

POBOLJŠANJE POGONSKIH KARAKTERISTIKA BRODOVA SA ELEKTRIČNIM PRENOSOM

**Branislav Bilan, Zoran Nikolić, Zoran Šovagović, Darko Bulovan,
Institut Tehničkih Nauka SANU, Beograd**

U ovom radu je prikazan savremen razvoj električnih pogona na najvećim morskim brodovima kao i brodovima unutrašnje plovidbe. Razmotrene su neke prednosti električnih pogona i upoređene sa klasičnim rešenjima. Detaljnije su objašnjena rešenja sa električnim pogonima napravljena u našoj zemlji. Brod Krajina sa dva dizel motora snage 2 x 230kW pokreće generatore koji preko brodske mreže napajaju brodske potrošače snagom 100kW a ostalo se koristi za pogon broda. To znači da je moguće napraviti fleksibilan pogon za lagano krstarenje sa jednim pogonskim agregatom, ili za bržu plovidbu sa oba uključena agregata. Razmotren je projekat hibridnog gurača, koji bi mogao da prevaziđe slabije mogućnosti naše industrije. Pogon najvećih gurača obavljao bi se sa klasičnim centralnim propelerom. Dva bočna azimutska trastera snage koja bi iznosila 30% ukupne snage, koristili bi se istovremeno, za pogon kao i za kormilarenje ili aktivno upravljanje.

Ključne reči: brodski pogoni, električni pogoni, Krajina, hibridni gurač.

UVOD

Električni pogon broda je pogon ostvaren pomoću elektromotora. Prema električnom izvoru odakle elektromotor dobija pogonsku energiju, razlikuju se električna propulzija i električna transmisija (prenos). Kod električne propulzije električna energija za pogon elektromotora dobija se iz nekog elektrohemijiskog izvora, a kod električne transmisije, električna energija se dobija od nekog pogonskog agregata (dizel, parnog, nuklearnog), a preko ugrađenog generatora.

Mada je prva električna propulzija ostvarena pre više od 160 godina, veliku primenu imao je na najvećim prekookeanskim brodovima početkom XX veka, ali je zbog određenih osobina ovaj pogon ostao zapostavljen sve do kraja 20. veka. Nova tehnička rešenja uticala su da se električni pogoni, posebno na najvećim i najluksuznijim putničkim brodovima u zadnjih nekoliko godina, opet počnu primenjivati.

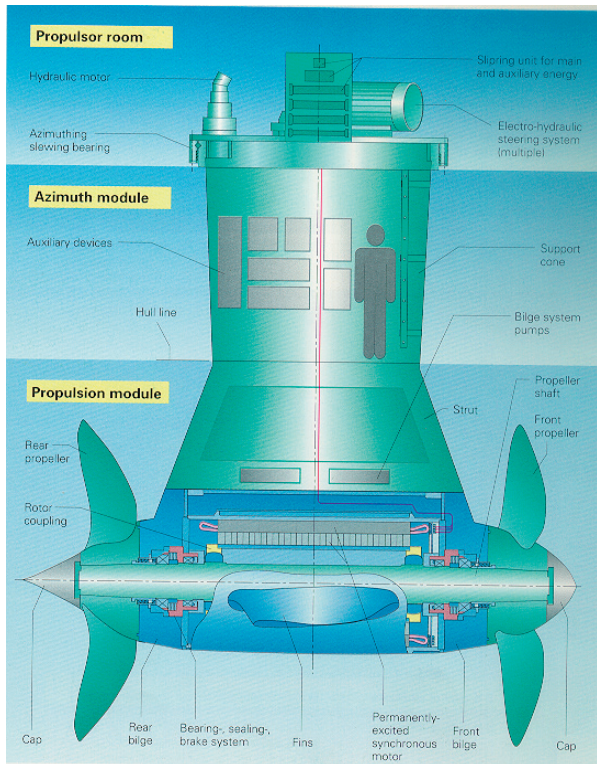
STANJE U SVETU

Mada električna transmisija nikada nije u potpunosti zapostavljena, zadnjih desetak godina došlo je ponovo do primene ove vrste pogona zahvaljujući u prvom redu nekim osobinama koje nudi ovaj pogon a koje su dobijene sa novim tehničkim rešenjima. U prvom redu, to je veliki napredak u konstruisanju sinhronih motora velikih snaga sa permanentnim magnetima i razvojem ciklokonvertora kao izuzetno kvalitetnih rešenja za regulaciju brzine obrtanja i snage pogonskih elektromotora. Ova nova vrsta pogona poznata je pod nazivom "Podid pogoni" ili "POD" skraćeno,

Zahvaljujući svojim prednostima, za kratko vreme, ova vrsta pogona ugrađena je na više brodova. Napravljeno je nekoliko brodova za prenošenje teškog tereta sa pogonom preko dve POD jedinice po 5MW svaka. Osnovni razlog za primenu ovih pogona leži u činjenici da brodovi moraju da imaju odlične manevarske osobine. Za prevoz hemikalija je napravljen brod koji poseduje jednu pogonsku jedinicu od 7MW. Ugradnjom električne pogonske jedinice dobijen je nešto veći pogonski prostor. Osnovni razlog za pravljenje trajekta sa električnim pogonom sa dve pogonske jedinice po 10MW su fleksibilnost pogona i dobre manevarske karakteristike broda.

	Jedinice	SSP5	SSP7	SSP10	SSP14	SSP18	SSP20
Snaga propelera	(kW)	5.000	7.000	10.000	14.000	18.000	20.000
Brzina obrtanja	(min ⁻¹)	190	170	160	150	145	130
Moment propelera	(kNm)	251	393	597	891	1185	1469
Brzina azimuta	(min ⁻¹)	2	2	2	2	2	2
Masa	(t)	95	125	170	230	280	310
Prečnik propelera	(mm)	3.750	4.250	4.750	5.250	5.800	6.250

Tabela 1. Osnovni tehnički podaci za POD pogone proizvođača Schottel-Siemens



Slika 1. SSP propulzor za morske brodove

Za putnički brod vrhunske klase i luksuza napravljivi su pogoni sa jednim azipodom snage 7MW prvenstveno radi ekoloških momenata. Najskuplju prekookeanski putnički brod Queen Mery 2, koji ima oko 2.620 putnika i 1254 člana posade, deplasman 150h tona, dužinu 345m i širinu 41m postiže brzinu od 30 čvorova sa električnim pogonom. Interesantno je da će ovo biti prvi brod pokretan sa četiri podid propelera od kojih će dva na pramcu biti fiksna a na krmi okretna.

Na proizvodnji i daljem razvoju ove vrste propulzije radi nekoliko velikih svetskih firmi. Najpoznatije su sledeće:

Azipod (Azimutski podid pogon)

Kvaerner Masa Yards i ABB Industrie razvili su Azipod koji se prodaje od 1990. godine. Prvi pogon bio je postavljen na brodu snabdevaču

“Seili” snage 1,5MW. Konverzija je izvršena u 1991. godini. Danas, paleta uključuje performanse od 560kW do 19,5MW i razne tipove brodova, od brodova unutrašnje plovidbe preko ledolomaca do luksuznih putničkih brodova za krstarenje. U međuvremenu, proširen je opseg sa snagama do 25MW. Novi MB “Europa” opremljen je sa dva Azipoda od kojih svaki može da razvija po 6,65MW.

Mermaid

KaMeWa (danas Rolls Royce) i Alstom su 1994. godine predstavili njihovu POD verziju sa snagama u opsegu 5 do 25MW. Verzije od 8 do 12MW bile su postavljene u različite putničke brodove, kao i u brod sa tri propelera snage od 7MW za dizanje platforme. Najveće jedinice instalisane snage od 19,5MW rezervisne su za linijske putničke brodove klase Millenium gradjene za Chantiers d, Atlantic.

SSP (Schottel-Siemens Propulsor)

Kao što ime kazuje, kompanije Schottel i Siemens su partneri u konzorcijumu SSP koja proizvodi propulzore. Rad na razvoju počeo je 1996. godine. Razvijen je širok opseg konvencionalnih azimut pogona sa snagama od oko 5MW do današnjih 30MW za POD. SSP je bio prvo realizovana sa snagom od 5 MW za hemijski tanker i kao dodatni pogon za linijski brod svaki snage po 10MW. Treća primena bila je postavljenje dve jedinice snage po 10 MW na svaki od dva Ro-Ro Pax trajekta.

Dolphin

Iza ovog trgovačkog imena su kompanije Lips i STN Atlas, koje su predstavile njihov koncept 1998. godine na SMM-u, ali još nije bilo konkretnih realizacija. Proizvodni opseg je od 3MW pa do 19MW izlazne snage.

Dalji razvoj usmeren je ka pravljenju rešenja sa integrisanim pogonskim jedinicama (IPU) koje

bi se mogle smestiti na glavnoj palubi, a trofazni električni motori sa permenetnim magnetima, snaga i do 20MW, bili bi, kao i do sada, potopljeni u vodi. Na ovaj način dobila bi se dodatna poboljšanja prvenstveno u pogledu pouzdanosti pogona.

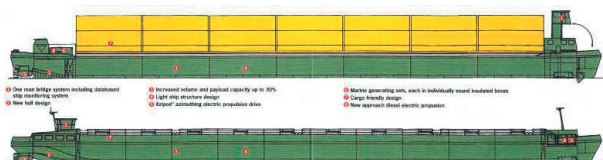
PROBLEMI NA UNUTRAŠNIM VODAMA

Veličine rečnih brodova koji plove po rekama imaju nekoliko ograničenja usled prirodnih ograničenja kao što su dubina reke, širine prevodnica, rečne krivine i veštačkih ograničenja kao što su mostovi, prevodnice i drugo.

Pored toga, postoje i neke specifičnosti pogona na rekama:

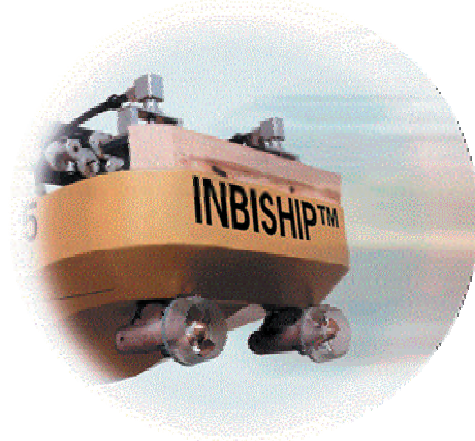
- Poznato je da se maksimalna snaga pogona koristi u uzvodnoj vožnji, a to iznosi manje od 30% plovidbe na Evropskim rekama. Uključenjem ili isključenjem pojedinih agregata, ako je to izvodljivo, ostali bi se mogli optimalno koristiti.
- Električna energija za opštegrodne potrebe dobijala bi se iz brodskih generatora koji bi se koristili i za napajanje pogonskih uređaja. Električna energija potrebna je i za napajanje svih brodskih uređaja kao što su sidrena vitla, pramčani propeleri, ostala vitla itd.
- Na brodu postoji povećana sigurnost plovidbe jer postoji više generatora od kojih ako jedan nije u upotrebi ostali omogućuju rad manjom snagom.
- Dizel generatori se mogu smestiti na najpogodnijem mestu u brodu tako da sa bukom i vibracijama najmanje smetaju posadi.
- Nije potrebno postavljati dizel motore u centralnu liniju sa osom broda, tako da je moguće povećati prostor za teret.
- Kod električnog pogona nije potrebno postavljati kormila kao ni kormilarsku mašinu jer postoji mogućnost aktivnog kormilarenja sa azipodima.

Očekuje se u narednom periodu da se znatno poveća udeo kontejnerskih i RO-RO brodova na unutrašnjim vodama.



Slika 2. Inbiship dimenzija 110m x 11,4m x 1,6m

Radi popravljavanja stanja na unutrašnjim plovnim putevima u Evropi napravljena je na Rajni konvencija o Scrapping Scheme, EEC 110/89 gde je iskazana želja da se u narednih 15 godina izvrše promena brodova novo za staro. Naime, finansijski bi pomagali seču starih brodova i gradnju novih rečnih brodova. Osnovni kriterijumi za gradnju novih brodova su: mobilnost, sigurnost, ekologija. Električni pogoni imaju osobine i prednosti po svim ovim kriterijumima. Bolja mobilnost i kvalitetnije manevarske karakteristike dobijaju se aktivnim kormilarenjem. Sigurnost i pouzdanost pogona postiže se postavljanjem više dizel agregata kojima je moguće obaviti plovidbu ako se desi neki kvar na jednom. Obzirom da dizel motori rade u generatorskom režimu, sagorevanje im je bolje i na taj način je poboljšana kvalitet izduvnih gasova.



Slika 3. Krmeni deo broda sa dva azipoda snage po 560kW

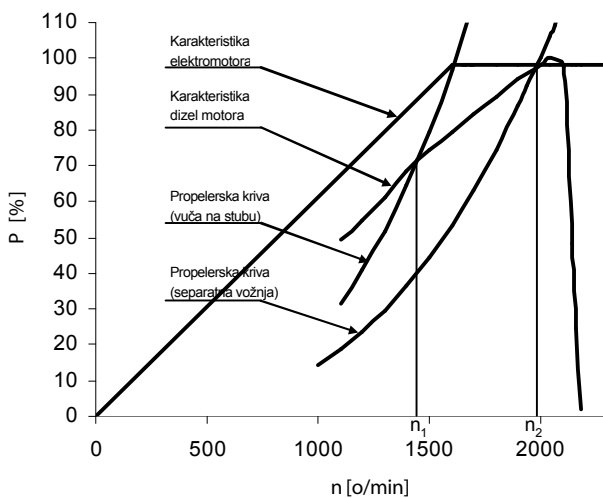
Kao jedno savremeno i optimalno rešenje gradnje novih rečnih brodova, u Evropi se duže vreme radi na INBIS brodu (BRITE EURAM Project 2130). Inbiship je novi prilaz projektovanju rečnih brodova čiji je cilj smanjenje uticaja na okolinu, smanjenje potrošnje energije i poboljšanje sigurnosti i ekonomske efikasnosti rada rečnih brodarstava.

OSNOVNE KARAKTERISTIKE ELEKTRIČNOG POGONA

U odnosu na ostale varijante prenosa snage od pogonske mašine do propelera, električni pogon ima nekoliko prednosti koji se mogu sagledati sa dijagrama na Slici 4:

Sa normalizovanih dijagrama na Slici 4 moguće je videti da se pogonskom dizel motoru a koji se

najčešće koristi na unutrašnjim vodama, može menjati brzina u opsegu od 40% ili čak 50% n_n do 100% n_n . Nije moguće povećati brzinu iznad ovog opsega. Nije moguće čak ni smanjiti brzinu obrtanja ispod ovog opsega, jer dolazi do zaustavljanja pogona. Krive opterećenja broda često se veoma razlikuju. Primer je pun ili prazan gurački sastav ili remorker u slobodnoj vožnji ili u teglju. Kod elektromotornog prenosa snaga sa brzinom obrtanja propelera linearno raste do nominalne vrednosti a od te tačke je moguće povećati brzinu obrtanja i do 60% pri čemu se normalno, snaga zadržava na stalnoj vrednosti.



Slika 4. Normalizovan dijagram opterećenja pogonskih mašina i propelerskih krivih

1. Prednosti u poboljšanju pogonskih osobina broda

- kontinualna regulacije brzine propelera u punom opsegu
- brz preket propelera i plovidba unazad istom snagom kao za plovidbu napred
- apsorbovanje pune snage pogonskih motora (mogućnost podešavanja optimalne brzine obrtanja propelera)
- nezavisna regulacija brzine oba propelera
- eliminacija kormila

2. Prednosti u mašinskom prostoru

- primena manjih, brzohodnih pogonskih mašina sa visokim stepenom iskorišćenja
- smeštaj pogonskih mašina na najpogodnijem mestu u brodu
- eliminacija uređaja za reverziranje
- agregatno postavljanje i menjanje

3. Poboljšanja u primeni pogonskih agregata

- Povećana pouzdanost pogona sa više pogonskih agregata

- Povećana ekonomija sa mogućnosti isključenja nekih pogonskih mašina pri malim brzinama broda ili nizvodnim plovidbama (optimalno korišćenje agregata)
- generatorski rad pogonske mašine
- nemapomoćnih agregata (napajanje brodske mreže preko pogonskih generatora)
- manja buka i vibracije, jer se agregati postavljaju na mestima gde nema ljudi

KONTINUALNA REGULACIJA BRZINE OBR-TANJA NAIZMENIČNIH ELEKTROMOTORA

Iz klasične teorije naizmeničnih mašina poznato je da se brzina obrtanja sinhronih mašina ne menja sa promenom opterećenja, a da se brzina obrtanja asinhronog motora od praznog hoda do punog opterećenja menja za svega nekoliko procenata. Zbog toga je regulacija brzine obrtanja ovih mašina do nedavno predstavljala veliki problem.

Polazeći od obrasca za brzinu obrtanja

$$n = (1 - s) \cdot 60 \cdot f / p$$

vidi se da se brzina može menjati promenom klizanja, učestanosti ili broja pari polova. Posmatrajući jednačinu za napon

$$U = 4,44 \cdot k \cdot N \cdot f \cdot \Phi_{ob}$$

dobija se, uslov koga je potrebno ispuniti da bi se izbeglo prezasićenje magnetskog kola.

$$\Phi_{ob} = konst = k \cdot \frac{U_{var}}{f_{var}}$$

Iz ovog proizlazi i uslov za uređaj kojim se vrši regulacija brzine obrtanja elektromotora. U celom opsegu promene brzine, da magnetsko kolo ne bi bilo prezasićeno, potrebno je da se odnos napona i frekvencije održava stalan.

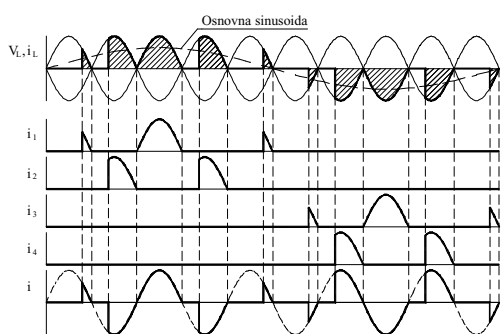
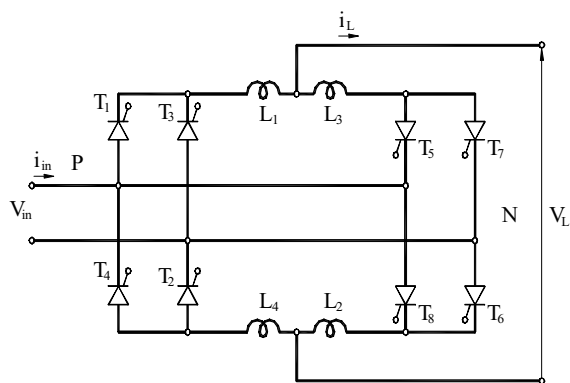
Savremena metoda regulacije brzine obrtanja se postiže direktnom konverzijom napona i frekvencije pomoću uređaja koji se nazivaju ciklokonvertori. Ovo je savremeno i vrlo kvalitetno rešenje za regulaciju brzine obrtanja sinhronih motora sa permanentnim magnetima i asinhronih kavezni motora.

Ciklokonvertor je uređaj koji naizmenični napon jedne učestanosti pretvara direktno u naizmenični napon druge učestanosti bez prelaznog jednosmernog stanja. Može se znači reći da je ciklokonverzija direktno pretvaranje

naizmeničnog napona u različitu (promenljivu) frekvenciju dobijanjem talasa jedne frekvencije sabiranjem odgovarajućih sekcija talasa višefrekventnog izvora.

Pretpostavićemo da tiristori provode bez kašnjenja (ugao okidanja $\alpha = 0$), slično kao da su diode.

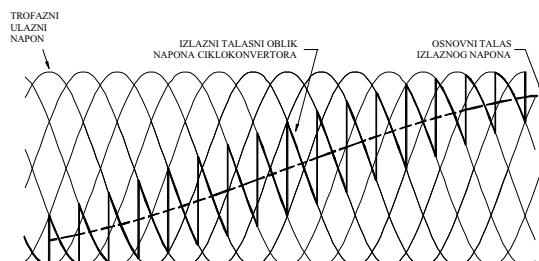
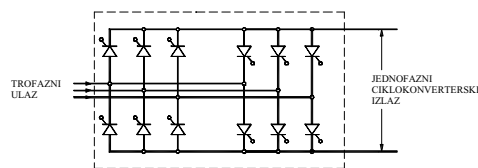
Talasnii oblik napona na opterećenju dobija se na taj način da pozitivna grupa provodi nekoliko poluperioda. Pretpostavićemo da je to m poluperioda. U sledećem vreme-nskom intervalu, negativna grupa tiristora provodi isti broj poluperioda. Osnovni naponski talas dobijen sintetizovanjem ovih talasa ima zbog toga m puta nižu frekvenciju. Ovaj talasni oblik napona sadrži veliki broj nižih harmonika.



Slika 5. Monofazni ciklokonvertori i talasni oblici napona i struja sa kontrolom okidanja tiristora

Opšti izraz za srednju vrednost izlaznog napona može se odrediti preko efektivna vrednosti napona U_f . Ako je ugao kašnjenja α , srednja vrednost izlaznog napona jednaka je srednjoj visini deblje označene linije na slici

$$U_d = \sqrt{2} \cdot U_f \cdot \left(\frac{m}{\pi}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{m}\right) \cdot \cos\alpha$$



Slika 6. Generisanje monofaznog osnovnog talasa izlaznog napona niže frekvencije iz trofaznog ciklokonvertora

Kontinualna regulacija brzine obrtanja pogonskog vratila sa propelerom u punom opsegu promene brzine ($0 \leftrightarrow n_n$) jako je važna za sve tipove brodova. Bilo kod radne funkcije ili tehnološki procesa koji brod obavlja ili jednostavno kod uplovljavanja ili isplavljanja iz luke. To je kvalitet koji se ne može dobiti kod brodova pokretanih dizel motorima sa reduktorima prekretnicima. Poznato je da se kod rečnih brodova brzina

obrtanja propelera menja u opsegu $\frac{n_n}{3} \leftrightarrow n_n$, a da je kod morskih brodova taj opseg još manji.

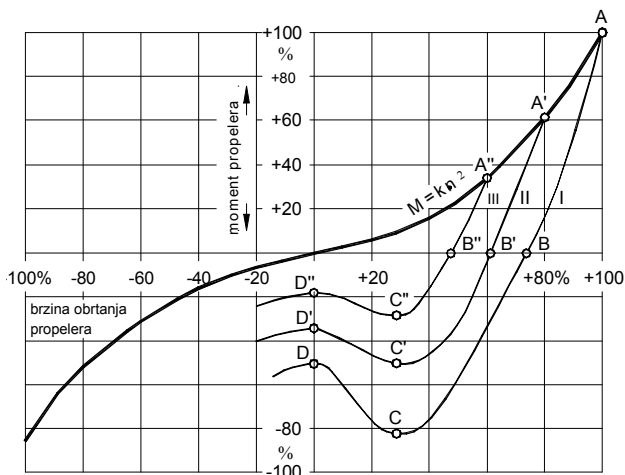
BRZ PREKRET PROPELERA

Prekret propelera predstavlja prelaznu pojavu koja može kod naglog manipulisanja dovesti do neželjenih posledica. Pri naglom prekretnu propelera ili nagloj promeni brzine obrtanja mogu se javiti određeni problemi zbog mase broda i mase vode koju propeler usporava a zatim ubrzava u suprotnom smeru [03]. Ovaj problem se pažljivo razmatra zbog dobrog manevarisanja broda i brzog prekreta propelera zbog izbegavanja sudara.

Krive prekreta snimane u bazenu prikazane su na slici i poznate su kao Robinsonove krive. Prikazuju procese kod prekreta propelera. U principu je ta zavisnost kvadratna

$$M = k_1 \cdot n$$

Šematski je zavisnost momenta od brzine obrtanja propelera prikazana punom linijom na slici i detaljnije je objašnjen i prekret propelera.



Slika 7. Krive prekreta propelera

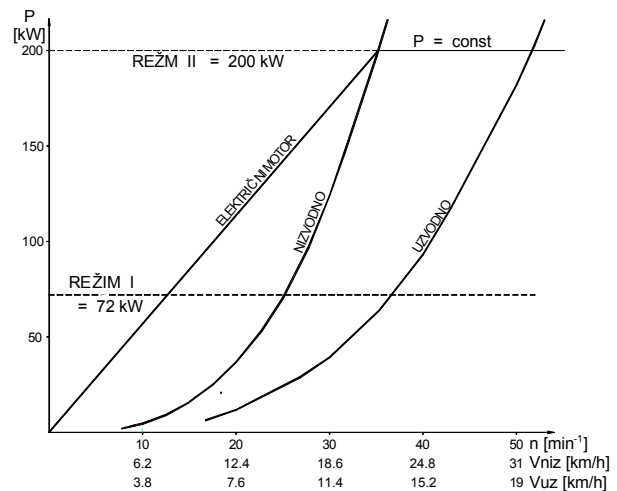
Prva kriva prikazuje osnovnu zavisnost momenta od brzine obrtanja propelera. Pretpostavimo da je preket u nekoj od tačaka A sa odgovarajućim indeksom. U tački B propeler ima odgovarajuću brzinu ali ne i moment na osovini koji je u ovoj tački jednak nuli. U nekoj od tačaka označenih slovom C, moment propelera ima maksimalnu negativnu vrednost kod brzine obrtanja od približno 30% od nominalne. U tačkama D prestaje obrtanje propelera, mada još uvek postoji moment na osovini.

U delu karakteristike od A do B, pozitivan je moment propelera kao i brzina obrtanja a to znači da propeler dobija snagu od pogonske mašine. U delu karakteristike od B do D, preko C moment propelera je negativan a brzina obrtanja propelera je pozitivna. To znači da je snaga negativna ili da propeler pogoni pogonski elektromotor koji se ponaša kao generator. Usled toga mogu se stvoriti određeni problemi u električnoj mreži.

Kombinujući brz preket jednog ili oba propelera dobijaju se odlične manevarske osobine broda, koje se teže mogu dobiti sa drugim vrstama pogona.

POTPUNA APSORBCIJA SNAGE

Sa sistemom dizel električne propulzije moguće je apsorbovati svu raspoloživu snagu pri svim režimima rada. To znači da je sa različitim sastavima i sa različitim brojem barži u uzvodnoj i nizvodnoj vožnji uvek moguće podesiti brzinu obrtanja propelera pri konstantnoj snazi, tako da se apsorbuje sva raspoloživa snaga.



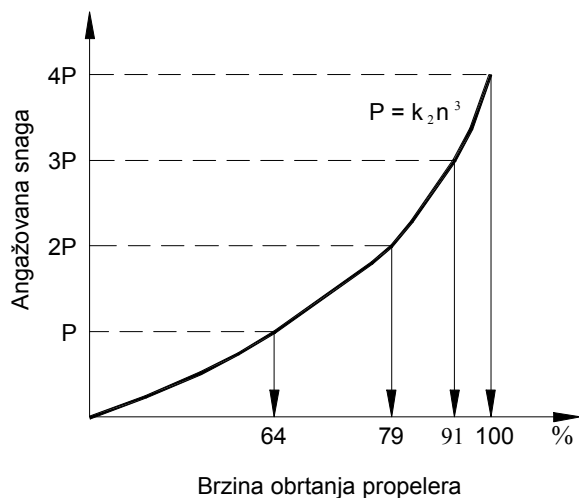
Slika 8. Dijagram apsorbovane snage u funkciji brzine kretanja broda KRAJINA

Električni pogon između pogonske mašine i propelera ima gubitke do 15%. To znači da će usloviti i potrošnju goriva za oko 15% višu od odgovarajućeg pogona sa direktnom transmisijom snage. Kod direktnog pogona sa dizel motorom i reduktorom prekretnikom gubici iznose svega oko 5% pri čemu su u reduktoru oko 2% a u spojnici dodatnih 3%. Međutim, određene osobine električnog pogona mogu uticati da se smanji ova razlika jer se sa električnim pogonom brzina broda može podesiti tako da odgovara najefikasnijoj brzini broda.

MOGUĆNOST ISKLJUČENJA POGONSKIH JEDINICA

Još jedna važna osobina električnog pogona je da posada mora biti posebno obučena da bi radila bezbedno i pouzdano sa električnim pogonskim uređajima. Ako se radi sa električnom prenosom, i ako brod radi sa određenom manjom brzinom, može se isključiti jedna ili više pogonskih mašina zadržavajući najbolji stepen korisnosti pri tome. Na primer, kod jednopropelernog pogona sa četiri pogonska generatora a na osnovu promene snage u skladu sa trećim stepenom brzine obrtanja propelera $P = k_2 \cdot n^3$ mogu se obezbediti sledeće približne brzine propelera sa različitim brojem generatora iste snage, u radu:

- 4 generatora – 100% brzine propelera
- 3 generatora – 91% brzine propelera
- 2 generatora – 79% brzine propelera
- 1 generatora – 64% brzine propelera

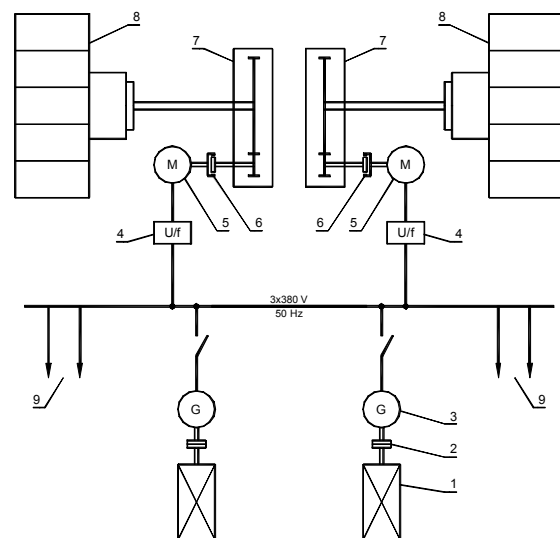


Slika 9. Karakteristika apsorbovane snage propelera u funkciji brzine obrtanja

Pored toga, direktan pogon ne može stabilno raditi pri niskoj brzini obrtanja, tako da pri manevrisanju može raditi kratko vreme pri minimalnoj brzini u vožnji napred ili unazad i tada se mora zaustaviti. Ovo je neracionalno trošenje energije u poređenju sa vrlo fleksibilnom regulacijom brzine sa električnim pogonom bez efekta na brzinu pogonske mašine.

POGONSKI KOMPLEKS REČNE JAHTE KRAJINA

U Beogradu je u toku rekonstrukcija luksuzne rečne jahte "Krajina" sa pogonom preko točkova. Na sadašnjem stanju tehnike, kao optimalno rešenje pogona je izabrano i usvojeno električno rešenje pogona broda točkaša sa naizmeničnim pogonskim motorima i U/f pretvaračima. Rešenje pogonskog kompleksa se sastoji od dva nezavisna, identična pogonska agregata. Dizel motori imaju snagu po 230kW i konstantnom brzinom obrtanja 1.500 min^{-1} pokreću generatore snage po 250kVA. Potrošnja brodske mreže iznosi 100kW, a pogonske elektromotori imaju snagu 120kW svaki.



Slika 10. Pogonski kompleks broda kod koga se regulacija brzine obrtanja pogonskih točkova obavlja promenom odnosa U/f u oba smera obrtanja

Pogonski dizel motori (1), preko elastičnih spojnika (2), pokreću generatore naizmenične struje (3). Ovi generatori u paralelnom radu napajaju sabirnice preko kojih se napaja brodska mreža (9) i oba pogonska uređaja. Regulacija brzine obrtanja pogonskih točkova (8) obavlja se preko uređaja za naponsko frekventnu regulaciju (4) i asinhronih motora (5) odgovarajućih snaga. Pogonski motori (5) promenljivom brzinom u ova smera obrtanja pogone reduktore (7) radi usklađivanja brzine obrtanja sa pogonskim točkovima (8). Kao sigurnost radi proklizavanja, postavljena je mehanička spojnica (6). Na taj način, pogonski kompleks se štiti od kvara usled eventualnog upada balvana u pogonske točkove sa lopaticama.

Mogućnost podešavanja optimalne brzine obrtanja pogonskog točka je jedna prednost koja se do sada nije mogla realizovati. Poznato je da postoje različiti otpori brodova u nizvodnoj i uzvodnoj vožnji. Ako su brodovi u sastavu, priča se dodatno usložnjava. A ako se kao pogonski uređaj koriste točkovi sa lopaticama sa malim brzinama obrtanja umesto znatno bržih propelera, efekat "bežanja vode" ili klizanja postaje izrazit, koji se može rešiti koristeći efekat povećana brzine pri konstantnoj brzini rada glavnih pogonskih uređaja.

Na izlasku iz reduktora, posle gubitaka snage u naponsko frekventnim regulatorima brzine, asinhronim motorima i reduktorima, u ukupnom iznosu od 0,83, u režimu II će biti na raspolaganju

200kW korisne snage za pogon broda a u režimu I svega 72kW. U havarijskom režimu biće na raspolaganju 72kW korisne snage za pogon broda, samo će tada jedan naponsko frekventni regulator pogoniti oba asinhrona motora u paralelnom radu.

Kod električne transmisije moguće je koristiti manje, lakše i investiciono jeftinije brzohodne pogonske mašine sa visokim stepenom iskorišćenja. Ovi dizel motori rade u generatorskom režimu, tako da direktno pogone generatore naizmenične struje. Ove dizel agregate moguće je postaviti na najpogodnijem mestu na brodu ne zahtevajući centralno mesto u skladu sa pogonskim vratilima.

Napajanje brodske mreže obavlja se preko generatora, koje je moguće staviti u paralelan

rad ili isključiti jedan dizel agregat iz pogona kada brod plovi malom brzinom. Posebna mogućnost je generatorski rad agregata u luci, kada je moguće napajati snažne potrošače ili potrošače na drugom brodu.

Mada ukupan stepen iskorišćenja električne transmisije ima relativno nisku vrednost od samo 0,76, pruža nam ono što druge vrste transmisije nisu u mogućnosti. Sa mehaničkom transmisijom nije moguće ostvariti niske brzine obrtanja pogonskih točkova, a i puštanje u rad kao i manevrisanje brodom je dosta otežano. Hidraulička transmisija takođe ima nekih dobrih osobina kao i električna transmisija. Stepenn iskorišćenja hidrauličke transmisije je na nivou električne transmisije ali je investiciono skuplja.

Komponenta i snaga	Jedinice	η	Režim I	Režim II
Dizel motor	2 x 230 (kW)		202	370
Generator	2x 200 (kW)	0,92	186	341
Rezerva	(kW)		14 (14%)	59 (20%)
U/f pretvarač		0,97	86	241
Asinhroni motor	2 x 125 (kW)	0,93	83	233
Reduktor		0,92	77	217
Korisna snaga	(kW)	0,83	72	200
Brzina točka nizvodno	(min ⁻¹)		25	35
Brzina broda nizvodno	(km/ h)		15	21,5
Brzina točka uzvodno	(min ⁻¹)		37	52
Brzina broda uzvodno	(km/ h)		13	18,5
Brzina u mirnoj vodi	(km/ h)		14	20

Tabela 2. Bilans snage u radnim režimima rada sa jednim i oba pogonska agregata

Čak i u normalnom radu, kao i u havarijskom režimu sa jednim dizel agregatom, moguća su dva radna režima. Ove režime rada najbolje je sagledati preko bilansa snage. Potrebno je imati u vidu da je uvek potrebno ostaviti 100kW snage radi restoranskog dela na brodu.

Pogonskidizelmotori[11]trajne nominalne izlazne snage 230kW svaki, rade u generatorskom režimu, na 1.500min⁻¹. U režimu II, svaki dizel motor će davati snagu po 185kW, što je pogodno radi optimalne eksploatacije motora i dugog veka trajanja. U režimu I dizel motor, koji je u pogonu, davaće snagu od 202kW. Znači da je dizel motor u režimu II opterećen sa 80% a u režimu I sa 88% njegove trajno dozvoljene snage.

Električni generatori će u režimu II davati električnu snagu od 341kW, ili svaki po 171kW, a u režimu I će onaj koji je u pogonu davati snagu od 186kW. Od ovih snaga treba odbiti snagu za opštedbrodsku i restoransku potrošnju od 100kW (što je i projektnim zadatkom definisano), tako da za pogon u režimu II ostaje za pogon broda 241kW električne snage, a u režimu I 86kW. Generator je u režimu II opterećen sa 88% a u režimu I sa 80% njegove trajno dozvoljene snage.

Na izlasku iz reduktora, posle gubitaka snage u naponsko frekventnim regulatorima brzine, asinhronim motorima i reduktorima, u ukupnom iznosu od 0,83, u režimu II će biti na raspolaganju 200kW korisne snage za pogon broda a u režimu I svega 72kW.

Sa 200kW korisne mehaničke snage na pogonskim točkovima, u režimu II i u nizvodnoj plovidbi, brzina obrtanja pogonskih točkova je 35min^{-1} , pri čemu će brzina broda biti 21,5km/h. U uzvodnoj plovidbi brzina obrtanja pogonskih točkova je 52min^{-1} , pri čemu će brzina broda biti 19,5km/h. U mirnoj vodi bi brzina plovidbe bila oko 20km/h, a potrošnja dizel goriva iznosila bi oko 80l/h.

Sa 72kW korisne mehaničke snage na pogonskim točkovima, u režimu I i u nizvodnoj plovidbi, brzina obrtanja pogonskih točkova je 25min^{-1} , pri čemu će brzina broda biti 15km/h. U uzvodnoj plovidbi brzina obrtanja pogonskih točkova je 37min^{-1} , pri čemu će brzina broda biti 14km/h. U mirnoj vodi brzina plovidbe je bila oko 14km/h, a potrošnja dizel goriva oko 40l/h.

Generatorski režim je lučki režim rada kada je jedan pogonski dizel motor uključen samo zbog napajanja brodske mreže. U tom režimu generator može trajno biti opterećen snagom do 207kW.

POGONSKI KOMPLEKS HIBRIDNOG GURAJA

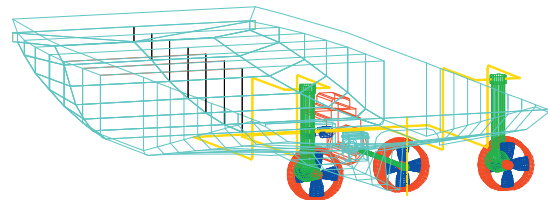
Hibridno rešenje predstavlja kombinaciju direktnog i indirektnog prenosa snage. Rešenje se u osnovnoj konfiguraciji sastoji od dva pogonska dizel motora, jednog centralnog i jednog manje snage, ali tako da je ukupna snaga oko 800kW. Za pogon se koristi jedan propeler u sapnici sa direktnom-mehaničkom transmisijom i dva propelera sa indirektno-električnom transmisijom u obliku azimutskih trastera. Propeler sa direktnom transmisijom smešten je u simetrali broda i služi da ostvari potisak, kako za vožnju napred, tako i za vožnju nazad, preketom na reduktoru prekretniku. Propeleri sa indirektnom transmisijom smešteni su na krlenom zrcalu na levom i desnom boku i služe kako za ostvarivanje pogon broda, tako i za obavljanje manevara zakretanjem svog mlaza u željenom smeru.

Postoje sledeći režimi rada kompleksa:

1. plovidba pramcem bez promene kursa i tada sva tri propelera rade tako da se ostvaruje vožnja napred.
2. plovidba pramcem sa promenom kursa, tada direktni propeler radi za napred, a dva azimutski trastera usmeruju svoj mlaz pod uglom na simetralu broda. Uglovi otklona mlaza mogu se kretati od 0 do 90 stepeni.

Odgovarajućom kombinacijom ova dva mlaza može se ostvariti čak i bočno kretanje sastava

3. manevar naglog zaustavljanja, i ta sva tri propelera prekreću smer rotacije za nazad, s tim da direktni to obavlja preko reduktora prekretnika, a azimutski trasteri promenom smera obrtanja električnih motora.
4. krug okretanja obavlja se samo sa azimutskim trasterima i to tako da jedan radi za napred, a drugi za nazad pod određenim uglom otklona mlaza.
5. plovidba krmom sa ili bez promene kursa obavlja se sa sva tri propelera uz kontrolu kursa odgovarajućim otklonima jednog i drugog navigatora.



Slika 11. Hibridni pogon rečnih brodova sa klasičnim centralnim pogonom i dva bočna azimut trastera

Ako je ukupna pogonska snaga celog pogonskog kompleksa oko 800kW, detaljnom analizom pogonskih osobina su dobijeni podaci da bi snaga svakog azimutskog trastera trebala da iznosi oko 20% ukupne snage ili po oko 150kW, a snaga centralnog propelera trebala bi da iznosi oko 60% ili oko 500kW.

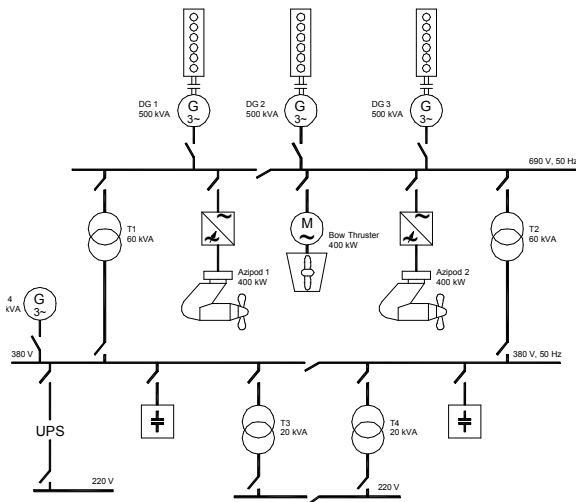
Prednosti hibridne varijante potiskivača u odnosu na postojeće potiskivače su:

1. povećanju propulzivnog stepena korisnosti sapnice
2. eliminaciji linearnih vibracija
3. efikasnijem kormilarenju
4. u smanjenju osetljivosti na oštećenja propelera u odnosu na aktivne propelere sa mehaničkom transmisijom
5. u smanjenju cene koja proizilazi iz jednostavnije gradnje trupa

OSTALI POGONI

Na Slici 12 prikazana je jednopolna šema električnog pogona broda sa tri pogonska dizel električna agregata i dva POD pogona. Pogon je koncipiran tako da zadovolji odlične manevarske osobine broda. Identična tri dizel agregata imaju

snagu po 500kW. Pored njih postoji i jedan dizel agregat znatno manje snage za napajanje brodskih potrošača dok se brod nalazi u luci. Brodska mreža napaja dva azipoda snage po 400kW svaki, i pramčani propeler iste snage koji se koristi samo pri isplavljenju i uplovljenju u luku. Brodski potrošači se napajaju preko transformatora, a postoji i uređaj za kratkotrajno neprekidno napajanje brodskih potrošača koji ne trpe prekid u napajanju.



Slika 12. Električna šema savremenog pogona rečnog broda

Ovi pogoni dali bi brodu odlične manevarske osobine, što bi se postiglo nezavisnom kontinualnom regulacijom brzine obrtanja oba azipoda, zatim njihovom brзом prekreću i dodatno aktiviranjem pramčanog propelera. Korišćenjem jedne ili više pogonskih mašina dodatno bi se dobile optimalne performanse broda za date br režime rada kao i određena ušteda goriva pri tome. Generatorski rad dizel agregata dodatno bi napajao brodsku razvodnu tablu i time bi se eliminisali pomoćni agregati za napajanje brodske mreže.

Ovakva koncepcija broda bi se mogla koristiti kao pogonsko postrojenje remorkera. Poznato je da su to brodovi namenjeni za tegljene i spašavanje brodova i ostalih plovniha objekata na morima i obavljanje različitih poslova po lukama. U plovidbi u separatu mogao bi se koristiti jedan ili dva pogonska agregata, a kada se nalazi u teglju stavljao bi se i treći agregat u pogon. Pored toga, u separatoj plovidbi bi se lako postizala veća brzina obrtanja propelera i potpuna apsorpcija raspoložive snage.

ZAKLJUČAK

U odnosu na ostale prenose snage od pogonske mašine do propelera, električni pogon ima nekoliko prednosti: kontinualna nezavisna regulacija brzine obrtanja svakog propelera, odlične manevarske osobine broda, brz prekrет propelera i plovidba krmom istom snagom kao za plovidbu napred, eliminacija uređaja za reverziranje, mogućnost rada sa više pogonskih mašina u paralelnom radu, mogućnost isključenja nekih pogonskih mašina pri malim brzinama kretanja (smanjenje potrošnje goriva), mogućnost podešavanja optimalne brzine obrtanja propelera, primena brzohodnih pogonskih mašina sa visokim stepenom iskorišćenja, smeštaj pogonskih mašina na najpogodnijem mestu u brodu, generatorski rad pogonskih mašina i napajanje brodske mreže sa pogonskih generatora.

Za slučaj primene na nekim brodovima električni pogoni imaju posebnih prednosti nad drugim vrstama pogona, posebno što se električna energija koristi i za sve ostale pogone mašina na brodovima. Na rekama, prednosti brodova koji su pokretani sa električnom propulzijom postaju takodje značajne, ali je za sada POD pogon skuplji za manje plovne objekte i ima opravdanje za snage veće od 1.000kW. Posebno rešenje napravljeno je za snage do 500kW, kao što je na brodu Krajina. Za snage između ovih, predlaže se hibridno rešenje, koje objedinjuje dobre osobine centralnog klasičnog pogona i bočnih električnih azimutskih trastera.

LITERATURA

- /1/ Simon P., Duriand J. C. , New trends in Electric propulsion, The Institute of Marine Engineers, East Cost USA Branch, April 9. 1998, New York, 1-28.
- /2/ Beverly J., Electric Propulsion Drives, Marine engineering, Society of Naval Architects and Marine Engineers, New York, 1992, 304-324.
- /3/ Facinelli W., Muggeridge D., Integrated System Analysis and Design of Podded Ship Propulsors, Marine Technology, Vol. 35, No. 3, July 1998, pp. 151-174.
- /4/ Aalberts P. & Koning J., "Pods in Service" initiative provides invaluable data, Marin Report, Decembar 2001, no. 75, 12 -13.
- /5/ , SSPs generate interest, The Motor

- Ship, may 2001, 25.
- /6/ , Gas Turbines for Queen Mary 2, Marinetalk, Providing solutions for shipbuilding and shiprepair, 31, August 2001.)
- /7/ Aprianen M., Naval Architecture of Electric Ships – past, Present and Future, SNAME Transactions, Vol. 101, 1993, pp. 583-607.
- /8/ Van der Wrf K., Inbship innovation in inland shipping, paper no. 12, International Conference on Coastal ships and inland waterways, 17 & 18 february, 1999, London (1 – 9 papers)
- /9/ Kurimo R., Sea Trial Experience of the First Passenger Cruiser with Podded propulsors, PRADS 98, Elsevier, Amsterdam, 1998, 743-748.
- /10/ , Annual Report 2000, Germanisher Lloyd, Ship Technology, 2000, 42-45
- /11/ Nikolić Z., Bilen B., Pogonski kompleks rekonstruisanog broda točkaša “Krajina”, Zbornik radova HIPNEF 2000, Beograd, (2000), 245 - 249.
- /12/ Nikolić Z., Bilen B., Electric propulsion of the reconstructed paddle wheel ship “Krajina”, Proceedings of the Second European Inland Waterway navigation Conference, Budapest, (2001), 20.1 – 20.6.
- /13/ Nikolić Z. Bilen B, Dizel-električni pogon rečnih brodova, Zbornik radova Drugog Jugoslovenskog naučno-stručnog skupa “Vodni saobraćaj u 21. veku”, Beograd, (2002), 63 – 69.
- /14/ Nikolić Z., Stamenović B., Marinković M., Diesel – electric propulsion of the reconstructed paddle wheel river ship “Krajina”, Conference Proceedings AES 2003 Broadening the Horizons, Edinburgh, UK, (2003), 117 – 123.
- /15/ Nikolić Z., Počuča G., Brodske električne mašine i uređaji, Institut tehničkih nauka SANU, Beograd, (2003), 262.
- /16/ Bilen B., Zerjal M., A new concept of pushboat design, Proceedings of the Seventh International Symposium on Practical Design of Ships and Mobile Units PRADS’98, pp. 785-792, Elsevier Science B.V., The Hague, The Netherlands, September 1998.
- /17/ Zerjal M., Bilen B., Marinkovic M., Crash-Stop Maneuver of Pushed Convoys on Inland Waterways, International Shipbuilding Progress, Vol. 45, no. 441, pp. 51-70, April 1998.
- /18/ Bilen B., News in river pushing technology, Monography of the Institute of Technical Sciences, Serbian Academy of Sciences and Arts, Belgrade 1997.
- /19/ Bilen B., Bilen-Katic B., Modified Pusher Tug Design for the Danube River, International Shipbuilding Progress, Vol. 44, no. 438, pp. 127-144, 1997.
- /20/ Bilen B., Lajić Z., Calculation Of Maneuvering Performances For Pushed Convoys With Different Steering Devices, Proceeding od the EIWNC, Balatonfured, June 9-11, 1999.
- /21/ Bilen B., Žerjal M., Bilen-Katić B., Lajić Z., Marinković M., Janković Z., A New Approach To Pushboat Design, Sudostroenie N.5 1999., St. Petersburg, Russia

IMPROVEMENT OF THE DRIVING CHARACTERISTICS OF THE SHIPS WITH ELECTRICAL TRANSMISSION

Contemporary development of electric transmission of largest navy ships and on inland water navigation is described in this paper. It discusses some advantages of electric transmission compared with a classic solution. In detailed are given explanation with electric drives are made in our country. Ship Krajina with two diesel engines with power 230kW, move on electric generators by means of electric network supply ships, electric consumers with power of 100kW and rest is usefull for ship drive. That means, it is possible to make inflected drive to go slowly cruising with one power agregate. Faster crusing must be with turn on both power agregates. It is discuss draft of hybrid pusher that will be able to exceed to weakness possibilites of domestic industry. In that case, propulsion of the larger river pusher will be conduct with one central classic drive. Two side azimuth thrusters with power of 30% of total power will be used for propulsion and for steering or active management, simultaneous.

Key words: Ship propulsion, electric drive, Krajina, Hybrid pusher.