

Model broda na magnetnohidrodinamički pogon

Cilj rada je demonstracija principa na kome se zasniva magnetnohidrodinamički (MHD) pogon, konstrukcija modela broda koji će koristiti MHD motore, i merenje uticaja osnovnih parametara motora i sredine u kojoj se nalazi na njegovu brzinu.

Uvod

U tihom svetu podvodnog ratovanja najmanji šum može da donese iznenadnu smrt podmornici. Elektronski uređaji mogu da otkriju konvencionalne motore i propelere na udaljenosti od preko 100 kilometara, ali kako manevrisati podmornicom na nuklearni pogon teškom nekoliko hiljada tona, a ne proizvesti buku. Nuklearne podmornice su morale da razviju različite metode izbegavanja detekcije. Podmornice su ponekad morale da zarone na neverovatne dubine, gde se zvuci podmornice mogu pomešati sa ostalim zvucima koji se javljaju u okeanu, ili su bile prinuđene da tiho sede na dnu i čekaju da neprijateljska podmornica dođe do njih. U svakom slučaju uključivanje motora značilo bi smrt. Razvijanje pogona, koji bi bio nečujan je bilo neophodno. Mnogi su naučnici radili na ovom problemu i nakon dugogodišnjeg istraživanja došlo se do takozvanog magnetnohidrodinamičkog pogona (MHD pogon). Pogon radi na principima elektrodinamike i dinamike fluida. MHD pogon nema pokretnih delova, što ga čini nečujnim i savršenim za podmornice. Koristeći ovaj pogon podmornice bi mogle proći kroz neprijateljsku mrežu sonara neprimećeno, i tako izazvati velike probleme onome ko je sa druge strane i možda promeniti ishod rata. Međutim, naučnici su dizajnirali i testirali mnoge MHD motore, ali nikad nije napravljena podmo-

rnica koja ih koristi za kretanje (web 1). MHD motori jednostavno nisu dovoljno snažni i efikasni da bi pogonili velike i teške podmornice. MHD pogon je stekao veliku popularnost, nakon pojavljivanja u Oskarom nagrađivanom filmu „Lov na Crveni Oktobar”. U ovom filmu nova, tajanstvena ruska podmornica pored standardnog pogona na propelere, poseduje i magnetnohidrodinamički pogon. Ona koristeći ovaj pogon izbegava sve neprijateljske sonare i prolazi neprimećeno pored zbunjenih neprijatelja, što je moguće, jer već je rečeno da pogon nema pokretnih delova i shodno tome je nečujan. Međutim, maksimalna brzina koju postiže ruska podmornica koristeći MHD motore je u domenu naučne fantastike i iznosi oko 48 km/h. Najveću brzinu koristeći ovaj tip pogona postigao je brod Yamato 1, japanske firme Mitsubishi, koja iznosi 15 km/h (8 čvorova). Yamato 1 je prvi funkcionalni prototip svoje vrste, sastavljen u Japanu 1991. godine (web 2; web 3).

Velike svote novca su uložene u razvijanje novih i usavršavanje starijih tehnologija iz oblasti superprovodnosti i elektromagnetike, ali performanse broda nisu bile zadovoljavajuće. Tokom devedesetih godina prošlog veka Mitsubishi je napravio nekoliko prototipova brodova na MHD pogon, ali se zbog male brzine odustalo od dalje proizvodnje. Tehnologije na kojima se zasnivaju MHD motori, još nisu dovoljno razvijene i pristupačne i to je glavni razlog što brodovi poput Yamatoa 1 nisu našli komercijalnu upotrebu.

Vladimir Polovina (1994), Kikinda, Josifa Pančića 1b, učenik 2. razreda Tehničke škole u Kikindi

MENTORI:

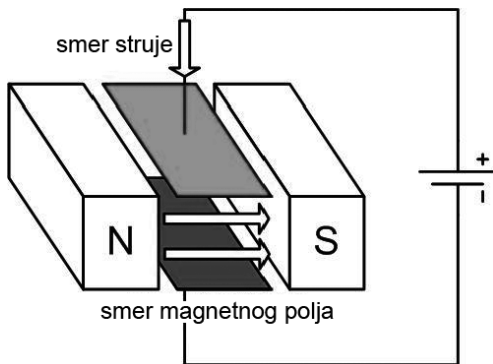
Strahinja Janković, Kruševac, student Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu

Marko Bežulj, Pančevo, student Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu

Materijal i metod rada

Konstrukcija motora i princip rada

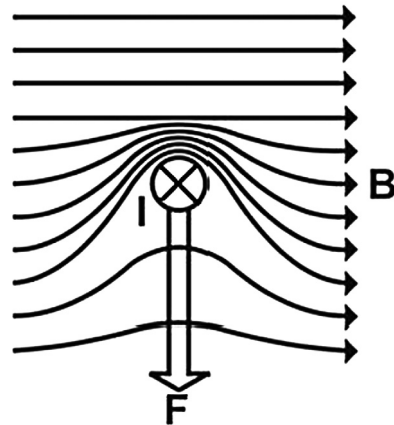
MHD motori mogu biti realizovani na više načina. U eksperimentu je korišćen tip motora čija je šema prikazana na slici 1. Motor se sastoji od para elektroda i magneta. Elektrode su postavljene paralelno jedna drugoj i normalno u odnosu na ravan u kojoj se nalaze magneti. Magneti su takođe međusobno paralelni. Smer magnetnog polja je od severnog ka južnom polu magneta, a smer struje od elektrode na višem, ka elektrodi na nižem potencijalu. Prostor između elektroda mora biti ispunjen morskom tj. slanom vodom. Struju kroz ovu vodu čini usmereno kretanje jona natrijuma i hlora. Svaki provodnik kroz koji protiče struja indukuje oko sebe magnetno polje, pa tako i voda, koja je u ovom slučaju provodnik, indukuje sopstveno magnetno polje, tj. indukuje se magnetno polje pojedinačno oko svakog jona natrijuma i hlora (web 4; web 5; web 6).



Slika 1. Šema MHD motora

Figure 1. MHD engine scheme: top – current direction, bottom – magnetic field direction

Linije rezultujuće magnetne indukcije prikazane su na slici 2. Linije magnetne indukcije su gušće sa jedne strane provodnika (vode između elektroda) nego sa druge, tj. magnetno polje je jače sa jedne strane, a slabije sa druge strane provodnika. Ukupno magnetno polje ima deformisan oblik. Stalni magneti teže da ove deformitete isprave i da ujednače ukupno magnetno polje. Negativni joni hlora se kreću ka elektrodi na višem potencijalu, dok se pozitivni joni natrijuma kreću ka elektrodi na nižem potencijalu.



Slika 2. Sila F koja deluje na provodnik kroz koji protiče struja I u polju magnetne indukcije B

Figure 2. Force F which is applied to conductor with current I , due to magnetic induction B

Stalni magneti deluju snažnim magnetnim poljem na ove jone i izbacuju ih iz oblasti obuhvaćene elektrodama i magnetima. Joni natrijuma i hlora za sobom povlače molekule vode i stvaraju neprekidan protok vode. Voda ulazi na jednom kraju motora, a izbacuje se na drugom, i tako pokreće brod silom F , čiji je smer prikazan na slici 2.

Izraz za silu glasi:

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \varphi$$

gde je B jačina magnetne indukcije, I jačina električne struje koja protiče kroz vodu, l aktivna dužina vode u magnetnom polju i φ ugao koji zaklapaju vektori magnetne indukcije i struje. Ugao φ je u MHD motorima jednak 90° pa se sinus može izostaviti iz jednačine. Jačina struje kroz vodu je srazmerna naponu na elektrodama i električnoj provodnosti vode između njih. Izraz za provodnost ovde glasi:

$$G = \gamma \cdot \frac{s}{d}$$

gde je γ specifična električna provodnost vode, s površina elektroda i d rastojanje između elektroda.

Poželjno je da elektrode budu što bliže jedna drugoj, jer se time postiže manja otpornost vode i veća struja koja protiče kroz nju pri konstantnom naponu. Kako je sila koja pokreće brod srazmerna jačini struje, smanjenjem rastojanja između elektroda povećava se brzina broda, ali zbog konstru-



Slika 3. MHD motori

Figure 3. MHD engines

kcije motora rastojanje između elektroda ne može biti manje od širine magneta. Takođe poželjno je da se magneti nalaze što bliže, kako bi magnetno polje koje deluje na vodu bilo što jače. Međutim, ako se magneti previše približe dolazi do smanjenja protoka vode, pa je potrebno naći kompromis i postaviti magnet tako da zadovoljavaju oba uslova. Sastavljena su dva identična MHD motora, koja su prikazana na slici 6. Razmak između elektroda je 7 mm, dok je razmak između magneta 8 mm. U daljem tekstu će biti objašnjeno zašto su uzete baš ove dimenzije.

Materijal

Rastvor: Već je rečeno da se motori moraju nalaziti u slanoj vodi. Povećanjem koncentracije soli u vodi povećava se električna provodnost vode, ali i njena gustina.

U tabeli 1 su prikazane vrednosti specifične provodnosti vode za različite vrednosti temperature i saliniteta vode, dok tabela 2 predstavlja zavisnost gustine vode od njene temperature i saliniteta (Dukić *et al.* 2008). U eksperimentu je korišćen rastvor temperature 15 °C. Koncentracija soli u vodi je bila 35 g/L.

Magneti: Pri konstrukciji MHD motora neophodni su snažni magneti. U eksperimentu su korišćeni neodijumski magneti (po uzoru na web 7). Upotrebjeno je osam magneta, po četiri za svaki motor. Magneti su dimenzija $10 \times 5 \times 1.9$ mm i sledećih specifikacija:

- remanentna magnetna indukcija (magnetna indukcija bez uticaja stranog magnetnog polja) = 1.24 T
- koercitivno polje (jačina magnetnog polja u koje je potrebno uneti magnet da bi se on razmagnetisao) = 920 000 A/m
- maksimalna magnetna energija (tačka na histerezisnoj krivi u kojoj je proizvod magnetna indukcije i jačine magnetnog polja najveći) = $925\,000\text{ J/m}^3$

Elektrode: Odlučeno je da se koriste aluminijumske elektrode zbog velike provodnosti, male mase i loših magnetnih karakteristika. Korišćene su aluminijumske elektrode dimenzija $20 \times 20 \times 1$ mm, ali je aktivna površina elektroda bila $8 \times 20\text{ mm}^2$. Bitno je da materijal od koga se prave elektrode ima loše magnetne karakteristike, da ne bi remetio polje stalnih magneta.

Napajanje: Bitno je da napajanje može da obezbedi veliku struju elektrodama, ali i da svojim karakteristikama bitno ne utiče na kretanje i autonomiju broda. Testirana su tri tipa napajanja:

Tabela 1. Specifična provodljivost [S/m]

Temperatura [°C]	Salinitet [g/kg]				
	20	25	30	35	40
0	1.745	2.137	2.523	2.906	3.285
5	2.015	2.466	2.909	3.346	3.778
10	2.300	2.811	3.313	3.808	4.297
15	2.595	3.170	3.735	4.290	4.837
20	2.901	3.542	4.171	4.788	5.397
25	3.207	3.926	4.621	5.302	5.974

Tabela 2. Gustina [kg/m^3]

Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	Salinitet [g/kg]				
	20	25	30	35	40
0	1016.04	1020.06	1024.08	1028.10	1032.14
5	1015.84	1019.78	1023.73	1027.68	1031.64
10	1015.31	1019.18	1023.07	1026.96	1030.86
15	1014.48	1018.30	1022.13	1025.97	1029.82
20	1013.39	1017.17	1020.96	1024.75	1028.56
25	1012.07	1015.82	1019.57	1023.34	1027.12

1. Napajanje elektroda iz spoljnog (ne nalazi se na brodu) izvora jednosmerne struje:

Elektrode su preko bakarnih žica povezane sa spoljnim izvorom napajanja. Koristeći kontrolisani izvor jednosmerne struje kroz vodu je propuštana konstantna struja od 2 A. Prednost ovakvog sistema napajanja je velika struja koja protiče kroz vodu, a samim tim i velika brzina sistema od 18 mm/s. Međutim, problem pri ovakvom načinu napajanja predstavljaju žice koje vode od elektroda do izvora. Ove žice onemogućavaju slobodno kretanje broda, i tako svaku kontrolu nad brodom čine izuzetno teškom.

2. Korišćenje strujnog ogledala za napajanje elektroda:

U elektronici se kao izvor konstantne jednosmerne struje često koristi kolo koje se naziva strujno ogledalo (Opačić 2006). Šema strujnog ogledala korišćenog u eksperimentu je prikazana na slici 4. U kolektorskom kolu tranzistora T2 postavlja se MHD motor. Struja kroz njega ne zavisi od njegove otpornosti, nego od otpornosti otpornika R1. Koristeći ovaj tip napajanja brod ima znatno veću autonomiju nego kod prvog tipa, zato što se izvor napajanja (baterije), kao i celo elektronsko kolo nalaze na samom brodu. Međutim, nepremostiv problem kod napajanja iz strujnog ogledala predstavlja mali stepen iskorišćenja koji iznosi oko 50%.

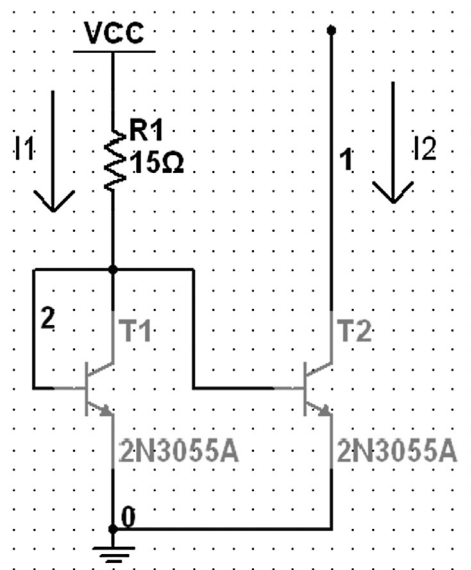
3. Napajanje elektroda direktno iz baterija koje se nalaze na brodu:

Na brod su postavljene dve baterije, po jedna za svaki motor. Korišćene su cink-karbon baterije od 9 V, kapaciteta 500 mAh. Prednost korišćenja baterija je potpuna autonomija celog sistema. Jedan od problema je znatno veća masa baterija od mase svih ostalih komponenti zajedno. Uprkos većoj masi broda kod ovakvog tipa napajanja i brzini od 10 mm/s, koja

je dosta manja nego kod prvog tipa, ipak je odlučeno da konačno rešenje za napajanje MHD motora budu baterije. Presudni faktor je velika sloboda kretanja broda koju pruža ovaj tip napajanja.

Sistem za odvođenje mehurića

Veliki su problem bili mehuri kiseonika koji se javljaju kao proizvod reakcije prilikom rada MHD motora. Na jednom kraju motora izlazi usmeren



Slika 4. Strujno ogledalo

Figure 4. Current mirror

mlaz vode koji pogoni brod, dok se na suprotnoj strani javljaju mehuri. Kada se u trenutku pojavi velik broj mehura, oni lako mogu da zapuše motor i tako dovedu do njegovog gašenja. Zbog ovoga se javlja nestabilnost u radu motora, tj. naglo paljenje i gašenje istog. Problem je rešen pravljenjem dva kanala koji vode od samog početka motora. Na krajevima ovih kanala nalazi se otvor koji služi za prikupljanje mehura koji su nastali kao proizvod reakcije. Iako su krajnje jednostavno rešenje, ovi kanali otklanjaju problem mehura. Uz njihovu pomoć brod se kreće konstantnom brzinom uz stabilan rad motora.

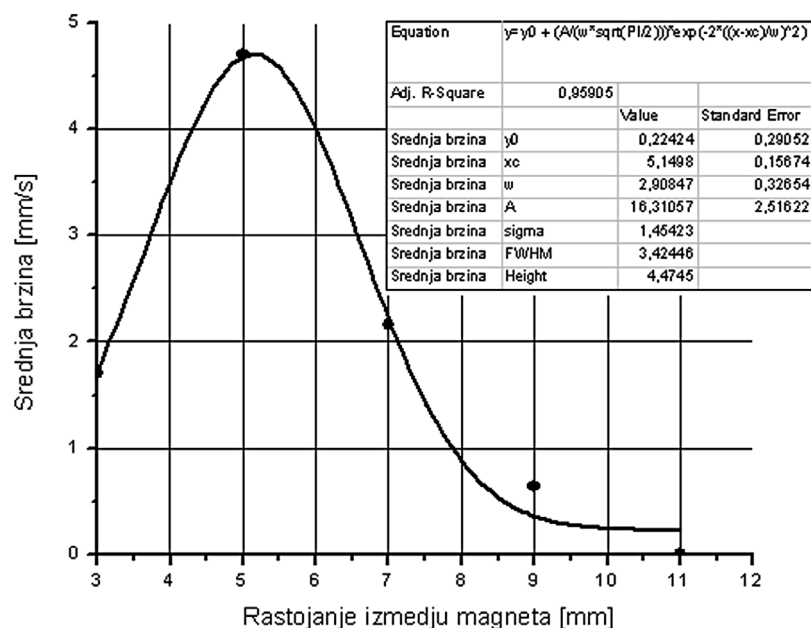
Rezultati i obrada merenja

Radi određivanja optimalnih dimenzija i karakteristika motora, izvršena su merenja uticaja osnovnih parametara motora i sredine, u kojoj se nalazi, na brzinu broda. Testirano je kako rastojanje između magneta, napon na elektrodama i salinitet vode utiču na brzinu broda. Za svaku vrednost navedenih parametara izvršeno je pet merenja. Dok je meren uticaj jedne veličine na brzinu broda, preostale dve su održavane konstantnim. Za crtanje grafika korišćen je softverski paket OriginPro 8.0. Da bi se dobile približne vrednosti brzine broda za vrednosti parametara

za koje nisu vršena merenja upotrebljena je opcija Fit.

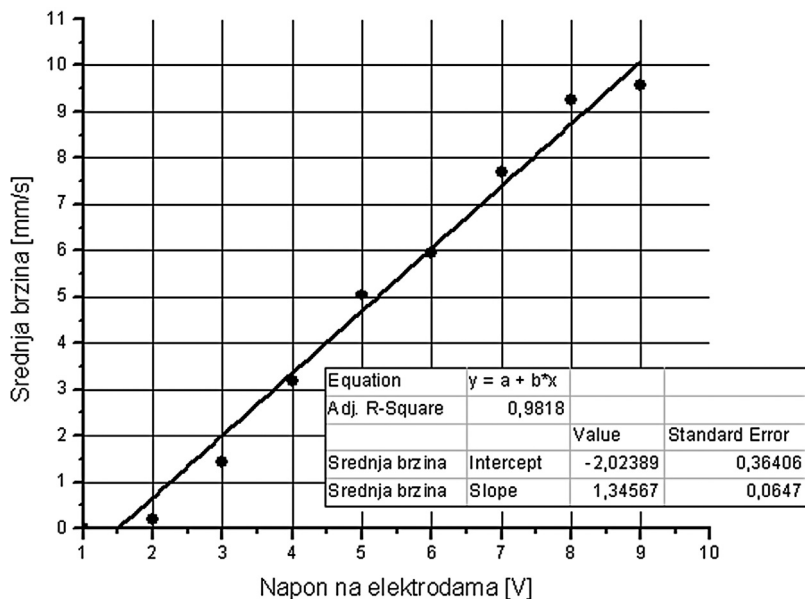
Greške pri merenju. Meren je put koji je brod prešao, i vreme koje mu je trebalo za to, a zatim su ove dve vrednosti podeljene kako bi se dobila brzina broda. Vreme je mereno pomoću štoperice, pa se zbog vremena ljudske reakcije, koje iznosi oko 0.25 ms javljaju greške. Mrenje pređenog puta je izvršeno pomoću skale, koja je graduisana u centimetrima, pa se mogu javiti odstupanja od tačne vrednosti (± 0.5 cm).

Uticaj rastojanja između magneta na brzinu broda. Rastojanje između magneta menjano je u opsegu od 3 do 11 mm, u koracima od po 2 mm. Povećanjem rastojanja između magneta menja se i aktivna površina elektroda. Kako ova promena ne bi uticala na rezultate merenja aktivna površina elektroda je ograničena na $3 \times 20 \text{ mm}^2$ (3 mm je najmanje rastojanje između magneta za koje je vršeno testiranje). Zbog ograničavanja aktivne površine elektroda brzine koje je brod postizao prilikom ovog testiranja su manje od brzina pri merenju uticaja ostalih parametara. Pri ovom merenju maksimalna brzina je nešto manja od 5 mm/s, dok je kod ostalih merenja bila oko 10 mm/s. Merenja su vršena pri konstantnim vrednostima saliniteta vode i napona napajanja. Salinitet je iznosio 35 g/L, dok je



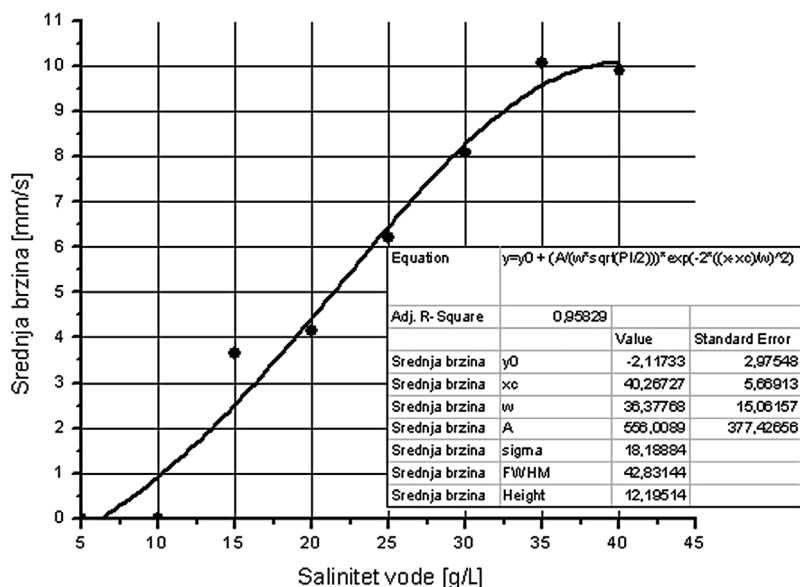
Slika 5. Zavisnost brzine broda od rastojanja između magneta

Figure 5. Dependence of boat speed from the distance between magnets



Slika 6.
Zavisnost srednje brzine broda od napona među elektrodama

Figure 6.
Dependence of boat speed from the current through the water



Slika 7.
Zavisnost srednje brzine broda od saliniteta vode

Figure 7.
Dependence of boat speed from the salinity of the water

na elektrode bio priključen napon od 9 V. Na slici 5 predstavljena je zavisnost brzine broda (uzeta je srednja vrednost od pet izvršenih merenja) od rastojanja između magneta. Za dobijanje funkcije upotrebljena je opcija Fit Single Peak.

Vidimo da pri malim rastojanjima između magneta, iako je magnetno polje najjače, brzina je znatno manja od maksimalne. To se dešava zbog male ko-

ličine vode na koju deluje magnetno polje. Brzina broda je maksimalna kada je rastojanje između magneta nešto veće od 5 mm. Daljim povećanjem rastojanja između magneta, brzina broda se smanjuje i za vrednost parametra od oko 11 mm pada na nulu.

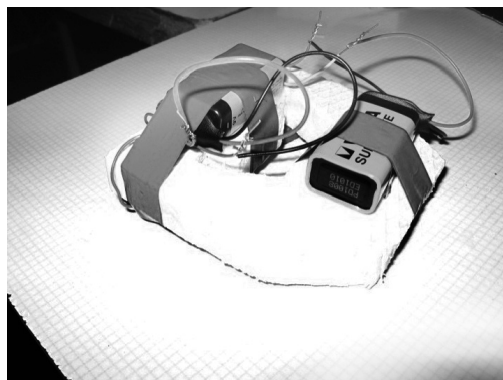
Uticaj napona na elektrodama na brzinu broda. Izvršena su merenja za devet različitih vrednosti napona napajanja. Napon je povećavan od 1

do 9 V u koracima od po 1 V. Merenje je vršeno pri konstantnoj vrednosti saliniteta vode od 35 g/L i rastojanju između magneta od 6 mm. Slika 6 predstavlja zavisnost brzine broda (srednja vrednost) od napona koji se dovodi na elektrode. Povećanjem napona na elektrodama, brzina broda se povećava linearno. Pomoću opcije FitLinear dobijena je linearna funkcija.

Uticaj saliniteta vode na brzinu broda. Salinitet je povećavan od 5 do 40 g/L, u koracima od po 5 g/L. Za svaku od devet različitih vrednosti koncentracije soli u vodi izvršeno je pet merenja. Merenja su izvršena pri konstantnoj vrednosti rastojanja između magneta od 6 mm i vrednosti napona na elektrodama od 9 V. Slika 7 predstavlja zavisnost brzine broda (srednja vrednost) od saliniteta vode. Za uzete vrednosti saliniteta karakteristika je skoro linerana, međutim pri daljem povećavanju koncentracije soli došlo bi do stagniranja porasta brzine broda, i do njenog opadanja. Do toga dolazi zbog povećanja gustine vode, koje je srazmerno povećanju saliniteta. Na grafiku se vidi samo deo oblasti zasićenja, ali se oblast opadanja brzine broda ne vidi, jer salinitet nije povećavan do te mere. Brzina broda je maksimalna za vrednost saliniteta vode od oko 35 g/L. Vaga pomoću koje je merena količina soli koju treba sipati u vodu, da bi se potigla željena koncentracija, ima odstupanje od tačne vrednosti od ± 0.5 grama, pa se javljaju greške. Funkcija je dobijena pomoću opcije NonlinearCurveFit.

Zaključak

Problemi. U finalnoj verziji broda (slika 8) postoje dva velika problema. Jedan od njih predstavlja kratak radni vek aluminijumskih elektroda. Elektrode nakon dvadesetak minuta rada korodiraju, što proizvodi znatno povećanje njihove otpornosti. Zbog velike otpornosti elektroda struja kroz vodu je mala, nedovoljna za pokretanje broda. Konstrukcija motora je takva da zamena elektroda znači rasklapanje celog motora. Drugi problem je kratak radni vek baterija. Otpornost celog sistema (elektrode i voda) iznosi 15 Ω . Korišćenjem baterija od devet volti dobija se struja od 0.6 A. Baterije korišćene u eksperimentu imaju kapacitet od 500 mAh, što znači da bi trebalo da daju struju jačine 0.6 A u trajanju od 50 minuta. U praksi se pokazalo drugačije, posle dvadesetak minuta rada pod punim opterećenjem, napon koji daju baterije je iznosio 4.5 V. Ovaj problem se može



Slika 8. Realizovani model broda na MHD pogon; snimak testiranja finalne verzije broda: <http://www.youtube.com/watch?v=iwCbvCwkoU8>

Figure 8. MHD ship model; model testing video available at: <http://www.youtube.com/watch?v=iwCbvCwkoU8>

rešiti korišćenjem alkalnih ili litijum – jonskih baterija koje imaju duži radni vek, ali su i skuplje od cink-karbon baterija.

Dalji rad na projektu. Demonstriran je princip na kome radi magnetnohidrodinamički pogon i sastavljen je model broda koji se kreće koristeći dva MHD motora. Izvršena su merenja uticaja osnovnih parametara motora i okoline na brzinu broda. Unapređenje projekta predstavlja konstrukcija sistema za kontrolu broda.

Literatura

Dukić S., Nikolajević R., Šurjanović M. 2008. *Opšta hemija*. Beograd: Zavod za udžbenike i nastavna sredstva

Opačić R. 2006. *Elektronika 1*. Beograd: Zavod za udžbenike i nastavna sredstva

web 1: <http://www.rexresearch.com/emships/empship.htm> (oktobar 2010)

web 2: <http://www.mesj.or.jp/publication/bulletin/english/pdf/mv23n011995p46.pdf> (oktobar 2010)

web 3:
<http://www.7tune.com/mitsubishi-heavy-industries-yamoto-1/> (oktobar 2010)

web 4:
<http://www.pma.caltech.edu/Courses/ph136/yr2004/0418.1.K.pdf> (oktobar 2010)

web 5:
<http://www.ferp.ucsd.edu/LIB/REPORT/JOURNAL/MISC/McGrawRev.pdf> (oktobar 2010)

web 6:
<http://www.postech.ac.kr/me/efdlab/sjkim/MHD.html>
(oktobar 2010)

web 7: <http://www.evilmadscientist.com/article.php/RCMHD> (oktobar 2010)

web 8: <http://mysite.du.edu/~čjcalvert/phys/mhd.htm>
(oktobar 2010)

Vladimir Polovina

Constructing a Model of a Ship Powered by Magnetohydrodynamics Drive

The goal of this project is to demonstrate the principle of magnetohydrodynamics (MHD) drive, to construct a model ship that moves using MHD engines, and to measure the influence of the engine parameters and its environment setup on its speed. The model was successfully constructed and the influence of different factors was calculated. Issues in the construction are also assessed. The next step in this project would be designing a control system for the ship.

