivo" za prijevoz na kopnu, na moru i u zraku još nema pouzdane alternative fosilnom gorivu, ovakav prijelaz se već dogodio kod načina kuhanja hrane prelaskom s plinskih štednjaka na indukcijske. Trenutno je na snazi IE4 standard minimalne energetske učinkovitosti te je u pripremi IE5 standard koji bi trebao zahtijevati 20 % manje gubitke nego kod IE4 motora iste snage, neki proizvođači kao Lafert Group u ponudi već imaju IE5 standard sinkrone motore s pernametnim magnetom. Na temelju ovog završnog rada možemo zaključiti da su elektromotri danas ekološki i financijski najbolji za pogonske strojeve u postrojenjima zbog visoke učinkovitosti pri većim opterećenjima te zbog toga što ne proizvode ispušne plinove pri radu. Zahtijevaju relativno malo održavanja te su laki za upravljanje. Napredak u učinkovitost elektromotora je vidljiv, ali i motori prošlih standarada energetske učinkovitosti kao IE2 motori još uvijek imaju dovoljno veliku učinkovitost da ih se financijski isplati koristiti u državama gdje su oni dopušteni. Najveći problem elektromotora u području automobila je i dalje baterija koja bi omogućila veliki domet, dobru pouzdanost i cijenu prihvatljivu većini stanovništva. Baterije sa vremenom gube kapacitet, relativno su teške te predstavljaju veliku opasnost za putnike ako se zapale jer se teško gase.

LITERATURA

- [1] Međunarodna energetska agencija www.iea.org (datum pristupa: 18.6.2019.)
- [2] A. Sumper i A. Baggini, Electrical Energy Efficiency: Technologies and Applications, Wiley, Chichester, 2012.
- [3] M. Krarti, Energy-Efficient Electrical Systems for Buildings, CRC Press, Boca Raton, 2017.
- [3] Engineering toolbox www.engineeringtoolbox.com/nema-a-b-c-d-design-d_650.html(datum pristupa: 23.6.2019.)
- [4] Electrical 4 u <https://www.electrical4u.com/construction-of-dc-motor-yoke-poles-armature-field-winding-commutator-brushes-of-dc-motor/>(datum pristupa: 23.6.2019.)
- [5] Industrial electronics https://www.industrial-electronics.com/emct_2e_2n-s.html(datum pristupa: 23.6.2019.)
- [6] Pumps and systems <https://www.pumpsandsystems.com/motors/july-2016-how-synchronous-condensers-affect-power-factor>(datum pristupa: 23.6.2019.)
- [7] Semantic scholar <https://www.semanticscholar.org/paper/Potential-for-Torque-Density-Maximization-TbyNishimuraNakamura/5d73b510984491a5d7cf90a97af07b82a639b85a> (datum pristupa: 23.6.2019.)
- [8] Automation technologies online <https://www.ato.com/three-phase-induction-motor-construction>(datum pristupa: 23.6.2019.)
- [9] ISC companies <https://isccompanies.com/parts-distribution/motors/ac-motors/>(datum pristupa: 23.6.2019.)
- [10] I. Mandić, V. Tomljenović i M. Pužar, Sinkroni i Asinkroni Električni Strojevi, Tehničko veleučilište u Zagrebu, Zagreb, 2012.
- [11] R. Wolf, Osnove električnih strojeva, Školska knjiga, Zagreb, 1991.
- [12] Sinkroni strojevi,
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=2ahUKEwjL496JvEbiAhWw_CoKHQRWCoMQFjABegQIBBAC&url=http%3A%2F%2Fss-ios-pu.skole.hr%2Fupload%2Fss-ios-pu%2Fimages%2Fstatic3%2F883%2Fattachment%2FKOLEKTORSKI_STROJEVI.doc&usg=AOvVaw0rfAVnZ500UTNb6AsW3KDJ (datum pristupa 13.6.2019.)

- [13] Riverglennapts <https://riverglennapts.com/>(datum pristupa: 23.6.2019.)
- [14] Global efficiency intelligence <https://www.globalefficiencyintel.com/>(datum pristupa: 23.6.2019.)
- [15] ABB <https://new.abb.com/motors-generators> (datum pristupa 2.9.2019.)

SAŽETAK

Svrha ovog rada bila je navesti podjelu i ukratko objasniti najznačajnije tipove elektromotora, zatim navesti i objasniti tipove gubitaka te napraviti jednostavan proračun na kojem možemo vidjeti kolika je ušteda električne energije, a time i novca pri zamjeni starog motora novim učinkovitijim. Ukratko su objašnjeni faktori učinkovitosti i materijali koji se koriste u proizvodnji elektromotora. Objasnjeni su principi rada istosmjerni, sinkroni i asinkroni motora te je predstavljena alternativa za asinkrone motore. Na kraju rada prije proračuna je opisana implementacija trenutno važećih standarada minimalne energetske učinkovitosti te dana tablica s minimalnim energetskim učinkovitostima asinkronih motora prema zadnjem IE4 standardu.

Ključne riječi: energetska učinkovitost, asinkroni motor, gubici, standardi, materijali, proračun, električna energija

Energy efficiency of electric motors

Abstract

The purpose of this paper was to list the division and briefly explain the most significant types of electric motors, then outline and explain the types of losses and make a simple calculation to see how much energy and therefore money is saved when replacing an old electric motor with a new one. Efficiency factors and materials used in the manufacture of electric motors are briefly explained. The operating principles of DC, synchronous and asynchronous motors are explained and an alternative to asynchronous motors is presented. At the end of the work, the implementation of the current minimum energy efficiency standards and the tables with the minimum energy efficiency of asynchronous motors according to the latest IE4 standard are described before the savings calculation.

Keywords: energy efficiency, induction motor, losses, standards, materials, calculation, electricity

ŽIVOTOPIS

Karlo Marković, rođen je 07. svibnja 1997. godine u Slavonskom Brodu. Živi u Sikirevcima gdje je završio Osnovnu školu Sikirevci i nakon toga se upisuje u Tehničku školu Slavonski Brod smjer mehatronika. Nakon položene mature upisuje preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku.

Potpis: Karlo Marković