

**Dr. sc. Dubravko Vučetić**

Pomorski fakultet u Rijeci

Studentska 2

51000 Rijeka

Hrvatska

**Damir Turković**

3. MAJ Brodogradilište d.d.

Liburnijska 3

51000 Rijeka

Hrvatska

**Pregledni članak**

UDK: 629.5.03

621.313.13

Primljeno: 5. travnja 2009.

Prihvaćeno: 29. travnja 2009.

## USPOREDBA BRODSKIH PORIVNIH ELEKTROMOTORA

*U radu su definirani i objašnjeni utjecajni čimbenici za evaluaciju brodskih porivnih elektromotora kao što su: stupanj korisnosti, duljina, promjer, težina, faktor snage, cijena, pouzdanost, tolerantnost na kvarove, obim i jednostavnost održavanja, kompatibilnost s pretvaračima frekvencije, otpornost na klimatske uvjete, koroziju, vibracije i udarce. Na toj osnovi su analizirane prednosti i nedostaci asinkronih i sinkronih motora u komercijalnoj primjeni. Od sinkronih motora uzeti su u obzir klasični sa četkicama, beskontaktni s uzбудnim namotima i najmoderniji s permanentnim magnetima. Motori su analizirani iz aspekta primjene u podtrupnim porivnicima, odnosno fiksne ugradnje u trup broda. Zaključeno je da su za ugradnju u podtrupne porivnike najbolji sinkroni motori s permanentnim magnetima, ali da kod manjih snaga, uglavnom zbog znatno niže cijene, može biti isplativa i primjena asinkronih kaveznih motora. Među elektromotorima za ugradnju u trup broda, su za vrlo velike snage trenutačno još uvijek najpovoljniji klasični sinkroni motori s uzбудnim namotima i četkicama, a za manje snage asinkroni kavezni motori u kombinaciji s reduktorom.*

***Gljučne riječi:*** električna propulzija, brod, asinkroni, sinkroni, motor

### 1. UVOD

Suvremeni sustavi električne propulzije, eksploatacijski gledano, nesumnjivo su, mnogo kvalitetnije rješenje od dizel-mehaničke propulzije. Provedene usporedne analize pokazuju superiornost električne propulzije u iskorištenju broskog prostora, stupnju raspoloživosti, utjecaju na okoliš, manevarskim

svojstvima kod svih brzina i vrsta manevara kao i potrošnji goriva kod svih eksploatacijskih profila plovila [15, str. 129].

Izuzev magneto-hidrodinamičke propulzije, koja možda nikada neće postati ekonomski konkurentnom, svi se ostali sustavi električnog poriva broda zasnivaju na propulzijskim elektromotorima.

Pored asinkronih i klasične inačice sinkronih motora prisutnih od samih početaka njenog komercijalnog razvoja, za električnu propulziju se danas ravnopravno koriste beskontaktni sinkroni motori s uzбудnikom i sinkroni motori s permanentnim magnetima. Opravdano je stoga postaviti pitanje: Koji je od navedenih elektromotora najbolji izbor i zašto se još uvijek, ponekad i kod sasvim sličnih brodova i eksploatacijskih profila, koriste sve tri navedene vrste motora? Svrha je ovog rada da definira utjecajne faktore za vrednovanje propulzijskih elektromotora i po mogućnosti dade odgovor na navedeno pitanje. Pri tome je svakako potrebno posebno istražiti i primjenu propulzijskih elektromotora u podtrupnim porivnicima koji, zbog specifičnih uvjeta, pred njih postavljaju posebne zahtjeve i drukčije prioritete.

Iako na mnogim plovnim objektima besprijekorno rade već desetljećima [4, str. 15], istosmjerni propulzijski motori ipak su zbog veće cijene, opsega i složenosti održavanja, komplicirane konstrukcije, iskrenja, manje pouzdanosti i otpornosti na vibracije i udarce, nižeg stupnja korisnosti i ograničene granične snage praktično nestali u novogradnji, pa ovdje neće biti posebno razmatrani, baš kao niti najnovije vrste propulzijskih elektromotora trenutačno još uvijek u fazi ispitivanja ili eksperimentalnog pogona: sinkronih motora sa supravodljivim uzбудnim namotima [8, str. 2], sinkronih motora sa supravodljivim armaturnim namotima i permanentnim magnetima na rotoru, mnogofaznih asinkronih motora [6, str. 5], motora s permanentnim magnetima i aksijalnim magnetskim poljem, motora s permanentnim magnetima i transverzalnim magnetskim poljem [16, str. 43-60], istosmjernih kolektorskih motora s permanentnim magnetima na statoru [11, str. 4-7], istosmjernih kolektorskih motora bez utora [14, str. 2-1] elektronički komutiranih istosmjernih motora [10, str. 2].

## **2. UTJECAJNI FAKTORI ZA VREDNOVANJE PROPULZIJSKIH ELEKTROMOTORA**

Karakteristika momenta određena parametrima broskog vijka i eksploatacijski radni ciklus postavljaju pred propulzijski elektromotorni pogon osnovne zahtjeve vezane za broj okretaja, moment, sposobnost regulacije brzine i povremeni četverokvadratni intermitirani pogon.

Pored navedenih osnovnih zahtjeva, propulzijski elektromotori moraju ispuniti i niz drugih tehničko-ekonomskih i sigurnosnih uvjeta koji proizlaze iz specifičnosti eksploatacije broda:

- rad u ekstremnim klimatskim uvjetima
- rad pri propisanim nagibima
- otpornost na vibracije i udarce
- otpornost na koroziju
- visoki stupanj korisnosti
- male dimenzije, a posebno promjer motora
- mala težina
- visoka pouzdanost
- tolerantnost na kvarove
- mali obim i jednostavnost održavanja
- mogućnost rada s jednostavnijim pretvaračima frekvencije
- visoki faktor snage
- povoljna cijena.

Dok su prve četiri točke definirane propisima, ostale mogu biti predmetom vrednovanja i optimizacije. Iako je stupanj korisnosti propulzijskih elektromotora i reduktora u odnosu na brodski vijak i pogonske strojeve nedostižno visok [15, str. 131] zbog izuzetno velikih snaga propulzijskih sustava i vrlo male razlike mogu donijeti velike uštede na troškovima goriva. Kod brodova koji značajan dio vremena provode u plovidbi smanjenom brzinom, potrebno je uzeti u obzir da stupanj korisnosti elektromotora ovisi o broju okretaja i opterećenju [2, str. 1-8].

Među najznačajnijim čimbenicima pri vrednovanju propulzijskih elektromotora, kao uostalom i većine brodske opreme, s obzirom da direktno smanjuju kapacitet broda, njihovi su masa i dimenzije. Još je značajnije da dijаметar ugrađenih propulzijskih elektromotora u korelaciji s kutom nagiba osovine određuje poziciju ugradnje, a time i veličinu teretnog prostora ispred motora na najnižim palubama [15, str. 135]. Male dimenzije motora još su važnije u slučaju podtrupnih porivnika jer omjer promjera propelera i motora izravno utječe na stupanj korisnosti poriva broda [15, str. 134].

Treba naglasiti da se promjer elektromotora, općenito može smanjiti i povećanjem duljine, ali uz istovremeno povećanje mase. Kada odnos duljine i promjera pređe određenu granicu javljaju se problemi s odvođenjem topline i stoga nužnost ugradnje složenijih sustava hlađenja [3, str. 8]. Veća specifična snaga motora može se postići povećanjem gustoće struje u vodičima uz primjenu dirigitiranog hlađenja, što međutim za sobom povlači porast gubitaka, a time i sniženje stupnja korisnosti motora. Ipak, ako je manji promjer motora uspješno iskorišten za postizanje veće hidrodinamičke efikasnosti, ukupni stupanj korisnosti propulzije će se u pravilu povećati.

Eksploatacija broda je vrlo dinamičan tehnološki proces kojem zastoji jako ugrožavaju ekonomsku efikasnost. U tehnološkom lancu je najkritičniji upravo sustav propulzije, čije otkazivanje može ozbiljno ugroziti ne samo financijske rezultate već i sigurnost broda. Brod je u eksploataciji, a pogotovo tijekom plovidbe, autonoman sustav koji nema logističko okruženje poput kopnenih sustava. Propulzijski elektromotori su glomazni, pa je njihova manipulacija i doprema dugotrajna što jako produljuje trajanje zastoja. Iz navedenih razloga je izuzetno važno da propulzijski elektromotori imaju visoku pouzdanost i stupanj tolerancije na kvarove kako bi se maksimalno smanjila vjerojatnost djelomičnog ili potpunog gubitka pogona. Kod ugrađenih velikih motora jako je važna i mogućnost popravka na licu mjesta.

Preventivno održavanje mora biti što jednostavnije, primjereno stručnosti posade, i ni u kom slučaju ne smije remetiti tehnološki proces, što znači da je po obimu provedivo tijekom boravka u luci, ili da ne zahtijeva zaustavljanje pogona. Izostanak preventivnog održavanja ne bi smio biti direktan uzrok kvara propulzijskog elektromotora.

Fokusiranje istraživanja samo na pronalaženje najboljeg motora može dovesti do pogrešnih zaključaka ako izabрани motor zahtijeva vrlo skupi, kompliciran, glomazan ili čak neizvediv pretvarač frekvencije. Neke vrste motora bolje podnose napajanje s nesinusoidalnim naponom od drugih, što znači da će uz manje vibracije i gubitke raditi i s jeftinijim pretvaračima frekvencije, koji imaju veliko harmoničko izobličenje izlaznog napona odnosno struje. Zbog toga je potrebno analizirati i kako se pojedine vrste elektromotora ponašaju kada se napajaju iz nesinusoidalnih izvora, odnosno različitih pretvarača frekvencije. Niži faktor snage motora osim što povećava gubitke u motoru povećava i potrebnu snagu pretvarača frekvencije i njegove gubitke. Dobar propulzijski motor stoga mora imati što viši faktor snage.

Razumljivo je da uz sve navedene osobine propulzijski elektromotori moraju biti i što je moguće jeftiniji, kako bi se smanjili ukupni troškovi ugradnje sustava električne propulzije.

### 3. ASINKRONI KAVEZNI MOTORI

Asinkroni kavezni motori neupitno su najrašireniji motori u brodskim i kopnenim elektromotornim pogonima. U sustavima električne propulzije asinkroni motori se koriste od samih početaka pa je tako i prvi brod s električnim prijenosom snage na brodski vijak „Jupiter“ izgrađen 1913. imao dva propulzijska asinkrona motora napajana iz turbogeneratora koji su direktno pogonili brodske vijke [13, str. 176]. Danas se propulzijski asinkroni kavezni motori koriste u više varijanti:

- za pogon broskog vijka s prekretnim krilima konstantnom brzinom

- za pogon brodskog vijka s fiksnim krilima promjenljivom brzinom
- ugrađeni u podtrupne porivnike.

Asinkroni kavezni motori posebno su često korišteni u sustavima propulzije s prekretnim brodskim vijcima jer se usprkos velikoj struji pokretanja ipak, u odnosu na druge vrste nereguliranih elektromotora, relativno jednostavno upućuju, direktno, klasičnim metodama smanjenja napona ili tiristorskim uputnikom. Kako brodski vijak s prekretnim krilima u neutralnom položaju u blizini nazivnih okretaja motora uzima najviše 20% nazivne snage, a tijekom zaleta naravno mnogo manje, gubitak momenta zbog sniženog napona motora kod upućivanja ne predstavlja problem. Često se koristi više manjih motora koji preko zajedničkog reduktora pogone jedan brodski vijak. Na tehnološkim plovnim objektima s dinamičkim pozicioniranjem asinkroni kavezni motori su predstavljali pouzdanu alternativu prevladavajućim istosmjernim motorima s regulacijom broja okretaja i vijkom s fiksnim krilima. Razvojem statičkih pretvarača frekvencije, asinkroni motori su dobili karakteristike upravljanja prije svojstvene samo istosmjernim motorima što je omogućilo njihovu primjenu i u reguliranim elektromotornim pogonima. Kako je zbog velike potrošnje goriva kod malih brzina i razvoja statičkih pretvarača frekvencije koncepcija elektromotornog pogona brodskog vijka s prekretnim krilima i konstantnim brojem okretaja uglavnom napuštena, propulzijski asinkroni kavezni motori se danas na novogradnjama susreću uglavnom u sklopu frekventno- reguliranih pogona propelera s fiksnim krilima.

Propulzijski asinkroni motori su najekonomičniji kod većih nominalnih brzina ( $n_s = 900 \div 1800 \text{ min}^{-1}$ ) i snaga do 8 MW [4, str. 16], [13, str. 211], ali se grade i motori za direktan pogon vijka koji imaju nisku nazivnu brzinu i veći broj polova. Tako na primjer Schottel u suradnji sa SAM Electronics-om ugrađuje u SEP seriju podtrupnih porivnika niskonaponske asinkrone kavezne motore snage od 1 do 3 MW i visokonaponske snage od 3,5 do 5,5 MW. Broj okretaja se kreće od 170 do 305 min<sup>-1</sup>.

Prednosti asinkronih kaveznih motora proizlaze iz jednostavne i robusne konstrukcije rotora. To su:

- jednostavno održavanje
- niska cijena
- dobra mogućnost preopterećenja
- robusnost i pouzdanost
- male dimenzije i težina
- jednostavnije upravljanje.

Proizvodnja asinkronih motora je zbog jednostavne izvedbe rotora i odsutva dodatnih namotaja i uređaja (npr. prigušni kavez, uzбудnik i klizni koluti kod sinkronih motora), te korištenja standardnih materijala (bakar, dinamo-

limovi, čelik, izolacija) relativno jeftina. U potpuno zatvorenoj izvedbi, primjerice unutar podtrupnog porivnika, asinkroni motor ne zahtijeva nikakvo održavanje. Zbog kompaktne izvedbe izvlačenje rotora je jednostavnije i manje rizično nego kod drugih vrsta motora. Robusni dobro učvršćeni namotaji uz visok prekretni moment omogućuju veća kratkotrajna preopterećenja od sinkronih motora. Asinkroni motori su izuzetno pouzdani, a najčešći kvarovi su vezani uz ležajeve. Kvalitetno napravljeni asinkroni propulzijski motori mogu bez održavanja i zastoja odraditi ekonomski vijek broda.

Asinkroni motori mogu se izraditi s relativno malim promjerom i težinom pa predstavljaju vrlo kvalitetno rješenje za električnu propulziju, posebice u kombinaciji s reduktorom, kada rade na višim okretajima, što je sve češće rješenje na npr. tankerima za prijevoz kemikalija.

Asinkroni se motor razlikuje od istosmjernih i sinkronih po tome što nema klasične uzbude pa je jako izražen problem gubitka magnetskog protjecanja u zračnom rasporu, iz čega proizlaze i njegovi nedostaci: manji zračni raspor i niži faktor snage, a često i niži stupanj korisnosti.

Smanjenje zračnog raspora osnovni je problem konstruktora asinkronih motora, posebno kada su u pitanju velike snage i male brzine. Iako jednostavna i kompaktna izvedba rotora uz suvremenu tehnologiju izrade dozvoljava maksimalno smanjenje zračnog raspora, uvijek ostaje problem zračnosti ležaja. Usporedbe radi, na velikim asinkronim propulzijskim motorima (20 MW, 180 min<sup>-1</sup>) uspjelo se smanjiti zračni raspor na 5 mm [3, str. 12-8], dok klasični sinkroni propulzijski motori s uzbudnim namotima iste nazivne snage i brzine imaju zračni raspor od 8 do 12 mm. Usprkos čvršćoj i kompaktnijoj konstrukciji, asinkroni motori su zbog malog zračnog raspora osjetljiviji na mehaničke udarce i vibracije, bilo da su uzrokovane vanjskim izvorom (brodski vijak, pogonski strojevi, teško more, premještanje tereta, sudar, nasukavanje) ili radom propulzijskih pretvarača frekvencije. Također, tako mali zračni raspor zahtijeva vrlo preciznu izradu, montažu i ugradnju motora. Već i malo povećanje zračnog raspora jako ublažava sve navedene probleme, ali nažalost istovremeno primjetno kvari faktor snage i stupanj korisnosti. Asinkroni motori velikih snaga mogu dakle usprkos svemu imati vrlo visoku korisnost (97,5%) i faktor snage (0,87).

Kako su propulzijski elektromotori napajani iz statičkih pretvarača frekvencije, moguće je traženu brzinu dobiti različitim kombinacijama nazivne frekvencije i broja pari polova. Manje dimenzije i težina postižu se za istu brzinu odabirom većeg broja polova i naravno proporcionalno većom frekvencijom, ali se tako pogoršava faktor snage, a time, zbog veće struje, i stupanj korisnosti [3, str. 12-8].

Ne tako davno je frekventno upravljanje velikim propulzijskim asinkronim motorima bilo moguće samo putem ciklokonvertera čija niska izlazna frekvencija nije uvijek pogodovala primjeni asinkronih motora za direktni pogon

brodskog vijka. Današnji širinsko-impulsno modulirani (ŠIM) pretvarači velikih snaga mogu odgovarajućom frekvencijom napajati asinkrone motore s optimalnim brojem polova što ih sada čini konkurentnijima. Prema rezultatima prikazanim na slikama 1-3. asinkroni motori bi se i u području najvećih snaga i direktnog pogona brodskog vijka mogli pokazati kao kvalitetnije rješenje od danas prevladavajućih sinkronih motora s uzbudnim namotima, što znači da ih se pri optimizaciji sustava propulzije nikako ne smije zanemariti. Nasuprot tome, ugrađeni asinkroni motori u varijanti s reduktorom odavno se smatraju povoljnijim rješenjem od sinkronih [1, str. 211].

#### 4. SINKRONI MOTORI S UZBUDNIM NAMOTIMA

Sinkroni motori također se tradicionalno koriste u električnoj propulziji još od njenih početaka, kada se broj okretaja regulirao promjenom brzine pogonskih strojeva, uglavnom parnih turbina. Njihova dominacija započela je međutim pojavom tiristorskih pretvarača frekvencije koji su na zadovoljavajući način riješili regulaciju brzine i problem pokretanja. Pogodovala im je niska izlazna frekvencija ciklokonvertera i mogućnost korištenja sinkrokonvertera koji su dugo vremena bili jedini dovoljno snažni pretvarači frekvencije za električnu propulziju. Sinkroni strojevi desetljećima dominiraju na području električnih propulzija najvećih snaga koje za pogon brodskih vijaka velikih promjera zahtijevaju mali broj okretaja. Donja ekonomična granica nazivne brzine velikih sinkronih motora je oko  $80 \text{ min}^{-1}$ , bez ograničenja po snazi [4, str. 16] što u potpunosti zadovoljava potrebe električne propulzije i najvećih brodova. Zahvaljujući uzbudnim namotima sinkroni motori mogu imati veliki zračni raspor, pa njihova izrada i ugradnja zahtijevaju manju preciznost, a uz to su jako otporni na mehaničke udarce i vibracije. Uzbuda omogućuje i rad s visokim faktorom snage koji se po želji može mijenjati. U rješenju s ciklokonverterom sinkroni motor može raditi s  $\cos \varphi = 1$  i tako ostvariti vrlo visok stupanj korisnosti, dok uz sinkrokonverter radi u kapacitivnom području s  $\cos \varphi \approx 0,9$  kako bi omogućio mrežnu komutaciju tiristora motorskog mosta, pa mu je i stupanj korisnosti niži. Iako motori s permanentnim magnetima imaju veći stupanj korisnosti (Slika 1.) riječ je o relativno maloj razlici koja ne može uvijek biti presudna pri izboru. Stupanj korisnosti od približno 97,5% kod najvećih motora, se u svakom slučaju treba smatrati vrlo visokim. Usprkos velikom broju dijelova i kompliciranijoj konstrukciji, cijena sinkronih motora nije previsoka jer se za razliku od motora s permanentnim magnetima koriste samo standardni jeftini materijali. Tome svakako doprinosi i velika raširenost sinkronih strojeva (posebno generatora) te prema tome i uhodana proizvodnja s osiguranim tržištem. Prednosti sinkronih motora s klasičnom uzбудom su dakle:

- kompatibilnost s ciklokonverterom i sinkrokonverterom
- veliki zračni raspor
- vrlo velike snage
- visok faktor snage
- visok stupanj korisnosti
- niska cijena.
- Postoji međutim i nekoliko značajnih nedostataka:
  - velika masa
  - veliki promjer i dimenzije
  - složenije održavanje
  - manja pouzdanost.

Zbog glomaznijeg rotora s uzbuđnim namotajima i pripadajućeg sustava napajanja uzbude klasični sinkroni motori su primjetno većeg promjera i mase od asinkronih motora i posebno motora s permanentnim magnetima [16, str. 56]. Manja pouzdanost i obimnije održavanje također su posljedica relativno kompliciranog uzbuđnog kruga koji obuhvaća veći broj dijelova i kontakata.

Danas postoje dvije izvedbe napajanja uzbude sinkronih motora i obje se koriste kod propulzijskih motora: bezkontaktna s uzbuđnikom i kontaktna preko kliznih koluta i četkica. Beskontaktna varijanta je povoljnija glede održavanja jer nema ugljene prašine, trošenja kliznih koluta ni kontrole sile pritiska odnosno ispravnosti četkica i kliznih površina. Treba ipak imati na umu da je riječ o strojevima koji se vrte malom brzinom tako da nema brzog trošenja četkica, velikog iskrenja ni prašine. S druge strane, uzbuđnik (rotacijski transformator) povećava duljinu motora i mogućnost kvara te smanjuje pouzdanost. Dok su u slučaju kontaktne uzbude, uzbuđni ispravljači duplirani, odnosno postoji određena redundancija, kod beskontaktno uzbude se uzbuđnik ne može jednostavno duplirati, pa je i glede raspoloživost bolja kontaktna inačica s kliznim kolutima i četkicama.

Danas se, posebno u sklopu podtrupnih porivnika, polako napuštaju klasični sinkroni motori s uzbuđnim namotima, a zamjenjuju ih sinkroni motori s permanentnim magnetima koji su detaljnije obrađeni u sljedećem poglavlju.

## 5. SINKRONI MOTORI S PERMANENTNIM MAGNETIMA

Potaknuti natječajima i sredstvima ministarstava obrane više zemalja pokrenuti su prije desetak godina nezavisni programi razvoja propulzijskih elektromotora s permanentnim magnetima namijenjenih pogonu ratnih brodova [5, str. 50]. Kao rezultat tih istraživanja najprije Siemens, a zatim i ABB započeli su prije desetak godina komercijalnu proizvodnju sinkronih motora s per-



manentnim magnetima velikih snaga koji se vrlo uspješno ugrađuju u sada već standardne zakretne podtrupne porivnike [7, str. 25].

Ovi motori imaju na rotoru permanentne magnete koji stvaraju radijalno magnetsko polje [16, str. 50]. Razlikuju se od konvencionalnih sinkronih strojeva po tome što nemaju uzбудnih namota pa tako ni potrebe dovodenja električne energije na rotor. Osim uzbudnih namota nestali su tako i uzbudni ispravljači, četkice i klizni koluti, odnosno rotacijski transformatori i tiristor-skih regulatori napona, što sve značajno pojednostavljuje konstrukciju, upravljanje i održavanje, te povećava raspoloživost. Kako na rotoru nemaju namota, a magnetski tok permanentnih magneta je vremenski nepromjenljiv, gubici u rotoru su praktično zanemarivi. Statorski paket je također relativno jednostavan i izrađen na način da osigurava dobar prijenos topline na kućište. Zbog toga se sinkroni motori s permanentnim magnetima bez većih problema s hlađenjem izrađuju i u potpuno zatvorenoj izvedbi, što je posebno pogodno za podtrupne porivnike koji se hlade vodom preko kućišta. Tome pogoduje i izuzetno visok stupanj korisnosti, odnosno manje topline koju treba odvesti. Jednostavnost konstrukcije osigurava dobru otpornost na vibracije i mehaničke udare usprkos relativno malom zračnom rasporu. Najveća prednost sinkronih motora s permanentnim magnetima su međutim mala težina i promjer, po čemu su najbolji među propulzijskim motorima što se danas mogu naći na tržištu (Slika 1.).

Osnovni nedostatak im je vrlo visoka cijena. Iako pokretanje proizvodnje sinkronih motora s permanentnim magnetima i radijalnim magnetskim tokom, zbog sličnosti s konvencionalnim elektromotorima, zahtijeva mnogo manja dodatna ulaganja u postojeće proizvodne kapacitete u odnosu na ostale vrste motora s permanentnim magnetima, njihovo projektiranje i proizvodnja nipošto nisu ni jednostavni ni jeftini. Krug proizvođača, tehnološki dovoljno razvijenih za proizvodnju ovih elektromotora je vrlo uzak, pa je visoka cijena posljedica izvjesne ekskluzivnosti, ali i korištenja vrlo skupih NdFeB permanentnih magneta. Ovi uvjerljivo najkvalitetniji magneti nalaze se na tržištu od početka 90-tih godina prošlog stoljeća. Istjecanjem patentnih prava ili otkrićem novog kvalitetnijeg materijala cijena će se zasigurno višestruko smanjiti, kao što je to bio slučaj i s ostalim, prije otkrivenim, materijalima za izradu permanentnih magneta.

Osim visoke cijene NdFeB magneti imaju još dva nedostatka: jako su osjetljivi na koroziju i teško se obrađuju. Umjesto NdFeB mogli bi se koristiti i znatno jeftiniji feritni permanentni magneti, ali bi se u tom slučaju izgubile osnovne prednosti motora: njegove male dimenzije i težina [14, str. 2-5].

Permanentni magneti su osjetljivi i na povišenu temperaturu koja im privremeno smanjuje remanentni magnetizam i koercitivnu silu. Ukoliko se pređe maksimalna dozvoljena temperatura (150 °C za NdFeB) magnetski se materijal nepovratno uništava [12, str. 22], pa motori moraju biti projektirani tako da imaju male gubitke i dobro hlađenje. Zbog izuzetno snažnih magnetskih

sila demontaža motora s permanentnim magnetima je u pogonskim uvjetima neizvediva.

Fiksna uzbuda u slučaju propulzijskih motora ima i jedan manje uočljiv nedostatak. U slučaju kratkog spoja među statorskim namotajima, nakon trenutnog gašenja propulzijskih pretvarača motor se, tjeran inercijom i brodskim vijkom, i dalje okreće te prelazi u generatorski rad u kojem energijom napaja mjesto kvara. U takvom scenariju dolazi do proširenja kvara i mnogo većih oštećenja nego kod klasičnih sinkronih strojeva kojima se uzbuda može isključiti. Ipak, ako je motor izveden kao dvonamotni, postoji mogućnost kočenja ispravne polovice motora do zaustavljanja i zatim blokiranje osovine postojećom mehaničkom kočnicom, što bi trebalo biti izvedeno kao zaštitna funkcija, dakle s automatskim djelovanjem.

## 6. USPOREDNA ANALIZA PROPULZIJSKIH ELEKTROMOTORA

Propulzijski motori se mogu vrednovati na osnovi čimbenika razmatranih u poglavlju 2. U tablici 1. prikazana je poredbena lista sporohodnih propulzijskih motora velikih snaga po najznačajnijim čimbenicima vrednovanja.

*Tablica 1. Poredbena lista propulzijskih elektromotora u komercijalnoj primjeni (veći broj=bolje osobine)*

*Table 1. Comparison of commercially available propulsion electric motors (higher number = better characteristics)*

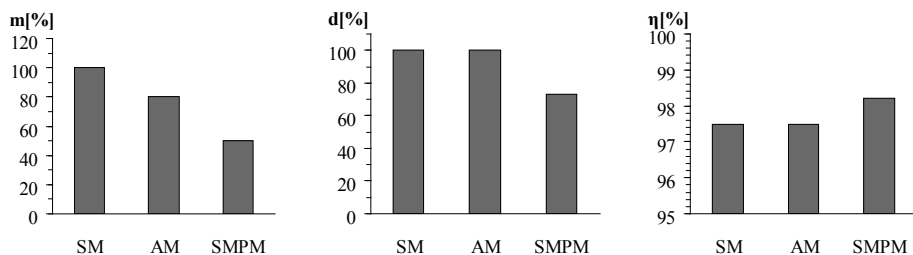
	Istosmjerni kolektorski motori	Asinkroni kavezni motori	Sinkroni motori s uzbudnim namotima	Sinkroni m. s permanentnim magnetima
Masa	1	3	2	4
Promjer motora	1	3	2	4
Stupanj korisnosti	1	2	3	4
Robusnost	1	2	4	3
Održavanje	1	4	2	3
Raspoloživost	1	4	2	3
Cijena / tehnološki uvjeti proizvodnje	2	4	3	1

Već se i letimičnim pregledom uočava potpuna inferiornost istosmjernih motora po gotovo svim čimbenicima, što je i razlog zašto se, usprkos mnogo jeftinijim i manjim pripadajućim pretvaračima (tiristorski ispravljači), ne ugrađuju u nove sustave električne propulzije.

Uz kraću analizu može se zaključiti da su sinkroni motori s permanentnim magnetima, eksploatacijski gledano, trenutno najkvalitetnije rješenje. Uvjerljivo su najmanje mase i promjera te najvišeg stupnja korisnosti. U kategorijama održavanja i raspoloživosti iako uz bok asinkronih motora stavljeni su na drugo mjesto zbog izuzetno problematične demontaže rotora, koju uz pažljivo održavanje sustava ventilacije i podmazivanja u eksploatacijskom vijeku broda ne bi niti trebalo izvoditi. Robusnost motora s permanentnim magnetima je uz bok robusnosti asinkronih motora. Jedina kategorija u kojoj su sinkroni motori s permanentnim magnetima u inferiornom položaju u odnosu na sve ostale propulzijske motore je njihova cijena. Visoka cijena je posljedica primjene novih tehnologija kako pri izradi snažnih i postojanih permanentnih magneta tako i pri konstrukciji i proizvodnji samih motora.

Usporedba asinkronih kaveznih i sinkronih motora s uzbudnim namotima je nešto kompliciranija. Asinkroni motor zbog svoje jednostavnosti i kompaktnosti nesumnjivo ima veću raspoloživost i zahtijeva neusporedivo manji obim održavanja što ga čini pogodnim i za primjenu u podtrupnim porivnicima manjih snaga bez mogućnosti inspekcije. Sinkroni motori s uzbudnim namotima nemaju problema s magnetiziranjem pa imaju znatno veće zračne raspore između rotora i statora, a time i veću otpornost na mehaničke udarce i vibracije. Kada rade s jediničnim faktorom snage sinkroni motori mogu imati i nešto veći stupanj korisnosti.

Dijagrami na slikama 1-3. izrađeni su na osnovi podataka iz literature o propulzijskim elektromotorima snage 20 MW kod  $180 \text{ min}^{-1}$  [5, str. 50], [9, str. 5], [11, str. 4-2], [10, str. 7-7]. Na njima su uspoređene izvedbe s klasičnim sinkronim motorom s uzbudnim namotima (SM), sinkronim motorom s permanentnim magnetima (SMPM) i asinkronim kaveznim motorom (AM).



a)

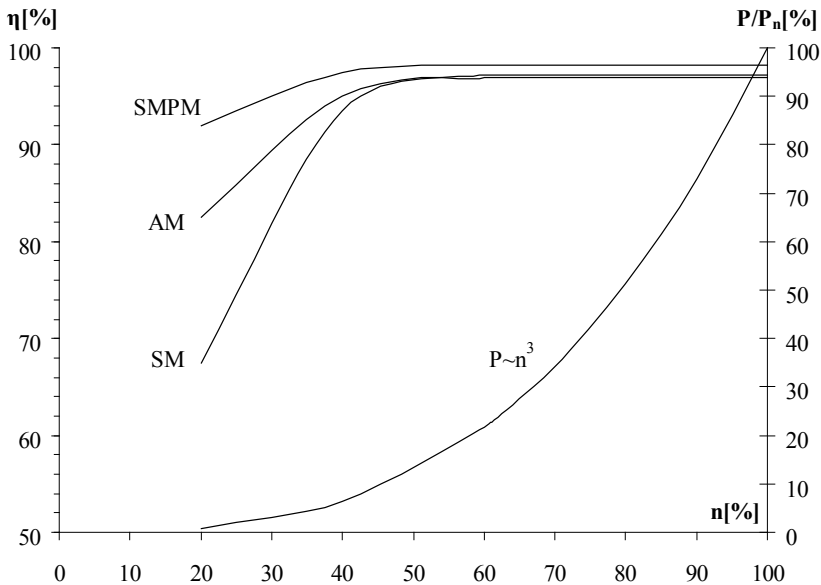
b)

c)

**Slika 1.** Usporedba: a) mase, b) promjera i c) stupnja korisnosti kod punog opterećenja sinkronih motora s uzbudnim namotajem (SM), asinkronih kaveznih motora (AM) i sinkronih motora s permanentnim magnetima (SMPM)

**Figure 1.** Comparison of a) weight, b) diameter and c) efficiency under full load of wound rotor synchronous motors (SM), squirrel cage induction machines (AM) and permanent magnet synchronous motors (SMPM)

Iz slike 1. je vidljivo da, glede mase, promjera i stupnja korisnosti, uvjerljivo najbolje rezultate postižu sinkroni motori s permanentnim magnetima (SMPM). Kada su u pitanju promjer i stupanj korisnosti, klasični sinkroni motor s uzбудnim namotajima (SM) se gotovo ne razlikuje od asinkronog motora (AM), ali ga značajno veća masa ipak stavlja u podređeni položaj.

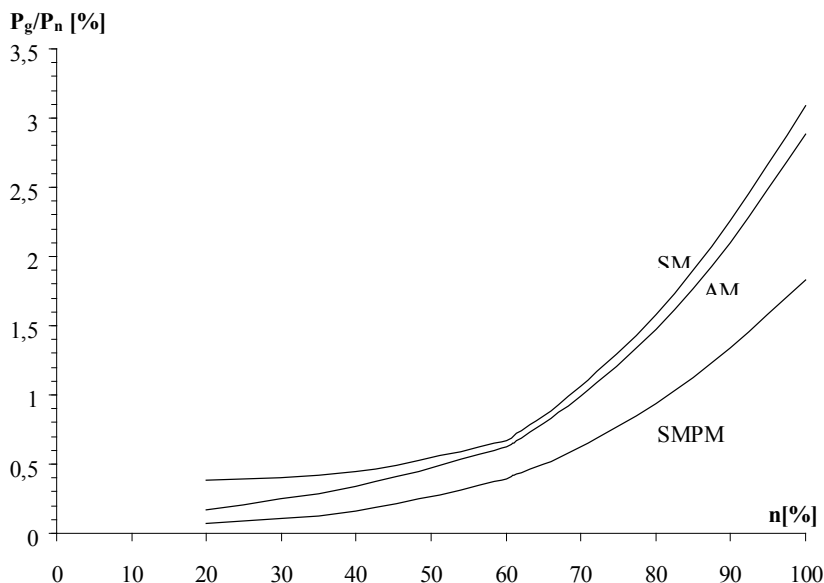


**Slika 2.** Usporedba stupnja korisnosti kao funkcije brzine sinkronog motora s bakrenim uzбудnim namotima (SM), sinkronog motora s permanentnim magnetima (SMPM) i asinkronog kaveznog motora (AM) snage 20 MW pri  $180 \text{ min}^{-1}$  uz kubnu ovisnost snage  $P$  o brzini

**Figure 2.** Comparison of the efficiency of wound rotor synchronous motors (SM), permanent magnet synchronous motors (SMPM) and squirrel cage induction machines (AM). All motors have rated power of 20MW at 180 rpm. It is presumed that power is proportional to the cube of rpm.

Na slici 2. je prikazana ovisnost stupnja korisnosti o broju okretaja, odnosno opterećenju sinkronih i asinkronih propulzijskih elektromotora [9, str. 4]. Interesantan je veliki pad korisnosti sinkronih motora s uzбудnim namotima kod malih brzina, koji međutim ne treba previše zabrinjavati jer je kod malih okretaja predana snaga vrlo mala pa niski stupanj korisnosti, srećom, ne prate i veliki gubici. Kako bi se bolje shvatio stvarni učinak manjeg stupnja korisnosti na niskim okretajima nacrtan je na osnovi dijagrama sa slike 2., uvažavajući kubnu ovisnost snage o brzini, dijagram na slici 3. koji prikazuje ovisnost gubi-

taka u motoru, izraženih u postotku nazivne snage, o brzini vrtnje. Iz dijagrama se jasno vidi da su gubici kod malih brzina relativno mali i da razlike među motorima uglavnom nisu velike.



*Slika 3. Usporedba apsolutnih gubitaka kao funkcije brzine sinkronog motora s bakrenim uzбудnim namotima (SM), sinkronog motora s permanentnim magnetima (SMPM) i asinkronog kaveznog motora (AM) snage 20 MW pri 180 min<sup>-1</sup> uz kubnu ovisnost snage o brzini*

**Figure 3.** Comparison of absolute power losses of wound rotor synchronous motors (SM), permanent magnet synchronous motors (SMPM) and squirrel cage induction machines (AM). All motors have rated power of 20MW at 180 rpm. It is presumed that power is proportional to the cube of rpm.

Treba napomenuti da je netom izložena usporedba propulzijskih elektromotora napravljena na osnovi podataka o pojedinačnim izvedbama za samo jednu nazivnu snagu i broj okretaja. Ne smije se zaboraviti da se promjer uvijek može smanjiti na račun povećanja duljine i mase uz adekvatnu promjenu stupnja korisnosti. Analizirane karakteristike motora jako ovise o nazivnom naponu, a kod izmjeničnih motora i nazivnoj frekvenciji, koje ovdje nisu analizirane. Na manjim snagama koje su i interesantnije za trgovačke brodove odnosi među motorima se mogu djelomično promijeniti. Izbor motora nezamisliv je bez istovremenog izbora statičkog pretvarača i eventualno reduktora, a optimizacija je moguća jedino za cijeli elektroenergetski sustav u cjelini.

## 7. ZAKLJUČAK

Na osnovi svega iznesenog može se zaključiti da su, eksploatacijski gledano, najpovoljnije rješenje za električnu propulziju podtrupni porivnici, a u njima nisu poželjni motori koji nakon ugradnje moraju ostati dostupni za održavanje (zbog npr. sustava hlađenja ili uzbude), jer to povećava njihove dimenzije, i tako smanjuje hidrodinamičku efikasnost. Za podtrupne porivnike su dakle najbolje rješenje sinkroni motori s permanentnim magnetima. Kod podtrupnih porivnika manjih snaga, isključivo zbog mnogo niže cijene, konkurentni su i asinkroni kavezni motori.

Klasična izvedba električne propulzije kod koje su propulzijski elektromotori ugrađeni u trup broda je u osnovi zastarjela, ali je uglavnom zbog niže cijene na nekim brodovima još uvijek sveukupno povoljnija od podtrupnih porivnika. Ne treba zaboraviti niti njenu veću robusnost koja nesumnjivo privlači konzervativnije brodare. Ugrađeni motori s direktnim pogonom brodskog vijka mogu biti interesantni kod malih brodova koji po duljini nemaju dovoljno prostora za smještaj reduktora, a zbog visoke cijene se ne isplati primjena podtrupnih porivnika. Zavisno od veličine broda i broja okretaja brodskog vijka u tim su slučajevima najpovoljnije rješenje asinkroni za manja, odnosno sinkroni motori s uzбудnim namotima za veća plovila.

Na investiciji i težini se najviše šteti korištenjem brzih motora u kombinaciji s reduktorom. Kako u tom slučaju promjer motora više nije najkritičniji parametar, na izbor između asinkronih i sinkronih motora s uzбудom ili permanentnim magnetima najviše utječe odnos njihovih cijena, odnosno da li ušteda na težini i volumenu kao i bolji stupanj korisnosti kod motora s permanentnim magnetima, opravdavaju znatno veću investiciju. Trenutačno su na tom polju brzi asinkroni kavezni motori u izvjesnoj prednosti.

## LITERATURA

- [1] Borman, J. B., Electrical propulsion, The Motor Ship, 20<sup>th</sup> Annual Marine Propulsion Conference, March 25-26, 1998., London, 209-221.
- [2] Burt, C. M., et al., Electric motor efficiency under variable frequencies and loads, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 134.2 (2008), 129-136.
- [3] Chippington G. R., et al., Electric propulsion in large warships, Conference on Electric Propulsion -The Effective Solution, IMarE, London, 5-6 October 1995. Conference Proceedings, Part 1, Paper 12, 1-14.
- [4] Clark, D., Propulsion system evaluation - Design Review, Vancouver, DC Maritime Technologies Inc., 2001.
- [5] Hodge, C. G., D. J. Mattik, The electric warship VI, Trans IMarE, Vol 113, Part 2, 49-63.
- [6] Hodge C. G., S. Williamson, S. Smith, Marine propulsion direct drive multi phase induction motors, Proceedings of IMarEST , Part B - Journal of Marine Design and Operations, June 2004, 5, 33-36.

- [7] Ikaheimo, J., Permanent magnet motors eliminate gearboxes, *ABB Review*, 2002, 4, 22-25.
- [8] Kalsi S. S., Development status of superconducting rotating machines, *IEEE Power Engineering Society (PES) Winter Meeting, New York, 27-31 January 2002*, 401-403.
- [9] Karon S.C., Optimal electric ship propulsion solution, *Maritime Reporter and Engineering News*, September, 2002.
- [10] Letellier P., Electrical propulsion motors, *Conference on Electric Propulsion -The Effective Solution, IMarE, London, 5-6 October 1995, Conference Proceedings, Part 1, Paper 7, 7-1 to 7-8.*
- [11] Mitcham, A. J., J. A. Cullen, Motors and drives for surface ship propulsion, comparison of technologies, *Conference on Electric Propulsion - The Effective Solution, IMarE, London, 5-6 October 1995, Conference Proceedings, Part 1, Paper 4, 4-1 to 4-10.*
- [12] Parker, R. J., Permanent magnet guidelines, *Magnetic Materials Producers Association, Chicago, 1998.*
- [13] Skalicki, B., J. Grilec, *Brodski električni uređaji*, Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2000.
- [14] Spooner, E., DC Motors for high power propulsion drives, *Conference on Electric Propulsion -The Effective Solution, IMarE, London, 5-6 October 1995. Conference Proceedings, Part 1, Paper 2, 2-1 to 2-7.*
- [15] Vučetić, D., I. Čekada, *Eksploatacijske prednosti električne propulzije*, *Pomorstvo*, 20 (2006), str. 129-145.
- [16] Vučetić, D., I. Vlahinić, *Perspektiva razvoja elektromotora s permanentnim magnetima u sustavu električne propulzije broda*, *Pomorstvo*, 17 (2003), str. 43-60.

## Summary

### SHIP ELECTRIC PROPULSION MOTORS COMPARISON

*This article aims at defining and explaining relevant factors important for the evaluation of electric propulsion motors such as efficiency, length, diameter, weight, power factor, price, reliability, fault tolerance, maintenance, compatibility with frequency converters, as well as weather, corrosion, vibration and shock resistance. On the basis of these facts, the advantages and disadvantages of the commercially used squirrel cage induction machines and synchronous machines are analyzed.*

*Among the synchronous machines, standard motors with field coils - brushless and with slip rings - as well as the radial flux permanent magnet motors are taken into consideration. The motors are compared from both the point of podded drive and the shaft line propulsion. The conclusion is that for podded drives, permanent magnet synchronous motors are the best option, although the use of the squirrel cage induction machines, mainly because of their much lower prices, might be profitable for smaller units. In the case of direct shaft line electric propulsion with very high propulsion power and low turns, synchronous motors with field coils and slip rings are still the best choice, while for geared shaft line propulsion with lower propulsion power squirrel cage induction machines could be recommended.*

**Key words:** *electric propulsion, ship, induction, synchronous, motor*

**Dr. sc. Dubravko Vučetić**  
Pomorski fakultet u Rijeci  
Studentska 2  
51000 Rijeka  
Croatia

**Damir Turković**  
3. MAJ Brodogradilište d.d.  
Liburnijska 3  
51000 Rijeka  
Croatia