

Mr.sc. Dubravko Vučetić  
Dr.sc. Ivan Vlahinić  
Pomorski fakultet u Rijeci  
Studentska 2, Rijeka

Pregledni članak  
UDK: 629.5.03  
621.313.8

## PERSPEKTIVA RAZVOJA ELEKTROMOTORA S PERMANENTNIM MAGNETIMA U SUSTAVU ELEKTRIČNE PROPULZIJE BRODA

*U radu se najprije obrađuju kritični parametri značajni za vrednovanje permanentnih magneta za propulzijske elektromotore. Prikazan je princip rada i osnovne karakteristike motora s radijalnim, aksijalnim i transverzalnim magnetskim tokom. Vrednovanje motora obavljeno je s eksploatacijskog stajališta u sklopu vijčanog sustava i utjecaja na ukupno povećanje stupnja iskorištenja poriva broda. Zahvaljujući malom promjeru motora s permanentnim magnetima moguće je ostvariti veći sveukupni faktor korisnosti nego kod broda s direktnim dizelskim porivom. Motor s transverzalnim tokom najperspektivnije je rješenje na dulje vrijeme.*

*Ključne riječi: permanentni magneti, motor, brod, električna propulzija*

### 1. UVOD

Od početka komercijalne primjene prije 90 godina ("Jupiter" 1913.), električna propulzija prateći tehnološki napredak, prije svega na polju elektrotehnike, uz stanovite uspone i padove ipak polako preuzima sve veći udio u svjetskoj pomorskoj floti. Brodovi s električnom propulzijom uvijek su, a posebno u razdobljima nagloga tehnološkog razvoja, značili velik tehnički izazov za brodogradilišta, ali i brodovlasnike. Nesporne tehničke prednosti električne propulzije samo su kod plovniha objekata specijalne namjene prevagnule nad ekonomskim nedostacima. Širenje područja primjene desetljećima su ograničavala dva osnovna nedostatka: veće investicijsko ulaganje i niži stupanj korisnosti.

Intenzivan razvoj energetske elektronike i informatičkih tehnologija intenzivirao je istraživanja vezana za električni pogon broda i stvorio uvjete za njegovu širu primjenu. Pojava snažnih sofisticiranih pretvarača frekvencije pogodnih za pokretanje i regulaciju broja okretaja propulzijskih elektromotora, omogućila je objedinjavanje brodskog elektroenergetskog sustava (Integrated Full Electric Propulsion -IFEP)[12, str. 14, 5, str. 127], smanjenje emisije štetnih tvari u

atmosferu, smanjenje investicijskog ulaganja i povećanje stupnja korisnosti. Zadnjih se desetljeća zbog toga neprestano povećava broj tipova brodova kod kojih je električna propulzija postala prvi, a često i jedini ekonomsko opravdani izbor. Za ostale brodove, prije svega one koji imaju razmjerno malu potrošnju električne energije i ne zahtijevaju posebne manevarske sposobnosti, električna je propulzija još uvijek samo veće investicijsko ulaganje i niži stupanj korisnosti, te je kao takva ekonomski neprihvatljiva. Ipak, najnoviji tehnološki napredak, ovaj put na području propulzijskih elektromotora, mogao bi ponovno proširiti područje primjene električne propulzije.

Prije više godina pokrenuti su i financirani sredstvima ministarstava obrane više zemalja nezavisni programi razvoja propulzijskih elektromotora s permanentnim magnetima, namijenjenih pogonu ratnih brodova [8, str. 50]. Iako se mnogobrojne izvedbe motora s permanentnim magnetima malih snaga već dugi niz godina uspješno koriste u elektromotornim pogonima za najširu upotrebu, donedavno, osim za eksperimentalne svrhe u okviru spomenutih istraživanja, nisu izgrađivane jedinice velike snage. Zadnjih godina više je vodećih proizvođača električne opreme započelo komercijalnu proizvodnju sinkronih motora s permanentnim magnetima velikih snaga koji se uglavnom ugrađuju u zakretne ili fiksne podtrupne porivnike (AZIPOD, POD)[9, str. 25, 22, str. 1-9].

Budući da je riječ o primjeni nove tehnologije, potrebno je analizirati kakav će biti njezin utjecaj na razvoj sustava električne propulzije.

## 2. UTJECAJ SVOJSTAVA PERMANENTNIH MAGNETA

Razvoj motora s permanentnim magnetima potpuno je ovisan o tehnološkom razvoju materijala za izradu permanentnih magneta. Danas na tržištu egzistira više magnetskih materijala koji se značajno razlikuju po cijeni i karakteristikama. Postojeći materijali neprestano se usavršavaju, a novi istražuju. Da bi se mogla razumjeti dinamika napretka, potrebno je najprije utvrditi kriterije za vrednovanje uporabne vrijednosti magnetskih materijala.

Kritični čimbenici pri izboru permanentnih magneta za propulzijske elektromotore jesu:

- karakteristika magnetiziranja
- stabilnost materijala
- cijena
- mehanička svojstva
- gubici u promjenljivoj magnetskom toku.

### Karakteristika magnetiziranja

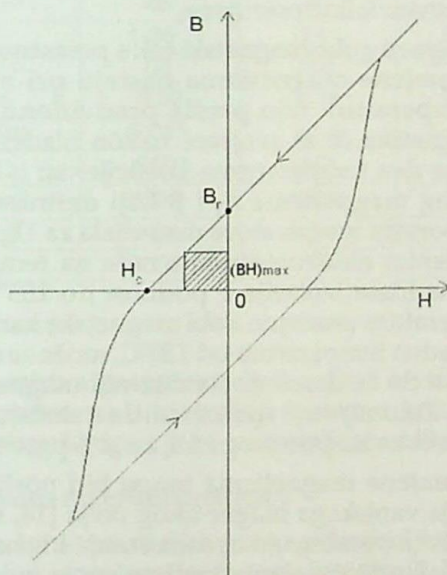
Pri sintezi novih materijala za permanentne magnete teži se dobivanju karakteristike magnetiziranja  $B(H)$  koja će imati:

- što veći remanentni magnetizam  $B_r$
- što veću koercitivnu silu  $H_c$
- što veću maksimalnu specifičnu energiju magnetskog polja odnosno umnožak  $(BH)_{max}$ .

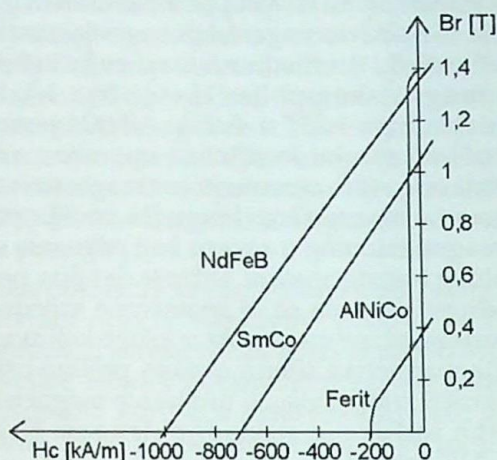
Magnetiziranje materijala za izradu permanentnih magneta razlikuje se od krivulje magnetiziranja mekih feromagnetskih materijala prije svega po velikom remanentnom magnetizmu  $B_r$ , tj. vrijednosti magnetske indukcije kada materijal nije pod utjecajem magnetskog polja ( $H=0$ ) (slika 1.). Visoka vrijednost remanentnog magnetizma, npr. 1,35T u slučaju AlNiCo permanentnih magneta (slika 2.), ne znači nužno i visoku kvalitetu i uporabnu vrijednost magneta. Vrijednost indukcije koja odgovara remanentnom magnetizmu  $B_r$  može se, naime, postići samo u zatvorenome magnetskom krugu [14, str. 8], npr. magnetom oblika zatvorenog prstena, magnetiziranog u smjeru koji odgovara smjeru magnetskih silnica u jezgri toroidalnog transformatora. Očito je da takav permanentni magnet nema uporabne vrijednosti tako da se ni spomenuta vrijednost indukcije neće postići u praktično upotrebljivome magnetskom krugu koji mora sadržavati zračni raspor. Na žalost, kada magnetske silnice dijelom prolaze izvan permanentnog magneta, a posebno kroza zrak, javlja se unutarne magnetsko polje koje slabi vrijednost magnetske indukcije sukladno drugom kvadrantu krivulje magnetiziranja (slika 2.) [1, str. 3].

Koercitivna sila  $H_c$  je vrijednost jakosti magnetskog polja potrebne za demagnetiziranje magneta odnosno spuštanje indukcije na  $B=0$ T. Što je veća koercitivna sila, to će biti manji pad indukcije u otvorenome magnetskom krugu permanentnog magneta. To je posebno važno kada je isti izložen i djelovanju vanjskoga magnetskog polja kao što je reakcija armature kod električnih rotacijskih strojeva.

Umnožak  $(BH)_{max}$  maksimalna je moguća energija koja se može pohraniti po jedinici volumena permanentnog magneta. Grafički,  $(BH)_{max}$  odgovara površini najvećeg pravokutnika što se može ucrtati ispod krivulje magnetiziranja u njezinu drugom kvadrantu (slika 1.).



Slika 1. Krivulja magnetiziranja permanentnog magneta



Slika 2. Usporedba karakteristika permanentnih magneta

### Stabilnost materijala

Pod stabilnošću permanentnog magneta razumijeva se njegova sposobnost da zadrži magnetski tok nepromijenjen u vrlo dugom vremenskom razdoblju. Promjene u magnetskim svojstvima permanentnih magneta mogu se podijeliti u tri grupe:

- reverzibilne promjene magnetizma
- ireverzibilne promjene magnetizma
- strukturalne ireverzibilne promjene.

Permanentni magneti gube magnetski tok s porastom temperature [20, str. 1-6]. Reverzibilne promjene magnetizma nastaju pri manjim promjenama temperature. Ako temperatura nije prešla predviđenu maksimalnu radnu temperaturu  $T_{max}$ , magnetska će se svojstva nakon hlađenja vratiti na početne vrijednosti. Razlikuju se dva temperaturna koeficijenta:  $\alpha$  koji definira postotak promjene remanentnog magnetizma  $B_r$  i  $\beta$  koji definira postotak promjene koercitivne sile  $H_c$  pri porastu temperature materijala za 1K. Uzme li se u obzir da namoti u zraku hlađenim elektromotorima rade na temperaturama višim od 100°C (najviše korištena klasa izolacije F podnosi do 155°C), gubitak  $B_r$  i  $H_c$  u odnosu na sobnu temperaturu značajno slabi magnetske karakteristike materijala. Pretpostavi li se, npr., radna temperatura od 120°C, može se s pomoću podataka iz tablice 1. lako izračunati da će danas najkvalitetniji magnetski materijal NdFeB izgubiti 12%  $B_r$  i 60%  $H_c$ . Zanimljivo je spomenuti da u slučaju ferita koercitivna sila raste s temperaturom pa će za isti primjer pad  $B_r$  za 18% pratiti rast  $H_c$  za 40%.

Ireverzibilne promjene magnetizma mogu biti posljedica veće promjene temperature i/ili utjecaja vanjskoga magnetskog polja [14, str. 23]. Kod motora s permanentnim magnetima posebno su opasna stanja bliskoga kratkog spoja [18, str. 6], a među njima najkritičnije stanje kratkog spoja jednog od poluvodičkih ventila pretvarača frekvencije [19, str. 5]. Za razliku od reverzibilnih promjena, nakon uklanjanja spomenutih vanjskih utjecaja magnetska svojstva se više ne

vraćaju spontano na početne vrijednosti. Zagrijavanjem magneta na Curievu temperaturu, magnet se potpuno demagnetizira. Ipak, budući da u slučaju ireverzibilnih promjena magnetizma ne dolazi do promjena u strukturi materijala, početna svojstva mogu se potpuno obnoviti ponovnim magnetiziranjem s pomoću vanjskog polja [14, str. 22].

Strukturalne ireverzibilne promjene nepovratno uništavaju magnetski materijal, a nastaju kao posljedica korozije najčešće u kombinaciji s visokom temperaturom [14, str. 22]. Ta vrsta promjena ovisna je o trajanju izloženosti štetnim utjecajima pa se u literaturi često naziva i starenjem magneta.

## Cijena

Cijena permanentnih magneta kreće se u granicama od 2 do 200 US\$ po kilogramu. Prirodno je da materijali s višom cijenom imaju i bolje karakteristike jer se inače ne bi zadržali na tržištu. Općenita ekonomska usporedba različitih materijala nije lak zadatak jer će optimalni izbor ovisiti o konkretnoj primjeni. Kada je prioritet minijaturizacija magnetskog kruga, koristit će se materijali s najvećim  $(BH)_{max}$  bez obzira na cijenu. Kada veličina magneta nije značajna, koriste se feriti koji su najjeftiniji. Ipak u velikoj većini slučajeva treba uzeti u obzir svih pet navedenih kriterija i pronaći optimum. U tablici 1. prikazani su i orijentacijski podatci o cijeni 1kJ energije pri  $(BH)_{max}$  za četiri osnovne vrste permanentnih magneta, što prema mišljenju autora realnije prikazuje odnose među cijenama nego uobičajene usporedbe cijena 1kg i 1kJ/m<sup>3</sup>.

Tablica 1. Usporedni prikaz karakteristika magnetskih materijala

		AlNiCo	Feriti	SmCo	NdFeB
$(BH)_{max}$	kJ/m <sup>3</sup>	40	30	180	380
$B_r$	T	1,35	0,4	1,05	1,35
$H_c$	A/m	60	200	700	1000
$\alpha$	T/K	- 0,02	- 0,18	- 0,035	- 0,12
$\beta$	A/Km	- 0,015	+ 0,4	- 0,3	- 0,6
$T_{max}$	°C	550	450	350	150
$\gamma$	kg/m <sup>3</sup>	7300	4900	8400	7400
cijena	\$/kg	44	4,40	220	110
cijena	\$/kJ	8000	700	10300	2200

## Mehanička svojstva

Najbolja magnetska svojstva imaju materijali na bazi neodima i samarija (NdFeB i SmCo). Na žalost, upravo su ti materijali iznimno kruti, što ograničava način konstrukcije magnetskog kruga i jako poskupljuje oblikovanje i ugradnju.

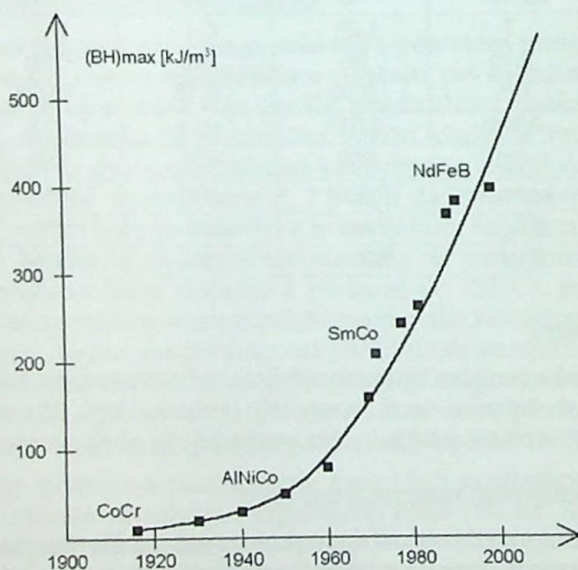
## Gubitci u promjenljivom magnetskom toku

Ako se permanentni magnet izloži djelovanju promjenljivoga magnetskog toka, u njemu će se inducirati napon i potjerati vrtložne struje. Stoga je za primjenu u elektromotorima iznimno važno da permanentni magneti imaju što manju električnu vodljivost. Veliki gubitci vrtložnih struja izravno zagrijavaju magnet,

čime slabe njegova magnetska svojstva, zahtijevaju potrebu aktivnog hlađenja te smanjuju pouzdanost i faktor korisnosti. Alternativna, laminirana, izvedba s izolacijom između dijelova magneta smanjuje aktivni volumen permanentnog magneta, a zbog kompliciranosti postupka izrade i lošijih mehaničkih svojstava materijala to je znatno skuplje rješenje.

### Perspektiva tehnološkog razvoja permanentnih magneta

Za predviđanje daljnjeg razvoja permanentnih magneta, a time i razvoja propulzijskih elektromotora temeljenih na njima, potrebno je analizirati dosadašnji razvoj. Iako su se pomaci u specifičnoj maksimalnoj energiji magnetskog polja  $(BH)_{\max}$ , koja se može donekle smatrati najzornijim pokazateljem razvoja materijala za permanentne magnete, povijesno gledano, odvijali skokovito, vezano za otkrića pojedinih novih materijala, ipak se može definirati brzina tehnološkog razvoja. Interpolacijom krivulje između točaka određenim godinama otkrića i specifične maksimalne energije magnetskog polja  $(BH)_{\max}$  pojedinih materijala [23, str. 3], može se analizirati dosadašnja, a njezinom ekstrapolacijom i pokušati predvidjeti daljnja dinamika razvoja (slika 3.). Zadrži li se dosadašnji trend, uskoro bi se mogli pojaviti potpuno novi magnetski materijali iznimno visokih vrijednosti  $(BH)_{\max}$ . Treba ipak spomenuti da je zadnje povećanje  $(BH)_{\max}$  primjenom NdFeB imalo za posljedicu i pogoršanje mehaničkih svojstava te ozbiljno smanjenje radne temperature i otpornosti na koroziju, što potvrđuje ispravnost teze o nužnosti vrednovanja kvalitete permanentnih magneta kroz svih pet prethodno navedenih čimbenika.



Slika 3. Povijesni razvoj permanentnih magneta

### 3. IZVEDBE MOTORA S PERMANENTNIM MAGNETIMA

Iako je princip istosmjernog motora s permanentnim magnetima odavno poznat, tek je otkriće AlNiCo magneta omogućilo da 1932. u proizvodnju uđe prvi komercijalni istosmjerni stroj s permanentnim magnetima. Zbog još uvijek razmjerno slabih magnetskih karakteristika AlNiCo materijala i poslije otkrivenih ferita (vrlo niski  $(BH)_{max}$ ), motori s permanentnim magnetima desetljećima su se koristili samo na području vrlo malih i malih snaga. Otkrićem magneta zasnovanih na neodimu i samariju (NdFeB i SmCo) sedamdesetih godina prošlog stoljeća i razvojem energetske elektronike, otvoren je put za izgradnju velikih motora s permanentnim magnetima [4, str. 1]. Daljnjim usavršavanjem permanentnih magneta, uz postupan pad cijena magneta i pretvarača frekvencije, tek su zadnjih desetak godina stvoreni uvjeti za proizvodnju komercijalno konkurentnih velikih motora. Motori s permanentnim magnetima dijele se na istosmjerne i izmjenične.

#### Istosmjerni i izmjenični motori s permanentnim magnetima

Istosmjerni motori mogu biti uobičajeni, vrlo rašireni mali motori s permanentnim magnetima na statoru i armaturom, napajanom preko kolektora, na rotoru, ili elektronički komutirani istosmjerni motori s permanentnim magnetima na rotoru. Izmjenični motori s permanentnim magnetima spadaju u grupu sinkronih strojeva. Od klasičnih sinkronih strojeva razlikuju se po tome što na rotoru umjesto uzbuđenog namota imaju ugrađene permanentne magnete. Armatura se nalazi na statoru i napajana je iz pretvarača frekvencije s najčešće trofaznim sinusoidalnim naponom.

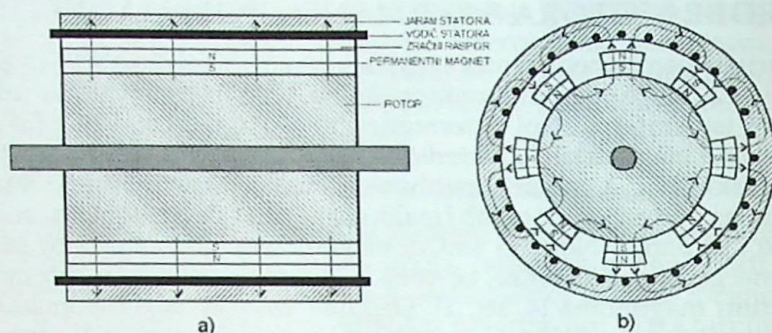
Budući da su po građi slični, teško je na prvi pogled uočiti razliku između sinkronih i elektronički komutiranih istosmjernih motora s permanentnim magnetima [4, str. 2]. Treba stoga istaknuti sljedeće razlike. Sinkroni motori napajaju se sinusoidalnom trofaznom strujom najčešće, ali ne nužno iz pretvarača frekvencije. Zbog faznog pomaka među strujama i prostornog pomaka među namotima statora nastaje okretno magnetsko polje. Rotor se zbog vlastitoga magnetskog polja vrti zajedno s okretnim magnetskim poljem statora, dakle sinkronom brzinom.

Elektronički komutirani istosmjerni motori dobivaju, isključivo iz statičkog pretvarača, višefaznu struju trapezna oblika, koja ne stvara klasično okretno magnetsko polje već motor radi poput istosmjernog stroja sa zamijenjenim ulogama statora i rotora i bez kolektora čiju je ulogu preuzeo elektronički pretvarač.

Prema smjeru silnica glavnoga magnetskog polja stvorenog u permanentnim magnetima, uvedena je podjela na motore s radijalnim, aksijalnim i transverzalnim magnetskim tokom.

#### Motori s radijalnim smjerom magnetskog polja

Velika većina današnjih električnih rotacijskih strojeva građena je s radijalnim smjerom glavnoga magnetskog polja. Stroj s permanentnim magnetima na rotoru i radijalnim magnetskim poljem (slika 4.) ne razlikuje se bitno od konvencionalnoga sinkronog motora. Jedina je razlika da nema uzbuđenih namota pa tako ni potrebe za prijenosom električne energije na rotor, što značajno pojednostavljuje konstrukciju i održavanje. Kako na rotoru nema namota, a magnetski tok mu je



Slika 4. Motor s radijalnim magnetskim poljem: a) uzdužni presjek, b) poprečni presjek

vremenski nepromjenljiv, gubitci u rotoru su praktično zanemarivi. Statorski paket također je razmjerno jednostavan i izrađen u obliku koji osigurava dobar prijenos topline na kućište. Zbog toga se motori s radijalnim tokom mogu bez većih problema s hlađenjem izrađivati i u potpuno zatvorenoj izvedbi [13, str. 69].

Zbog sličnosti s konvencionalnim elektromotorima, motori s permanentnim magnetima i radijalnim magnetskim poljem zahtijevaju razmjerno mala dodatna ulaganja u postojeće proizvodne kapacitete. Slična konstrukcija i odnos promjera i duljine omogućuju jednostavniju zamjenu u već izvedenim elektromotornim pogonima.

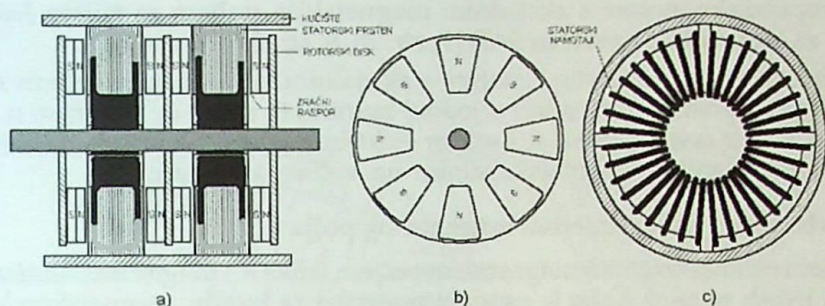
Propulzijske motore s radijalnim magnetskim poljem za komercijalnu primjenu danas izrađuje više proizvođača. *Jeumont Industrie* razvija elektronički komutirani istosmjerni motor s radijalnim magnetskim poljem [10, str. 2].

Cilj je svih konstruktora elektromotora postići što veću specifičnu snagu motora za zadani stupanj korisnosti i broj okretaja. Time se, s jedne strane, smanjuju troškovi materijala, a s druge stvara konkurentniji motor manjih dimenzija koji će lakše zadovoljiti potrebe pogona, posebno kada je riječ o skučenim prostorima poput brodskih.

Kod velikih motora s malom nazivnom brzinom, izvedba s radijalnim magnetskim poljem ostavlja u sredini rotora mnogo neiskorištenog prostora (slika 4.). Smanjenjem nazivne brzine povećava se broj polova i smanjuje polni korak. Rezultat je smanjeni magnetski tok po polu i prema tome mogućnost sužavanja jarna statora i rotora [17, str. 3]. Prostor između jarna rotora i osovine ostaje većim dijelom neiskorišten. Ideja za motor s aksijalnim magnetskim poljem vjerojatno je proizišla upravo iz nastojanja da se maksimalno iskoristi cijeli volumen motora.

### Motori s aksijalnim smjerom magnetskog polja

Motor s aksijalnim magnetskim poljem radi na istom principu kao i motor s radijalnim magnetskim poljem. Rotor mu je u obliku jednog ili više diskova s permanentnim magnetima između kojih se nalaze prsteni statora (slika 5.). Motori s aksijalnim magnetskim tokom uistinu imaju veću specifičnu snagu (snagu po jedinici mase)[4, str. 8], ali i niz nedostataka.



Slika 5. Motor s aksijalnim magnetskim poljem: a) uzdužni presjek motora, b) rotorski disk, c) statorski prsten

Riječ je o potpuno novoj koncepciji koja zahtijeva drukčiji način proizvodnje gotovo svih dijelova motora.

Velik je problem ugradnja rotora i posebno ostvarivanje predviđenoga zračnog raspora [8, str. 50]. Dok motor s radijalnim magnetskim poljem ima samo jedan zračni raspor, motor s aksijalnim poljem ima dva zračna raspora po disku rotora pa je postizanje jednolike širine zračnog raspora i njegovo maksimalno suženje prilično složen zadatak. Motori s permanentnim magnetima nemaju mogućnosti kompenzacije povećanoga zračnog raspora jednostavnim povećanjem uzbudne struje već im snaga izravno ovisi o širini zračnog raspora.

Dok se kod motora s radijalnim magnetskim poljem može korištenjem željeznih polnih nastavaka razmjerno jednostavno dobiti sinusoidalni oblik inducirano napona [4, str. 9], kod motora s aksijalnim magnetskim poljem koriste se posebno oblikovani permanentni magneti, što dodatno poskupljuje izvedbu [15, str. 2].

Zbog radijalno položenih utora složenija je i izrada statorskog paketa limova. Izrada statorskog paketa bez utora bila bi mnogo jednostavnija, ali bi tada zračni raspor bio prevelik, pa se takvo rješenje može odmah odbaciti kod motora većih snaga.

Sporohodni motori sa samo jednim rotorskim diskom imali bi oblik diska i prema tome razmjerno velik promjer. Kod takvog motora odnos aktivnog i neaktivnog dijela statorskog namota bio bi otprilike 1:3, što je mnogo nepovoljnije nego u slučaju konvencionalnih motora. Primjenom većeg broja rotorskih diskova (slika 5.) postiže se odnos 1:1 i vanjski izgled istovjetan kao kod konvencionalnih elektromotora. Time se, na žalost, jako kompliciraju već prije navedeni problemi sa zračnim rasporom, montaža i održavanje motora.

Treba imati na umu i to da je moment koji stvara pojedini aktivni dio statorskog vodiča proporcionalan njegovoj udaljenosti od osi vrtnje, što znači da dijelovi vodiča bliže osovine stvaraju mnogo manji moment od onih udaljenijih. Drugim riječima, iako je kod motora s aksijalnim smjerom magnetskog polja iskorišten puni volumen, ipak povećanje specifične snage u odnosu na motor s radijalnim smjerom magnetskog polja nije proporcionalno povećanju aktivnog volumena već mnogo manje.

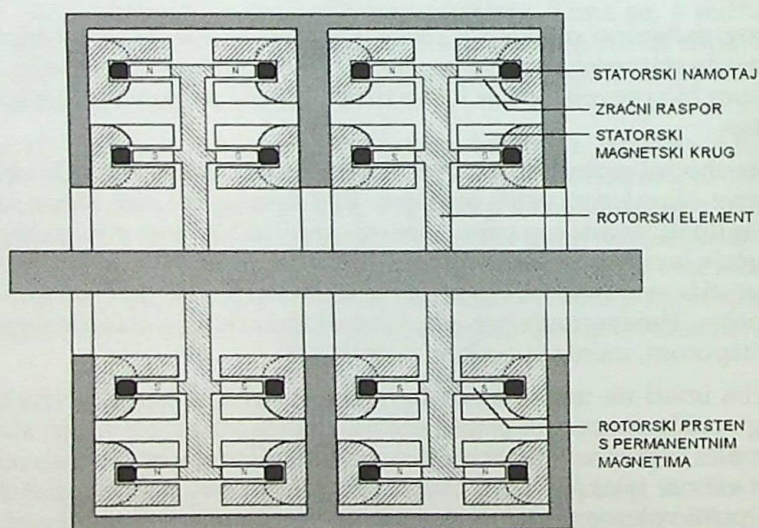
Propulzijske motore s aksijalnim magnetskim poljem razvijaju *Jeumont Industrie* za Francusku i *Kaman* za SAD [7, str. 28, 8, str. 50, 10, str. 4].

Kod motora s radijalnim i motora s aksijalnim magnetskim poljem svaka pojedinačna magnetska silnica leži u jednoj ravnini, tj. može se prikazati u dvije dimenzije. U istoj ravnini nalazi se i vektor elektromagnetske sile koja nastaje kao posljedica djelovanja te magnetske silnice na vodiče armature.

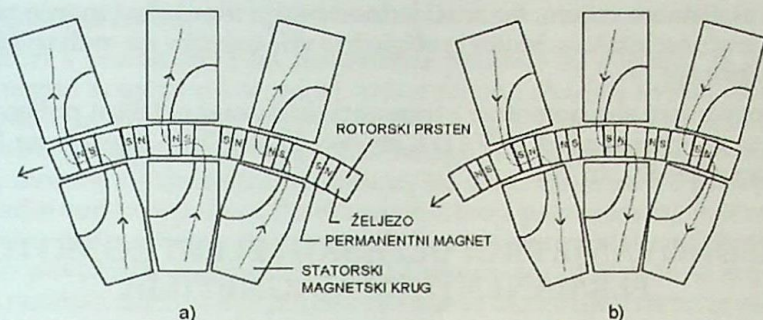
### Motori s transverzalnim smjerom magnetskog polja

Kod motora s transverzalnim magnetskim poljem (slika 6.) magnetska silnica više ne leži u jednoj ravnini. Kako je osnovni materijal za izradu magnetskog kruga električnih strojeva još uvijek transformatorski lim, trodimenzionalni oblik silnica stanovit je problem koji se odgovarajućim izborom konstrukcijskog rješenja ipak može kvalitetno riješiti.

Na slici 6. prikazana je jedna varijanta motora s transverzalnim magnetskim poljem [6, str. 120]. Postoje i druge prilično različite konstrukcijske izvedbe [16, str. 1, 11, str. 5], ali je princip stvaranja elektromagnetske sile uvijek isti. Za motore s transverzalnim magnetskim poljem karakteristično je da imaju vrlo malo rotorskih elemenata. Magnetski aktivni dio rotorskog elementa ima oblik prstena na kojemu su naizmjenično razmješteni sučelice orijentirani permanentni magneti odvojeni komadima željeza (slika 7.). Ti su prsteni na odgovarajući način mehanički spojeni na konstrukciju u obliku diska, koja stvorenu elektromagnetsku silu pretvara u moment i prenosi na osovinu. Kroz namote statora protječe višefazna izmjenična struja trapezna oblika i stvara odgovarajuće magnetsko polje. Polje se zatvara kroz velik broj magnetski i električki odvojenih statorskih magnetskih krugova izrađenih u obliku asimetrične potkovice i dijelom rotorskog prstena s permanentnim magnetima koji pripada tome statorskom



Slika 6. Motor s transverzalnim magnetskim poljem (uzduni presjek)



Slika 7. Princip rada motora s transverzalnim magnetskim poljem

namotu. Pod utjecajem statorskoga magnetskog polja rotorski se prsten postavlja u položaj najmanje potencijalne energije, odnosno u položaj u kojemu su silnica magnetskog polja najkraće (sl. 7a). Promjenom smjera struje kroz statorski namotaj mijenja se i ravnotežni položaj rotorskog prstena, što uzrokuje vrtnju rotora (sl. 7b). Da bi se moglo upravljati smjerom vrtnje, potrebne su barem dvije faze, a za što mirniji rad motora potrebno je koristiti što veći broj faza.

Motora s transverzalnim magnetskim poljem imaju najpovoljniji odnos između aktivnog i neaktivnog dijela namota. Taj odnos odgovara odnosu između širine "potkovic" i razmaka među njima. Ograničenje predstavljaju rasipni magnetski tokovi koji se naglo povećavaju kada se potkovice suviše približe jedna drugoj, što znači da je potrebno popuniti cijeli obroč namota, ali zadržati minimalni razmak između magnetskih krugova. Povoljan odnos aktivnog i neaktivnog dijela namota znači i iznimno male gubitke u bakru, a time i vrlo visok stupanj korisnosti motora.

Iz načina rada motora s transverzalnim magnetskim poljem jasno je da za njega vrijedi princip umnožavanja momenta [16, str. 2]. Naime, povećanjem broja pojedinačnih magnetskih krugova i adekvatnim povećanjem segmenata na prstenu rotora, proporcionalno se povećava moment, a time i snaga motora. Uz već navedena ograničenja maksimalnog broja magnetskih krugova po namotu vezanog za rasipne magnetske tokove, postoji i ograničenje po brzini vrtnje: da bi se zadržala ista brzina potrebno je povećati frekvenciju, čime se povećavaju i gubitci u željezu. Moment se, naravno, uvijek može po volji povećati povećanjem promjera i/ili povećanjem broja rotorskih elemenata. Jednako se odabire i odnos promjera i duljine motora.

Može se zaključiti da motor s transverzalnim magnetskim poljem ima niz prednosti od kojih je najvažnije spomenuti vrlo visok stupanj korisnosti, veliku specifičnu snagu i jednostavnije pretvarače frekvencije s trapeznim oblikom napona. Nedostatak je samo jedan. Kao i u slučaju motora s aksijalnim poljem, riječ je o potpuno novoj konstrukciji koja nema ništa zajedničko s konvencionalnim motorima. Za razliku od motora s aksijalnim poljem, ovdje je prisutan i velik broj dijelova (rotorski prsten, statorske potkovice), koji moraju biti iznimno precizno izrađeni i ugrađeni kako bi se postigao dovoljno mali zračni raspor. Motor prikazan na slici 6. ima osam zračnih raspora po rotorskom elementu, ali je ipak

jednostavniji za izvedbu od motora s aksijalnim poljem jer dopušta dovoljan pomak u aksijalnom smjeru, što znači jednostavniju montažu i manje zahtjeve na aksijalnu zračnost ležajeva. Motor je očigledno vrlo osjetljiv na mehaničke utjecaje (udarci, vibracije).

Propulzijske elektromotore s transversalnim magnetskim poljem razvijaju *Rolls-Royce* za Britansku (od 1997.) [11, str. 5-6, 12, str. 14] i *Siemens* za Njemačku ratnu mornaricu [7, str. 28].

#### 4. VREDNOVANJE PROPULZIJSKIH ELEKTROMOTORA S PERMANENTNIM MAGNETIMA

Elektromotorni pogon broskog vijka karakterističan je po razmjerno malom nazivnom broju okretaja, koji se ovisno o veličini propelera i snage uobičajeno kreće od 80 do 250 okretaja. Dva su načina za dobivanje tako malog broja okretaja:

- direktnim prijenosom snage na brodski vijak
- primjenom reduktora.

Kod direktnog prijenosa moraju se koristiti motori s velikim brojem polova i/ili pretvarači frekvencije s malom izlaznom frekvencijom. Uglavnom se koriste sinkroni motori, a kod specijalnih plovnih objekata za sada još uvijek i istosmjerni motori. Kod primjene reduktora motori imaju manji broj polova i vrte se brzinama od 600 do 1200 o/min kada je riječ o istosmjernim motorima, odnosno 900-1800 u slučaju kaveznih asinkronih motora [24, str. 15]. Zadnjih godina prisutan je trend pojednostavnjivanja sustava smanjenjem broja elemenata, a to znači i izbjegavanje primjene reduktora. Elektromotor stoga mora imati mali broj okretaja.

Izuzevši neke plovne objekte specijalne namjene, na brodovima je odnos snage električne centrale i propulzijskog elektromotora takav da ne dopušta pokretanje motora bez primjene pretvarača frekvencije odnosno reguliranog ispravljača ili Ward-Leonardova agregata u slučaju istosmjernih propulzijskih elektromotora. Budući da je regulacija brzine nužna za pokretanje, neracionalno je ugrađivati i vijak sa zakretnim krilima jer se time samo poskupljuje investicija, zauzima brodski prostor i smanjuje pouzdanost sustava [21, str. 4].

Iz prethodnog se razmatranja nameću sljedeći zahtjevi na elektromotorni pogon broskog vijka:

- nizak broj okretaja
- veliki moment
- visok stupanj korisnosti
- što manje dimenzije, posebno promjer motora
- regulacija brzine
- rad u četiri kvadranta (kočenje i reverziranje)
- rad na visokim temperaturama okoline
- otpornost na vibracije i udarce (robustnost)
- otpornost na koroziju i vlagu
- pouzdanost
- tolerantnost na kvarove

- mali opseg i jednostavnost održavanja
- povoljna cijena.

Motori s permanentnim magnetima posebno su pogodni za regulirane elektromotorne pogone u kojima se traži mali broj okretaja i veliki moment, pa prema tome i za električnu propulziju [9, str. 25]. Polovi rotora kod motora s permanentnim magnetima mogu biti mnogo uži nego kod konvencionalnih sinkronih motora s uzbudnim namotima, što znači da se za isti promjer rotora može ugraditi veći broj polova. Povećavanjem broja polova smanjuje se magnetski tok po polu, a time i potreban presjek jarma rotora i statora [11, str. 5]. Uz adekvatno povećanje izlazne frekvencije pretvarača, motor će se vrtjeti istom brzinom i razvijati isti moment, ali će imati manje dimenzije. Pritom za zadani broj okretaja brojskog vijka treba optimirati broj pari polova motora odnosno frekvenciju. Kada je riječ o velikim snagama, uglavnom se koriste propulzijski motori sa 12 ili 14 polova [2, str. 212].

Stupanj korisnosti elektromotora ovisi o gubitcima koji se dijele na: gubitke u bakru, gubitke u željezu i gubitke trenja i ventilacije. Iako različitost konstrukcije motora s permanentnim magnetima utječe i na različite veličine gubitaka trenja i ventilacije, ipak su za stupanj korisnosti mnogo značajniji gubici u bakru i željezu.

U slučaju motora s radijalnim i motora s aksijalnim magnetskim poljem i sinusoidalnim napajanjem statora, gubici u željezu rotora su zbog nepromjenljivosti glavnoga magnetskog toka praktično zanemarivi. Motor s transverzalnim magnetskim poljem ima gubitke u željezu rotora koji izravno ovise o frekvenciji. Želi li se iz takvog motora izvući maksimalna specifična snaga, tada će uz veliki broj odvojenih magnetskih krugova ići i viša frekvencija, pa gubici u željezu rotora postaju nešto veći, ali zbog vrlo kratkog puta magnetskih silnica i manjih promjena magnetskog toka, još uvijek mnogo manji nego kod konvencionalnih motora. Ipak o tim gubitcima treba voditi računa jer zagrijavaju permanentne magnete i time ruše magnetsku indukciju odnosno  $(BH)_{\max}$ .

Stator motora s radijalnim magnetskim poljem ne razlikuje se od statora asinkronih ili konvencionalnih sinkronih motora pa će i gubici u statoru pri istom broju polova biti približno jednaki. Jedino se kod motora s transverzalnim magnetskim poljem, zbog više frekvencije, mogu očekivati nešto veći gubici u statorskom željezu.

Budući da na rotoru motora s permanentnim magnetima nema namota, nema ni gubitaka u bakru rotora. Gubici u bakru statora, osim o presjeku vodiča, ovise o njihovoj duljini i jakosti struje. Ovisno o izvedbi, motori s permanentnim magnetima mogu imati bolji ili lošiji odnos aktivnog i neaktivnog dijela statorskog namota u odnosu prema konvencionalnim elektromotorima. Kako neaktivni dio namota stvara po jedinici duljine iste gubitke kao i aktivni, ali ne pridonosi stvaranju elektromagnetske sile, za korisnost motora je iznimno važno da njihov odnos bude što manji. Posebno su zanimljivi motori s transverzalnim magnetskim poljem kod kojih je taj odnos apsolutno najpovoljniji.

Zbog još uvijek nedovoljno jakih magneta, današnji elektromotori s permanentnim magnetima ne mogu ostvariti velike vrijednosti magnetskog toka. Zbog toga se pri punom opterećenju, umjesto s  $\cos\phi=1$ , koriste u poduzbuđenom području, kako bi imali veću snagu. To znači da su statorske struje, a prema tome i gubici u bakru statora, nešto veći. Kada se pronađu kvalitetniji materijali, moći će

se postići bolji faktor snage. Ipak, i sadašnji gubitci u bakru statora manji su nego kod asinkronih kaveznih motora, a ovisno o izvedbi veći ili manji nego kod konvencionalnih sinkronih motora.

Iz provedene analize gubitaka proizlazi da je stupanj korisnosti motora s permanentnim magnetima viši od stupnja korisnosti konvencionalnih motora. U literaturi se navodi eksperimentalno provjereno povećanje stupnja korisnosti za 2% u slučaju motora s radijalnim smjerom magnetskog polja [22, str. 4]. Zbog znatno manjih gubitaka u bakru statora kod motora s transverzalnim smjerom magnetskog polja, faktor korisnosti morao bi biti još bolji.

Manji promjer motora posebno je važan pri ugradnji motora u podtrupni porivnik (POD i AZIPOD), gdje omjer promjera propelera i motora izravno utječe na stupanj korisnosti poriva broda [22, str. 4]. Treba istaknuti da se kod bilo koje vrste elektromotora, promjer može donekle smanjiti na račun povećanja duljine. Kada odnos duljine i promjera prijeđe određenu granicu, javljaju se problemi s hlađenjem i nužnost ugradnje složenijih sustava hlađenja [3, str. 8]. Specifična snaga motora može se povećati i povećanjem gustoće struje u vodičima uz primjenu dirigiranog hlađenja, što, međutim, za sobom povlači veće gubitke i stoga manji stupanj korisnosti motora. Ako je pritom manji promjer motora uspješno iskorišten za postizanje boljih hidrodinamičkih svojstava broda u cjelini, ukupni stupanj korisnosti propulzije u pravilu će se povećati.

Pokazalo se da se primjenom sinkronog motora s permanentnim magnetima i radijalnim magnetskim poljem, uz povećanje stupnja korisnosti motora od 2%, odnos promjera motora i brodskog vijka može smanjiti na 0,35 do 0,4, posljedica čega je i do 10% povećanje ukupnog faktora korisnosti poriva broda, s apsolutnom vrijednošću većom nego kod direktnoga dizelskog pogona brodskog vijka [22, str. 2]. Pri ugradnji propulzijskog elektromotora manjeg promjera unutar trupa broda, može ga se smjestiti niže i time povećati promjer propelera, što na sličan način pridonosi povećanju efikasnosti propulzije.

Svi brodski uređaji izrađuju se prema zahtjevima registra tako da mogu bez štetnih posljedica trajno raditi u okolini s razmjerno visokom temperaturom. Zbog osjetljivosti permanentnih magneta na povišenu temperaturu u smislu reverzibilnog i ireverzibilnog gubljenja magnetskih svojstava, iznimno je važno osigurati dobro i pouzdano hlađenje, ponajprije zbog sprječavanja prijenosa Jouleove topline razvijene u statorskim namotima na rotorske permanentne magnete. Posljednja generacija podtrupnih porivnika zasnovanih na motoru s permanentnim magnetima zbog malih gubitaka i dobrog prijenosa topline sa statora na oplatu, nema potrebe za sustavom hlađenja [22, str. 3].

Brodski elektromotori trebaju biti otporni na vibracije i udarce. Motori s radijalnim magnetskim tokom slični su po konstrukciji asinkronim motorima pa im je i otpornost na vanjske mehaničke utjecaje gotovo jednaka. Problem je zračni raspod koji kod svih vrsta motora, osim kod konvencionalnih sinkronih koji imaju jaku uzbudu, mora biti vrlo mali kako se ne bi izgubilo previše magnetskog toka. Taj je problem mnogo izraženiji kod motora s transverzalnim magnetskim poljem zbog složene konstrukcije, ali je najgora situacija kod motora s aksijalnim poljem, kod kojih širina zračnog raspoda ovisi o aksijalnom položaju rotora, što je kod električne propulzije uistinu velik problem budući da se cijela sila potiska prenosi preko osovine na odzivni ležaj pri vožnji naprijed u jednom, a pri vožnji nazad u

suprotnom smjeru. Postizanje dovoljno male zračnosti ležaja da ne dođe do izbacivanja rotorskih diskova iz središnjeg položaja među statorima velik je problem, pogotovo ako su još prisutne i vibracije.

Najkvalitetniji danas poznati permanentni magneti NdFeB, koji su i omogućili komercijalnu primjenu u sustavu električne propulzije, iznimno su osjetljivi na koroziju i pod njezinim utjecajem razmjerno brzo zbog strukturnih promjena nepovratno gube svoja magnetska svojstva. Zbog toga je nužna takva izvedba motora pri kojoj će opasnost od doticaja permanentnih magneta sa zrakom biti svedena na najmanju moguću mjeru. Najsigurnije je rješenje korištenje permanentnih magneta presvučenih zaštitnim slojem još u proizvodnji. Na žalost, presvlačenjem magneti gube dio svojih magnetskih svojstava.

U uvjetima broda iznimno je važno da svi sustavi, a osobito oni esencijalni koji su vezani za propulziju, imaju visok stupanj pouzdanosti i tolerancije kvarova. Znatno veća pouzdanost motora s permanentnim magnetima proizlazi iz činjenice da nemaju uzbudne strujne krugove (uzbudni namoti, ispravljači, transformatori, klizni kontakti...). Do električnog kvara može, dakle, doći samo na statoru.

Današnji propulzijski elektromotori velikih snaga izrađuju se uglavnom s dvostrukim namotima. Jedan od razloga je i taj da u slučaju kvara na jednom od namota motor može i dalje raditi s polovicom nazivne snage. Motori s permanentnim magnetima imaju u svim izvedbama visok stupanj tolerancije kvarova. Izmjeničnim motorima s radijalnim magnetskim poljem mogu se kao i kod konvencionalnih motora jednostavno podijeliti statorski namoti. Međutim, kako na rotoru nemaju uzbudnih namota, mogu se jednostavno podijeliti i magnetski krugovi statora i rotora. Kod motora s aksijalnim magnetskim poljem mogu se u slučaju kvara isključiti pojedini statorski prsteni. Najpovoljniji su ipak motori s transverzalnim magnetskim poljem kod kojih su namoti statora toliko jednostavni da je kod pravilne izvedbe kvar na namotu malo vjerojatan. Ako do kvara ipak dođe, pretvarač frekvencije trenutačno će ugasi samo onu fazu koja je u kvaru, čime će se zbog velikog broja faza izgubiti tek mali dio snage motora, bez zastoja u radu.

Kod bezkontaktnih električnih strojeva održavanje se svodi na kontrolu i pravodobnu zamjenu ležajeva, kontrolu otpora izolacije te kontrolu i čišćenje sustava hlađenja. Kada je riječ o sporohodnim propulzijskim elektromotorima, životni vijek ležajeva je uz pravilno korištenje iznimno dug. Zbog nemogućnosti isključivanja uzbude, demontaža rotora vrlo je složen postupak koji zahtijeva posebno opremljenu radionicu već kod motora s radijalnim magnetskim poljem. Kod motora s aksijalnim i transverzalnim magnetskim poljem demontaža izgleda nemoguća izvan uvjeta tvornice. Osim jakih magnetskih sila, pri demontaži je osobito izražen i problem iznimne krutosti NdFeB permanentnih magneta koji se danas koriste za izradu elektromotora velikih snaga. Olakotna je okolnost što se suvremeni podtrupni porivnici izrađuju na način koji omogućuje zamjenu bez dokovanja.

Za sada se u komercijalnoj upotrebi nalaze samo motori s permanentnim magnetima i radijalnim magnetskim poljem. Njihova proizvodna cijena je usprkos veće specifične snage i samim time manje težine, mnogo veća od cijene konvencionalnih, a posebno asinkronih kaveznih motora. Visoka cijena posljedica

je primjene vrlo skupog i teško obradivog materijala NdFeB, ali i za sada malog opsega proizvodnje. Visoka cijena i previše kratko vrijeme za ocjenu referentnih brodova, bit će glavne prepreke brzom širenju propulzijskih elektromotora s permanentnim magnetima.

## 5. ZAKLJUČAK

Električna propulzija je tijekom dugogodišnjeg razvoja zauzela čvrst položaj na području plovniha objekata specijalne namjene i trgovačkih brodova s velikom potrošnjom električne energije. Daljnje širenje moguće je ostvariti jedino na osnovi smanjenja troškova izgradnje i/ili troškova eksploatacije.

U posljednjoj generaciji podtrupnih porivnika koriste se motori s permanentnim magnetima i radijalnim magnetskim poljem, koji su zahvaljujući svojoj konstrukciji, eksploatacijskim karakteristikama i posebno dimenzijama omogućili značajan napredak sustava brodske propulzije na području povećanja stupnja iskorištenja i smanjenja eksploatacijskih troškova.

Elektromotori s permanentnim magnetima trenutačno se intenzivno razvijaju. Propulzijski motori s aksijalnim i transverzalnim magnetskim poljem trenutačno su u fazi eksperimentalnog ispitivanja prototipa. Razvoj novih permanentnih magneta neprestano se intenzivira. Na osnovi dinamike dosadašnjeg razvoja uskoro se mogu očekivati još mnogo bolji materijali.

Električnu propulziju ne smije se vrednovati samo kroz faktor korisnosti električne propulzije u granicama električnog prijenosa snage na brodski vijak, već globalno kroz potrošnju goriva. Primjenom motora s permanentnim magnetima i radijalnim smjerom magnetskog polja smještenih u podtrupnim porivnicima povećava se faktor korisnosti propulzijskog elektromotora za 2%, dok istodobno zahvaljujući prije svega boljem omjeru promjera motora i broskog vijka ukupni faktor korisnosti raste i za 10%. Posljedica je toga da najnoviji sustavi električne propulzije imaju manju potrošnju goriva od adekvatnoga direktnog dizelskog pogona broskog vijka.

Imajući na umu životni vijek broda i tradicionalni oprez broдача kada su u pitanju nova i skuplja rješenja, trebat će barem 10 godina da motori s permanentnim magnetima pokažu svoju isplativost. Ne treba sumnjati da će se u tom roku na tržištu pojaviti bolji i jeftiniji permanentni magneti, ali i motori s aksijalnim i transverzalnim magnetskim poljem, što bi lako moglo označiti kraj ere direktnoga dizelskog pogona broskog vijka.

## LITERATURA

- [1] C. M. Andrews, *Understanding Permanent Magnets*, The Arnold Engineering Company, Marengo 1998.
- [2] B. Borman, *Electrical Propulsion - A Review*, The Motor Ship, 20th Annual Marine Propulsion Conference London, 25.-26. ožujka 1998., str. 209.-221.
- [3] G. R. Chippington, J. Molyneux, A. J. Mitcham, J. A. Cullen, *Electric Propulsion in Large Warships*, Conference on Electric Propulsion -The Effective Solution, IMarE, London, 5.-6. listopada 1995., Conference Proceedings, dio 1., Paper 12, str. 1.-14.
- [4] T. Heikkilä, *Permanent Magnet Synchronous Motor for Industrial Inverter Applications -Analysis and Design*, Doctor's thesis, Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, 2002.
- [5] C. G. Hodge, D. J. Mattick, *The Electric Warship II*, Trans IMarE, Vol 109., dio II., str. 127.-144.
- [6] C. G. Hodge, D.J. Mattick, *The Electric Warship III*, Trans IMarE, Vol 110, dio 2., str. 119.-134.
- [7] C. G. Hodge, D.J. Mattick, *The Electric Warship V*, Trans IMarE, Vol 112, dio 1., str. 27.-39.
- [8] C. G. Hodge, D.J. Mattick, *The Electric Warship VI*, Trans IMarE, Vol 113, dio 2., str. 49.-63.
- [9] J. Ikaheimo, *Permanent Magnet Motors Eliminate Gearboxes*, ABB Review, br.4, 2002., str. 22.-25.
- [10] P. Letellier, *Electrical Propulsion Motors*, Conference on Electric Propulsion - The Effective Solution, IMarE, London, 5.-6. listopada 1995., Conference Proceedings, dio 1., Paper 7, str. 1.-8.
- [11] A.J. Mitcham, 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, dio 1., Paper 4, str. 1.-10.
- [12] J. M. Newell, S.S. Young, *Beyond Electric Ship*, Trans IMarE, Vol 113, Pdio 1., str. 13.-23.
- [13] E. Nipp, *Permanent Magnet Motor Drives with Switched Stator Windings*, Doctor's thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm 1999.
- [14] R. J. Parker, *Permanent Magnet Guidelines*, Magnetic Materials Producers Association, Chicago, 1998.
- [15] A. Parviainen, J. Pyrhönen, M. Niemelä, *Axial Flux Interior Permanent Magnet Synchronous Motor with Sinusoidally Shaped Magnets*, ISEF 2001 -10th International Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical Engineering, Cracow, 20.-23 rujna 2001. <http://emotors.ncku.edu.tw/data/2/pdf/machine03a.pdf>
- [16] D. Qin, R. Qu, T.A. Lipo, *A Novel Electric Machine Employing Torque Magnification and Flux Concentration Effects*, <http://www.wempec.wisc.edu/reports/1999/99-22.PDF>
- [17] M. Rosu, A. Arkkio, T. Jokinen, J. Mantere, J. Westerlund, *The Effect of Optimised Stator Slots and Rotor Configuration on Torque and Electromagnetic Losses in Permanent Magnet Synchronous Motor for Ship Propulsion Drive*. <http://www.hut.fi/~mariusr/Publicatii/Uees99.pdf>

- [18] M. Rosu, A. Arkkio, T. Jokinen, J. Mantere, J. Westerlund, Demagnetisation State Of Permanent Magnets In Large Output Power Permanent Magnet Synchronous Motor, <http://www.hut.fi/~mariusr/Publicatii/iemdc99.pdf>
- [19] P. Thelin, Short Circuit Fault Conditions of a Buried PMSM Investigated with FEM, NORPIE/2002, Stockholm, kolovoz 2002. [http://www.ekc.kth.se/eme/publ/paper\\_2002/peter\\_stockholm.html](http://www.ekc.kth.se/eme/publ/paper_2002/peter_stockholm.html)
- [20] S.R. Trout, Material Selection of Permanent Magnets Considering Thermal Properties Correctly, Electric Manufacturing and Coil Winding Conference, 15.-18. listopada 2001., Cincinnati 2001. <http://spontaneousmaterials.com/Papers/CoilWinding2001.pdf>
- [21] E. T. Ylinen, The Basic Design of Power Station and the Electric Propulsion System, Conference on Electric Propulsion - The Effective Solution, IMarE, London, 5.-6. listopada 1995. Conference Proceedings, dio 1., Paper 13 str. 1.-6.
- [22] The SSP Propulsor - An Ingenious Poddes Drive System, SIEMENS, <http://www.is.siemens.com/marine-eng/booklets/pdf/propulsor.zip>
- [23] Understanding and Using Permanent Magnets, Arnold Engineering Company, [http://www.groupparnold.com/mtc/pm\\_manual\\_chap1.htm](http://www.groupparnold.com/mtc/pm_manual_chap1.htm)
- [24] Propulsion System Evaluation-Design Guide, DC Maritime Technologies Inc., Vancouver 2000. <http://www.dcm.t.bc.ca/PDF%20DOCS/Prop%20Sys%20Eval%20I2R1.pdf>

#### Summary

### DEVELOPMENT PROSPECTS OF THE PERMANENT MAGNET MOTORS FOR ELECTRIC PROPULSION SYSTEMS

*The article deals with permanent magnet properties critical to the propulsion motor design. The basic operating principles of radial, axial and transverse flux permanent magnet motors are described. The evaluation of permanent magnet motors for the propulsion drive systems is taken from the exploitation point of view, considering their influence on the overall efficiency of the ship propulsion. Thanks to the small diameter of the permanent magnet motors, it is possible to accomplish higher overall efficiency with diesel-electric propulsion than with a conventional diesel-direct drive system. In long terms, transversal flux permanent magnet motor is the most promising solution.*

*Key words: permanent magnets, motor, ship, electric propulsion*