Dr Novica Đorđević,
pukovnik, dipl. inž.

ELEKTROMAGNETNA PROPULZIJA BRODOVA (drugi deo)

U prvom delu članka (VTG 3/93) prikazan je osnovni princip elektromagnetne propulzije (EMP), dat je izraz za veličinu Lorencove sile, izvršeno je upoređenje EMP sa klasičnom vijačnom propulzijom, razmotren hidrodinamički aspekt EMP i ukratko su prezentirana istraživanja EMP u našoj zemlji.

U ovom delu članka dati su rezultati eksperimentalnog istraživanja na modelu EMP, analiza rezultata, osvrt na istraživanja u svetu i zaključak.

Merenje magnetne indukcije

Merenje magnetne indukcije izvršeno je u kanalu dimenzija $160 \times 100 \times 27$ (mm).

Koordinantni sistem postavljen je tako da mu je X osa orijentisana po najdužoj, i to unutrašnjoj strani. Y osa je orijentisana u smeru poprečnog preseka kanala (rastojanje između elektroda). Z osa je orijentisana naviše i predstavlja zazor međugvožđa. X osa ima, ispod magneta, dimenzije 0—160 mm, mada je magnetna indukcija merena i, izvesno, rastojanje ispred kanala. Y osa može varirati u opsegu 0—100 mm, a Z osa u opsegu 0—27 mm.

Koordinantni sistem prikazan je na slici 11.

Magnetna indukcija merena je instrumentom čiji je senzor registrovao samo normalnu komponentu magnetnog polja, što predstavlja izvesnu pogodnost, jer samo ta komponenta aktivno

učestvuje u formiranju Lorencove sile, a time i poriva.

Da bi se lakše analizirali rezultati merenja magnetne indukcije, nacrtane su krive raspodele koje omogućuju pre-

Sl. 12 — Raspodela B za struju 6 A po poprečnom preseku kanala

Sl. 11 — Orijentacija koordinatnog sistema

glednije sagledavanje raspodele magnetnog polja.

Grafički prikaz rezultata merenja magnetnog polja po osi Y dat je na slici 12.

Praktično se može uzeti da je raspodela gustine magnetnog polja po prečnom preseku kanala, a između elektroda, homogena. Na krajevima magnetu, a usled dejstva ivičnih efekata, postoji određeno smanjivanje, tj. pad magnetnog fluksa.

Upoređenje gustina magnetskog fluksa po unutrašnjoj ivici kanala (a), sredini kanala (b) i spoljnoj ivici ka-

je izvršeno u kanalu, kao i na izvesnoj razdaljini ispred (ili iza) kanala.

Raspodela magnetne indukcije pod istim uslovima, ali pri različitim vrednostima struje 4 A i 8 A, prikazana je na istoj slici. Moguće je primetiti da se vrednosti magnetne indukcije ne dupliraju, već postoji izvesna nesrazmera koju unosi magnetni histerezis.

Vrednosti maksimalno izmerene magnetne indukcije na elektromagnetu

Sl. 13 — Raspodela B uz elektrode i između njih

nala (c) prikazano je na slici 13. Očigledno je da je gustina magnetnog fluksa najveća u sredini kanala kriva (b), ali je i potpuno logično da je gustina magnetnog fluksa nešto više uz spoljnu elektrodu (c), nego uz unutrašnju (a) i to zbog nešto višeg rasipanja. Na istoj slici prikazano je i rasipno polje koje deluje na ulazu i izlazu iz kanala, kriva (b) deo od -80 do 0 . Interesantno je napomenuti da ova komponenta rasipnog polja, u sprezi sa rasipnim električnim poljem, može dati dodatnu ali korisnu Lorencovu silu.

Kriva koja pokazuje rezultate merenja gustine magnetnog polja pri struji 2 A prikazana je na slici 14. Merenje

modela EM propulzora prikazane su na slici 15.

Na osnovu izvršenih merenja može se zaključiti sledeće:

— raspodela gustine magnetnog polja u kanalu je prilično ujednačena i homogena, tako da za struju od 8 A ima srednju vrednost od 620 mT, a za struju od 10 A ima srednju vrednost od oko 700 mT;

— mada postoji izvesno smanjenje magnetne indukcije, pri ivicama kanala, praktično se to može nadopuniti sa rasipnim poljem ispred i iza kanala, tako da se u daljem proračunu mogu uzeti navedene vrednosti kao srednje vrednosti.

Sl. 14 — Poređenje vrednosti magnetne indukcije (B) za različite struje

Sl. 15 — Raspodela magnetnog polja za struju od 10 A

Merenje brzine strujanja vode u kaalu modela EM propulzora

Merenje brzine izvršeno je za salinitet vode u propulzoru od 3% i 10%, uz variranje struje na elektrodama i magnetu. Posebnim termometrima kontrolisana je temperatura u prostoriji, kao i porast temperature vode u kanalu propulzora.

Brzina strujanja u kanalu merena je Laser Dopler anemometrom uz grubu kontrolu pomoću Pitoove cevi. Na slici 16 prikazan je položaj LDA i modela propulzora.

Rezultati merenja brzine strujanja vode saliniteta od 3% prikazani su u

bakru bila $3,142 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$. Time su stvo-

reni uslova da se u kanalu održava srednja, približno stalna komponenta magnetne indukcije od 0,7 T.

Upoređujući početne vrednosti napona i struje na temperaturi ambijenta od 16°C može se odrediti ukupna početna vrednost omske otpornosti,

$$R_0 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{156}{10} = 15,6 \Omega.$$

Na kraju ispitivanja otpornost namotaja imala je vrednost

$$R_1 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{185}{10} = 18,5 \Omega.$$

Sl. 16 — Merenje brzine strujanja pomoću LDA

tabeli 1. Izvršene su dve serije merenja i to na 5 mm i 10 mm od bočnog zida kanala. U tabeli i su prikazane srednje vrednosti merenja po grupama. Zbog ograničene količine vode u kanalu nastojao sam da serije merenja što kraće traju, kako se ne bi bitno povećao početni salinitet. Poredeći rezultate merenja na distanci 5 mm i 10 mm uočavaju se očekivane razlike.

Struja kroz namotaje elektromagneta podešavana je stalno na vrednost od 10 A, pri čemu je gustina struje u

Uz poznati temperaturni koeficijent otpora za bakar

$$\alpha = 0,00392 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1},$$

može se naći prosečni porast temperature namotaja

$$\alpha = \frac{R_1 - R_0}{\alpha R_0} = \frac{18,5 - 15,6}{3,92 \cdot 10^3 \cdot 15 \cdot 6} = 40^\circ\text{C},$$

što znači da je prosečna temperatura namotaja porasla sa 16°C na oko 56°C. Kako je dozvoljeno zagrevanje namotaja do temperature od 80°C, znači da

Tabela 1

Redni broj merenja	Elektromagnet:		Elektrode:			T deg C	vLDA m/s	Napomena
	Im A	Um V	Ie A	Ue A				
1	10	156	5	17	18			Brzina pomoću LDA merena na 5 mm od bočnog zida kanala
5	10	176	10	23	27	0.570		
6	10	176	10	23	-27.5	0.627		
8	10	179	10	22	28	0.654		
3	10	176	20	56	25	0.909		
4	10	175	20	44	28	0.963		
7	10	177	20	42	28	0.969		
9	10	179	30	58	30	1.279		
10	10	170	30	58	33			
11	10	182	30	55		1.186		
12	10	181	30	54	33	1.230		
13	10	182	40	73	34	1.286		
14	10	182	40	73	36	1.333		
16	10	182	10	19		0.710	Brzina pomoću LDA merena na 10 mm od bočnog zida kanala	
17	10	184	20	36		0.888		
18	10	184	30	52.5	35	1.060		
19	10	185	40	68	36	1.450		
15			50	102	34			
20	10	185	50	84	39	1.599		
21	10	185	60	114	41	1.672		
22	10	185	60	110	45	1.770		

su se ispitivanja morala prekidati kada je napon elektromagneta dostigao vrednosti približno od 192 V.

Iz početnih podataka o struji i naponu na elektrodama pri temperaturi vode u kanalu od 17°C, moguće je naći omsku otpornost elektrolita

$$R_e = \frac{U_e}{I_e} = \frac{17}{5} = 3,40 \Omega.$$

Uvodeći pretpostavku da je otpornost ograničena dimenzijama, moguće je naći specifičnu električnu provodnost morske vode

$$\sigma = \frac{b}{R_e \cdot S} = \frac{0,1}{3,40 \cdot 0,0064} = 4,6 \Omega^{-1}m^{-1}$$

gde je:

b — rastojanje između elektroda,
 S — površina elektroda.

Na kraju ispitivanja kada je morska voda imala temperaturu od 45°C i salinitet oko 4%, omska otpornost elektrolita iznosila je:

$$R_e = \frac{U_e}{I_e} = \frac{110}{60} = 1,833$$

a specifična električna provodnost morske vode iznosi:

$$\sigma = \frac{b}{R_e \cdot S} = \frac{0,1}{1,833 \cdot 0,0064} = 8,522 \Omega^{-1}m^{-1}$$

Gustina struje u morskoj vodi može se naći pomoću jednačine:

$$J_v = \frac{I}{S_v}$$

gde je:

S_v — površina elektrode u dodiru sa vodom

$$S_v = 2 \cdot 16 \cdot 2 = 64 \text{ cm}^2.$$

Maksimalna gustina struje u kanalu iznosila je pri struji od 60 A:

$$J_v = \frac{60}{64} = 0,9735 \frac{A}{\text{cm}^2} \text{ ili } 9735 \frac{A}{\text{m}^2}$$

Jačina električnog polja

$$E = \frac{J}{\sigma} [\text{V/m}]$$

Na kraju ispitivanja električno polje imalo je vrednost

$$E = 9735 / 8,522 = 1.142 \text{ V/m}$$

i tendenciju pada sa porastom temperature vode.

Džulovi gubici u kanalu mogu se dobiti množenjem vrednosti napona i struje na elektrodama

$$P_j = U_e \cdot I_e$$

Snaga ovih gubitaka zavisi od temperature vode u kanalu i to tako da se smanjuje sa porastom temperature, što se vidi iz tabele 1.

Maksimalna Lorencova sila jednog propulzora može se lako naći i iznosi:

$$F_1 = 0,7 \cdot 30 \cdot 0,1 = 2,1 \text{ N.}$$

Lorencova sila oba propulzora duplo je veća i iznosi:

$$F_L = 2 \cdot F_1 = 4,2 \text{ N.}$$

Rezultati merenja brzine strujanja vode u kanalu EM propulzora, saliniteta 10%, prikazani su u tabeli 2. Sistem za akviziciju podataka LDA, je prikazao rezultate merenja grafički na slici 17.

Na slici 18 prikazana je funkcionalna zavisnost brzine strujanja u kanalu od promene magnetne indukcije, kod konstantne struje na elektrodama $J_e = 20 \text{ A}$. Jačina struje na elektromagnetu iznosila je 2, 4, 6, 8 i 10 A, pri čemu je ostvarivana magnetna indukcija od 0,19, 0,33, 0,48, 0,62 i 0,7 T za koncentraciju od 6%.

Određivanje Lorencove sile stepena električnog delovanja na osnovu rezultata merenja

Jedna od osnovnih dilema u vezi sa ovom vrstom propulzije odnosi se na stepen korisnosti.

Mada smo od samog početka znali da je električni stepen delovanja sistema za EM propulziju vrlo nizak, odlučio sam da se ovaj ogled napravi radi praktične provere rada i sagledavanja efekata vezanih za tu propulziju. Stepenn korisnosti je bio u drugom planu.

Za sistem sa klasičnim magnetom, kod koga se energija upotrebljena za stvaranje magnetnog polja zanemaruje zbog pretpostavke da će to jednog dana pokrivati superprovodni magnet sa minimalnim gubicima, moguće je na osnovu dobijenih rezultata merenja odrediti i električni stepen delovanja.

Sl. 17 — Brzina fluida merena pomoću LDA

Tabela 2

Redni broj	Elektromagnet		Elektrode		Temperatura vode °C	Brzina vode LDA m/s
	I_m (A)	U_m (V)	I_e (A)	U_e (V)		
1	10	150	10	20	12	0,576
2	10	152	20	28	15	0,845
3	10	154	30	34	21	1,266
4	10	156	40	38	25	1,667

Sl. 18 — Brzina fluida u kanalu u funkciji promene jačine struje u elektromagnetu

Ako se električni stepen delovanja posmatra na dobro poznati način kao odnos korisne Lorencove i ukupne uložene snage, može se numerički dobiti iz

rezultata merenja, koristeći rezultate prikazane u tabeli 3.

Tabela je proširena sa još nekim kolonama radi preglednijeg prikaziva-

salinitet 3%, $B \cong 0,7$ T

Tabela 3

Redni broj	Struja elektroda I_e (A)	Napon elektroda U_e (V)	Lorenco-va sila F_L (N)	Brzina fluida V_{LDA} (m/s)	Električni stepen delovanja η_e %	Re broj
1	10	19	0,70	0,710	2,61	22187
2	20	36	1,40	0,888	1,73	27750
3	30	52	2,10	1,060	1,43	33125
4	40	68	2,80	1,450	1,50	56096
5	50	93	3,50	1,599	1,20	61860
6	60	112	4,20	1,721	1,08	66580

nja. Lorencova sila F izračunata je pomoću poznate formule:

$$F_L = B \cdot I_e \cdot b,$$

gde je:

B — mag. indukcija,

I_e — struja na elektrodama i

b — razmak elektroda.

Električni stepen delovanja sistema može se predstaviti jednačinom:

$$\eta_e = \frac{F_L \cdot V_{LDA}}{I_e \cdot U_e}$$

gde je:

V_{LDA} — brzina izmerena Laser Dopler anemometrom,

I_e i V_e — struja elektroda.

Sl. 19 — Izmereni električni stepen delovanja EM propulzije

Na slici 20 prikazana je zavisnost brzine strujanja u kanalu u funkciji Lorencove sile.

Približno se može odrediti i stepen delovanja mlaza, kao mera gubitaka u modelu kanalnog propulzora. Ako za brzinu strujanja u kanalu napišemo poznati izraz

$$v_k = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \frac{T}{m}} l,$$

gde je T — uslovno gledano sila poriva propulzora, m — masa vode u propulzoru i l — dužina propulzora i v_k — brzina vode u kanalu, koju za potrebe ovog proračuna uzimamo kao izmerenu brzinu V_{LDA} , možemo izračunati silu poriva T .

Sila poriva je:

$$T = \frac{m \cdot V_{LDA}^2}{2 \cdot l}$$

$$m = \rho \cdot V = \rho a \cdot b \cdot l = 1,3 \cdot 10 \cdot 2 \cdot 1,6 = 0,33 \text{ kg}$$

gde je:

a — visina,

b — širina i

l — dužina kanala

$$T = \frac{0,33 \cdot V_{LDA}^2}{0,32} = 1,03 \cdot V_{LDA}^2$$

Stepen delovanja mlaza možemo, za model EM propulzora, izraziti kao odnos:

$$\eta_m = \frac{T \cdot v_k}{F \cdot v_k} = \frac{T \cdot V_{LDA}}{F V_{LDA}} = \frac{T}{F}$$

Koristeći imenovane vrednosti za V_{LDA} i Lorencove sile F iz tabele 3 dobijaju se sledeće vrednosti za η_m , koje su prikazane u narednoj tabeli:

V_{LDA} (m/s)	0,710	0,888	1,060	1,450	1,599	1,721
F (N)	0,70	1,40	2,10	2,80	3,50	4,20
T (N)	0,52	0,81	1,15	2,16	2,51	3,05
η_m	0,7	0,58	0,56	0,77	0,72	0,73

Sl. 20 — Brzina morske vode na distanci 5 mm od zida kanala

Iako je ova metoda približna, rezultati mogu da ukažu orijentaciono na moguće vrednosti i meru gubitaka u modelu kanalnog propulzora.

Merenje profila brzina u kanalu

Po izvršenoj proverbi sistema LDA za akviziciju podataka i njihovo grafičko predstavljanje, programski je zadata prava, simetrala kanala i tačke na kojoj su udaljene od bočne ivice kanala: 1, 5, 10, 15, 20, 25 i 30 mm. Rezultati su prikazani u tabeli 4, a zatim na slici 21.

Horizontalna udaljenost od stene kanala	1	5	10	15	20	25	30
Brzina vode u kanalu	0,35	0,527	0,527	0,527	0,527	0,527	0,527

Sl. 21 — Horizontalni profil brzina u kanalu

Zbog uslova merenja (primena ple-asi stakla za kanal umesto kvalitetnog stakla) horizontalni profil brzine nije mogao biti izmeren do polovine preseka (0—50 mm), već samo do 35 mm od bočne stene kanala.

Prema dobijenim vrednostima za brzinu u tabeli 4 i snimljenom delu profila brzine na slici 21 može se pretpostaviti da će ukupni profil imati oblik koji je isprekidanom linijom pri-

kazan na datoj slici. Polazeći od prikazanog oblika profila strujanja kanala, za sve proračune je uzimano da je izmerena brzina V_{LDA} jednaka približno srednjoj brzini v_k .

U tabeli 5 i na slici 22 prikazani su rezultati merenja vertikalnog profila brzina u kanalu EM propulzora, na udaljenosti 10 mm od bočne strane kanala.

Vertikalna udaljenost od stene kanala	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Brzina vode u kanalu	0,342	0,487	0,385	0,395	0,436	0,422	0,389	0,422	0,383	0,422

Sl. 22 — Vertikalni profil brzina u kanalu

Određivanje Q-H karakteristike EM propulzora

Određivanje karakteristike kanalnog propulzora izvršeno je prigušivanjem protoka u kanalu kod konstantnog režima rada, tj. kod konstantne jačine struje na elektrodama i konstantne magnetne indukcije. Merenja su provedena za četiri režima rada EM propulzora, s tim što je magnetna indukcija B ostajala konstantna ($B=0,7$ T), a varirana je jačina struje na elektrodama (10, 20, 30, 40 A).

Prigušenjem je ostvarivan protok kroz 80, 50 i 20% površine kanala, pri čemu je merena brzina. Veličina protoka Q (m^3/s) proračunata je iz poznate brzine i površine preseka kod pojedinih prigušenja. Iz izmerene razlike pritiska ispred i iza prigušenja Δp izračunata je karakteristika

$$H = \frac{\Delta p}{\rho g}$$

Rezultati merenja su prikazani na slici 23.

Sl. 23 — Q-H karakteristika EM propulzora

Promene smjera strujanja vode u EM propulzoru i regulacija brzine vode

Mada je iz vektorske jednačine

$$\vec{F} = I \times B \quad b$$

jasno da će do promene smjera Lorencove sile (F) doći ukoliko se promeni smer struje (I) između elektroda čije je rastojanje b ili promeni smer magnetne indukcije (B), tj. promeni smer struje kroz elektromagnet, ovaj test je napravljen da bi se to praktično proverilo.

Jasno je da se istovremenom promenom smjera struja na elektrodama i u elektromagnetu u vodi neće ništa bitno promeniti, jer vektorski proizvod ostaje isti.

I pored toga što je za promenu smjera strujanja vode u kanalu EM pro-

pulzora irelevantno da li se menja smer struje kroz elektrode ili kroz elektromagnet iz praktičnih razloga, eksperiment je proveden promenom smjera struje u elektromagnetu.

Test je počeo dovodenjem EM propulzora u režim rada pri magnetnoj indukciji od 0,7 T i struje od 30 A između elektroda i izmerena brzina strujanja vode u kanalu. Zatim je promenjen smer struje u elektromagnetu i pri istim električnim parametrima ($B = 0,7 \text{ T}$ i $I_e = 30 \text{ A}$) izmerena je brzina vode u kanalu.

Brzina je bila ista kao u prethodnom slučaju. Ova činjenica je vrlo važna i nesumnjivo je velika prednost EM propulzora u odnosu na ostale vrste propulzora. Posebno što je praktična izvedba prekreta vrlo jednostavna. Pod preketom rada podrazumevamo promenu smjera strujanja vode u kanalu, što analogno vijčanom propulzoru odgovara vožnji napred i nazad.

Kratka analiza rezultata

Razmatranjem rezultata ispitivanja uočava se sledeće:

— povećanje struje između elektroda do 60 A postiže se linearnim povećanjem napona na elektrodama do 112 V kod koncentracije NaCl od 3% u vodi propulzora;

— kao što je i očekivano, u toku rada modela propulzora, zbog ograničene količine morske vode koja je stalno služila kao radni medij, varirala je specifična provodljivost σ , zbog zagrevanja vode. Ova pojava kod realnog propulzora neće biti od uticaja, budući da će radni medij biti stalno »sveža« morska voda;

— sa slike 17 i 18, gde je prikazana funkcionalna zavisnost brzine vo-

— stepen električnog delovanja η_e kod modela EM propulzora je vrlo nizak, kako je to u teoretskom razmatranju i dato. Eksperiment je to i dokazao.

Na slikama 24, 25 i 26 prikazani su dijagrami, teoretski proračunati, gde su, u isprekidanim linijama, preračunati podaci sa modela propulzora i ucrtane odgovarajuće krive. Očitane vrednosti, sa ovih kriva, za η_e , podudaraju se sa vrednostima dobijenim eksperimentalnim istraživanjima. Električni stepen delovanja modela EM propulzora iznosi nekoliko promila. No, cilj eksperimentalnog istraživanja nije bio njegovo utvrđivanje, već provera uticaja pojedinih parametara na veličinu lorencove sile, odnosno na stepen električnog delovanja.

Sl. 24 — Uticaj provodljivosti medija na η_e .

de u propulzoru od jačine struje na elektrodama (sl. 17) i struje kroz elektromagnet (sl. 18), veoma jasno je izražen bitan uticaj jačine struje kroz elektromagnete, što ukazuje i usmerava u kom pravcu treba ići u daljem istraživanju;

Na sl. 19 jasno se vidi, prema mernim brzinama vode u kanalu, da u daljim istraživanjima i konstrukcijama propulzora treba ići na što manje jačine struje na elektrodama, zbog toga što sa jačom strujom η_e naglo opada.

Na osnovu podataka iznetih u radu, mogu se izvesti sledeći zaključci:

— napravljen je prvi model elektromagnetnog propulzora kanalnog tipa kod nas, na kome su izvršena merenja radnih parametara.

Osnovne karakteristike modela su:

— efektivna vrednost magnetne indukcije 0,7 T,
 — gustina struje u kanalu 9.735 A/m²,
 — efektivna zapremina jednog propulzora 0,0032 m³,

Sl. 25 — Uticaj struje na elektrodama na η_e .

Sl. 26 — Uticaj magnetne indukcije na η_e .

- ukupna Lorencova sila ($2 \times 2,1$) 4,2 N,
- presek kanala pravougaoni,
- obim kanala (kružni) — trkaliste,
- količina vode u kanalu 5,6 l,
- brzina vode u kanalu (maksimalna) 1,72 m/s;
- provedena merenja su potvrdila rezultate teorijskih razmatranja i osnovne pretpostavke u njima;
- električni stepen delovanja modela je vrlo nizak i računat je bez gubitaka i elektromagneta. Međutim, ukazano je na parametre, koje treba poboljšati da bi ovaj stepen delovanja bio viši. Povećanje vrednosti magnetne indukcije i smanjenje vrednosti jačine struje na elektrodama mogli bi učiniti ovu vrstu propulzije realnom za primenu.

Prema dostupnim podacima u svetu su postignute vrednosti magnetne indukcije i do deset puta veće od one koja je postignuta na modelu; u tom slučaju se stepen delovanja povećava za nekoliko stotina puta u odnosu na model;

— započeta eksperimentalna istraživanja treba nastaviti sa postojećim elektromagnetom i posebno koncipiranim kanalom (izrada od stakla). Posebno se mora istražiti uticaj EM propulzije na talase broda, dalja izučavanja strujanja, hemijske gubitke, i dr.

Osvrt na istraživanje EM propulzije u svetu

U uvodnom delu članka naznačeni su pravci razvoja EM propulzije u svetu, dat je kratki prikaz istraživanja i literatura. Detaljniji prikaz bi zahtevao više prostora, pa i poseban članak, s obzirom na tendencije razvoja superprovodnih materijala, a time veće izvesnosti primene EM propulzije na brodovima.

Na ovom problemu, u svetu, radi se poslednjih 30 godina. Ranije prog-

noze o niskoj efikasnosti i neprihvatljivim gabaritima i težinama su, uneholiko, ublažene pojavom superprovodnih magneta i pripadne prateće tehnologije.

Najraniji zapis o EM propulziji pojavio se 1961. J. B. Friauf (lit. 1) bio je praćen patentom Rice (lit. 2) i člankom O. M. Philipis (lit. 3). Zaključak navedenih radova bio je da niska provodnost morske vode i raspoloživa gustina magnetnog polja limitiraju stepen korisnosti ovog sistema na, približno, 10% i zahtevaju velike gabarite i težinu sistema. Interesantno je napomenuti da postoje indicije da je mornarica USA vršila, još 1943. eksperimente sa MHD propulzijom i klasičnim magnetima. Zbog velike težine magneta i slabog magnetnog polja rezultati eksperimenta bili su prilično obeshrabrujući. U 1963. godini R. A. Doragh (lit. 4) u razmatranje je uveo superprovodne magnete od 10 T sa magnetnom indukcijom (nivo koji, u to vreme, nije bio dostižan) u EM propulziju i prognozirao stepen korisnosti od 60%. Zajednički zaključak koji se može izvući iz tih, prvih, radova je da tehnologija, posebno tehnologija velikih superprovodnih magneta, nije bila adekvatna da bi podržala mogući EM propulzor.

Situacija je ostala ista 1978. kada je Hummert (lit. 5) došao do istog zaključka. U 1966. godini S. Way (lit. 6) razvio je prvi model broda EMS-1 sa klasičnim elektromagnetom i to je uspešno ispitao na kalifornijskoj obali. Rezultati su ukazivali na neophodnost veće gustine magnetskog polja.

U periodu između 1975. do 1985. investirano je mnogo u raznovrsnu primenu superprovodnih magneta u USA, kao što je magnetsko ograničenje fuzije, razvoj akceleratora, razvoj superprovodnih sinhronih generatora, razvoj homopolarnih motora i, kao najvažnije, EM propulzora. Ove aktivnosti su ubrzale razvoj superprovodnih materijala, velikih superprovodnih magneta, elektroda, rashladnih sistema podrške, i sl.

Danas se u Americi intenzivno radi na EM propulziji, tako da je u »Argone National Laboratory« izrađen u svetu najveći superprovodni magnet SCMS-2 gustine magnetskog fluksa 6T u osi unutrašnjeg prečnika 1 m i dužine oko 7 m sa zadatkom da se stvore operacioni i eksploatacioni podaci pomoću kojih bi se ustanovila mogućnost, izrade brodskih propulzora u prirodnoj veličini.

U Japanu su razmišljanja o EM propulziji počela tek pojavom superprovodnika II vrste koji su omogućili stvaranje magnetna sa većim magnetnim poljem. Prvi superprovodni model broda SEMO-- sagrađen je 1976. (lit. 7). U 1985. Sasakawa fondacija je započela R&D projekt razvoja praktične tehnike za EM brodsku propulziju i EM konstrukciju eksperimentalnog broda, kako bi se demonstriralo da se brod stvarno može pogoniti sa EM propulzorima. Rezultat toga je izrada eksperimentalnog broda koji je nazvan »Yamato-1« čija probna vožnja je obavljena 1992.

Opšte o projektu YAMATO-1

Ovaj projekat je (prema lit. 9) obuhvatio:

- razvoj lakog, kompaktnog i snažnog superprovodnog magnetna;
- razvoj lakog kriostata;
- razvoj lakog i kompaktnog helijumskog rashladnika za montažu na brodu;
- razvoj lakog magnetskog štita;
- teoretska studija korisnosti MHD propulzije;
- projektovanje najpogodnije brodske forme;
- razmatranje pravila o gradnji ovakvih brodova.

Pored nabrojenog predviđeno je da su u narednom periodu obrade i sledeći problemi:

— poboljšanje hemijskih i/ili mehaničkih osobina elektrolita radi povećanja električne provodljivosti morske vode;

— gorive ćelije za pomorsku upotrebu;

— primena Nb_3Sn i visokotemperaturnih superprovodnika;

— primena superprovodnih provodnika za razvođenje električne energije.

Japanski autori su odlučili da na eksperimentalnom brodu »Yamato-1« primene zatvoreni tip propulzora sa istosmernom strujom i to su opravdali razlozima koje citiramo iz rada prof. Motore i ostalih izloženih na simpozijumu (lit. 8).

»Naizmenični tip propulzora nije razmatran iz razloga što u ovom momentu superprovodne magnetske namotaje sa naizmeničnom strujom nije za sada moguće konstruisati.

Kako su radovi prof. Iwata i Saji (lit. 9 i 10) bili bazirani na otvorenom tipu propulzora, Komitet je, u prvoj fazi, razmatrao ovaj tip propulzora. Međutim, u slučaju otvorenog tipa, jako magnetsko polje deluje van broda i može uticati na susedne plovne objekte. Pored toga, u skladu sa teoretskim proračunima (lit. 11) brzina fluida pod delovanjem Lorencove sile je maksimalna na oplati broda, gde je i efekat trenja takođe najveći, i opada naglo udaljavanjem od oplate.

Imajući sve ovo u vidu, Komitet je odlučio da primeni zatvoreni tip propulzora sa istosmernom strujom.

Treba naglasiti da analize i proračune koje je obavio istraživački tim Instituta tehničkih nauka SANU (lit. 12) u dobroj meri demantuje navedene razloge.

Dimenzije ovog broda su:

— dužina preko 30.00 m

- dužina između perpendikulara 26.40 m
- širina 10.00 m
- gaz 2.60 m
- deplasman 180 tona
- instalisana snaga 2×2000 kW
- brzina broda oko 8 čvor.

- max. magnet. fluks 4 T
- ukupna dužina kanala/dužina pravog dela 3884/2950 mm
- unutarnji dijametar kanala EMP 360 mm
- dužina/širina/površina jedne elektrode 3400 mm/130 mm/0.442 m²

Karakteristike MHD propulzora su:

- broj propulzora 2 kom
- broj jed. propulzora 6 kom

- razmak između elektroda 0.175 m
- strujno opterećenje 2000 A (DC)

Sl. 27 — Generalni plan YAMATO I

- gustina struje 4500 A/m^2
- elektrolizni napon max. 200 V
- max. brzina elektrolita 5 m/s

Na slici 27 prikazan je generalni plan izrađenog broda YAMATO I.

U SAD se dosta istražuje mogućnost primene EM propulzije na podmornicama (lit. 13). Napravljen je probni

stalacije za održavanje tih temperatura oko elektromagnetnog kanalnog propulzora.

Istraživanja superprovodnih materijala u svetu se intenzivno nastavljaju zbog toga što bi pronalazak materijala sa superprovodnim osobinama, na temperaturi okoline, izazvao novu tehnološku revoluciju. Jedna od primena tak-

Sl. 28 — EM propulzor na podmornici

propulzor, gde se očekuje magnetna indukcija do 6 T. Ovakav propulzor bi se mogao ugraditi na već postojećoj podmornici uz vrlo male konstruktivne zahteve. Naime, kod ugradnje nije potrebno dirati čvrsti trup podmornice, osim dva prolaza za kablove.

Izgled podmornice sa ugrađenim EM propulzorima prikazan je na slici 28.

Zaključak

Elektromagnetna propulzija, kao radikalna novina u brodograđevnoj teoriji i praksi, u proteklih 20—25 godina je prošla put od negiranja njene perspektivnosti do povećanja interesa i ulaganja u dalja istraživanja, kako teoretska, tako i eksperimentalna.

Eksperimenti se sada provode sa superprovodnicima, koji superprovodne osobine imaju na niskim temperaturama (oko 4° K), što zahteva posebne in-

vog materijala svakako bi bila izrada navojaka elektromagneta za EM propulzore.

Prema objavljenim podacima i kod nas se sa primentnim uspehom istražuju superprovodni materijali.

Teoretska i eksperimentalna istraživanja EM propulzije provode se u našoj zemlji bez tendencija da se postignu spektakularni rezultati već da se »drži veza sa svetom«.

Držanje koraka sa svetom podrazumeva stvaranja preduslova da, ukoliko dođe do primene ove propulzije, budemo spremni da je samostalno projektujemo i izvodimo uz nabavku superprovodnih materijala. Posebno treba naglasiti da će nova vrsta propulzije zahtevati od projektanta brodova novi pristup u rešavanju problema otpora i propulzije izbora forme broda, nova konstruktivna rešenja, i drugo.

Literatura:

- [1] J. B. Friauf »Electromagnetic Ship Propulsion«, ASNE J. febr 1961.
- [2] Rlce (U. S. Patent 2,997,013 Aug. 22 61)
- [3] O. M. Phillips »The Prospects for MHD Ship Sropulsion J. Ship Res. Vol. 5, No 4 Mar. 1962).
- [4] R. A. Doragh (Magnetohydrodynamic Ship propulsion Using Superconducting Magnets« SNAME Trans. Vol. 71 1963.
- [5] Hummert »An Evaluation of Direct Current Electromagnetic Propulsion in Seawater ONR-CR 168-007-1 jul 79.)
- [6] Way S. Devlin C. Prospects for the Electro-magnetic Submarine, Paper 67-432 AIAA 1967.
- [7] Y. Sayi, Kitano, Mand, Iwata, Basic Study of Superconducting Electromagnetic Thrust Device for Propulsion in Sea-water, Adv. Cryo. Eng Vol. 23, 1978, pp 159—169.
- [8] An Outline of the R&D Project on Superconducting MHD Ship Propulsion in Japan S. Motora, K. Imaichi, M. Nakato, S. Takezava MHDS Symposium 28—31 octoner Kobe, Japan.
- [9] Iwata, Saji Construction of Model Ship ST-500 with Superconducting Electromagnetic Thrust Sysatem, Proe. ICEC 1980.
- [10] Iwata, Saji, Theoretical Study of Superconducting Electromagnetic Ship Propulsion 5TH Lips Propeller Symposium May 1983.
- [11] L. Mitchell and Gubser »Magnetohidrodinamic Ship Propulsion with Superconduction Magnets« Journal of Superconducting Science and Technology Vol.1 1988.)
- [12] Some Results of the MHD Propulsion Research in Yugoslavia, autori L. Bilen, M. Hofman, Z. Nikolić, Z. Petrović, N. Đorđević, Symposium 28—31 octoner Kobe, Japan.
- [13] MHDS 91, 28—31 October, 1991. Kobe, Japan.