

UTICAJ PROMENE BRZINE BRODA NA PONAŠANJE PROPELERA SA FIKSNIM KRILIMA

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

U ovom radu je obrađena je ekonomičnost brodskih pogona. Ekonomičnost brodskih pogona pri različitim režimima plovidbe broda, nezavisno od veličine broda i njegove brzine, može se ostvariti samo pod uslovom da se rad pogonskog dela kompleksa uskladi sa radom propelera. Upotrebljeni termin usklađivanje je nov termin u našoj brodograđevnoj teoriji i praksi i on je definisan kao mogućnost propelera da apsorbuje svu raspoloživu snagu pri različitim brzinama plovidbe broda.

U nemačkoj stručnoj literaturi koristi se termin "Anpassung von Hautmaschine und propeller" [1] i tamo je definisan kao mogućnost regulacije propelera tako da se minimizira potrošnja goriva po pređenoj nautičkoj milji. U dosadašnjim projektima, ovo usklađivanje rada pogonskog dela i propelera bili smo u stanju da realizujemo jedino uz pomoć propelera sa prekretnim krilima. Danas, zahvaljujući burnom razvoju energetske elektronike, preciznije tiristorskih konvertora snage, u stanju smo da brodarima ponudimo rešenje koje je po performansama čak povoljnije od prekretnog propelera, a izgleda da je i investiciono takođe povoljnije. Pod pojmom usklađivanja rada propelera i pogonskog dela propulzivnog kompleksa podrazumeva se regularbilnost propelera tako da je on u stanju da pri svim brzinama plovidbe apsorbuje svu raspoloživu snagu pogonskog kompleksa.

Ključne reči: dizel električni pogonski kompleks, propeleri promenljivog koraka, usklađivanje propelera sa snagom glavnog motora

UVOD

U 1906. godini praktično jedini tip brodskog propulzionog kompleksa u upotrebi za pogon trgovačkih brodova bila je stapna parna mašina i Škotski parni kotao. Ugalj je bio univerzalno korišćeno gorivo sa potrošnjom od 1.5 do 2lb uglja po konjskoj snazi na sat.

U 1941. godini, dakle 35 godina kasnije brodomašinsko inženjerstvo doživelo je radikalno poboljšanje u ekonomiji i mnogi novi tipovi brodskih propulzivnih kompleksa su uvedeni u upotrebu. Kao novo gorivo nafta, je brzo potisnula ugalj iz upotrebe. Danas je veliki procenat novih parnih brodova pogonjen sa parom dobijenom iz vodocevnih Škotskih kotlova.



	Pritisak na manometru	Vacuum	Broj obrtaja propelera	Specifična težina pogonskog kompleksa	Potrošnja goriva
		inch	o/min	lb/hp	lb/KS hour
Parna klipna mašina, ugljem loženi Škotski vodocevni kotao. Pregrejana para.	200-250	25-27	75-85	500	1.95
Parna klipna mašina, naftom loženi Škotski vodocevni kotao. Pregrajana para.	200-250	25-27	75-85	500	1.2
Turbina sa reduktorom, naftom loženi vodocevni kotao	450	28.5	90	200-300	0.6
Turbina sa reduktorom, naftom loženi ekspresni vodocevni kotao	450-600	28	350-450	40	0.65
Dizel motor			90	500-600	0.38
Dizel motor sa reduktorom			90	300-400	0.38

Tabela 1. Tabela težina, potrošnje goriva različitih tipova pogonskih kompleksa

OPIS POSTOJEĆIH PROPULZIVNIH BRODSKIH KOMPLEKSA

Za početak potrebno je objasniti vezu između naslova rada i podnaslova. Kada se govori o brodskim pogonskim kompleksima onda je neophodno da se razmotri ponašanje propelera i njegova interakcija sa propulzivnim kompleksom. Bez razmatranja ove interakcije nije moguće sagledati sve osobine propulzivnog kompleksa niti njegov uticaj na ekonomičnost plovidbe datog broda na datoj ruti.

Svaki brodski propulzivni kompleks sačinjavaju sledeći elementi:

- Prvi i glavni elemenat brodskog propulzivnog kompleksa je uređaj koji toplotnu energiju transformiše u mehaničku energiju rotacije brodskog propelera. Taj uređaj zovemo pogonski motor i danas su na brodovima u upotrebi dizel, elektro i u vrlo maloj meri
- hidro motori. Osnovni razlog za malu zastupljenost hidro motora je velika cena i postojanje velikih transmisionih gubitaka, koji mogu dostići vrednost od 30%.
- Drugi elemenat brodskog propulzivnog kompleksa je transmisioni sistem koji proizvedenu energiju pogonskog motora prenosi do potrošača. Danas su u upotrebi u najvećoj meri tzv. direktni mehanički transmisioni sistem koji se sastoji od odgovarajućeg broja među vratila,

uležištenih u pripadne klizne ležaje, statvenom cevi, skroknim ležajem i izlazom propelerskog vratila na čijem je kraju uklinjen propeler.

- Treći elemenat brodskog propulzivnog kompleksa je potrošač proizvedene mehaničke energije. Njegov zadatak je da isporučenu mehaničku energiju transformiše u strujni mlaz okolnog fluida čija reakcija predstavlja silu koja pokreće brod.

Kako danas u praksi postoje dva tipa pogonske mašinerije i to dizel motori i turbine u ovom radu se nećemo osvrnuti na parne klipne mašine koje su pre tridesetak godina potpuno izbačene iz upotrebe zbog svoje velike težine, velikih gabarita kao i velike specifične potrošnje goriva.

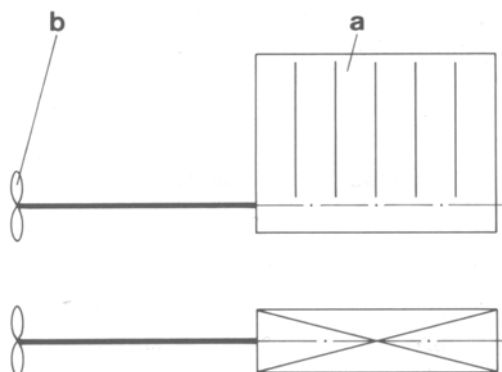
Kombinacijom različitih pogonskih motora i različitih sistema transmisije stvoren je veliki broj različitih tipova pogonskih kompleksa kao što su:

- Direktni dizel propulzivni kompleks sa ili bez reduktora koji se u najvećoj meri susreće gotovo na svim pomorskim brodovima, kao i na brodovima unutrašnje plovidbe bez izuzetaka. Stepenn transmisio-nih gubitaka ovog pogonskog kompleksa je reda veličine 0.98.
- Kod ovog pogonskog kompleksa reduktor služi da redukuje brzinu rotacije pogonskog motora kako bi se postigao optimalni stepenn korisnosti propelera. Ovaj pogonski

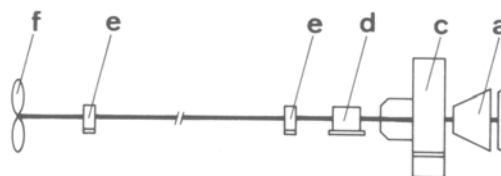
kompleks se često koristi kod brodova koji plove na ograničenim akvatorijama i prinuđeni su da vrlo često manevrišu. Ukoliko bi se za preokretanje smeru rotacije propelera koristio prekretni motor potrebno bi bilo više od 40 sekundi, što je za ovu vrstu brodova neprihvatljivo. Zato se preokret kod ovih brodova obavlja pomoću reduktora prekretnika i tada je moguće obaviti preokret propelera za oko 15 sekundi. Danas postoji veliki broj tipova reduktora, npr. sa jednim ili više ulaznih i izlaznih vratila, kao i sa većim brojem kombinacija oduzimača snage tako da se

sa njima može formirati veliki broj varijanata unutar ove grupe.

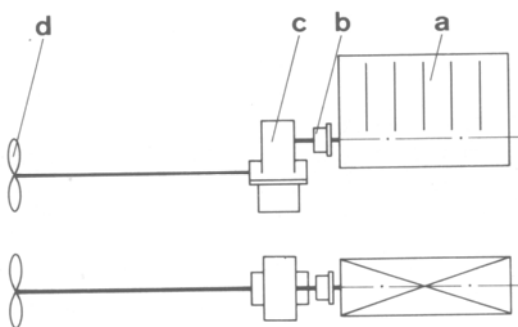
- Dizel propulzivni kompleks sa električnom transmisijom kojeg kraće zovemo dizel električni propulzivni kompleks
- Dizel propulzivni kompleks sa hidrostatičkom transmisijom, koji nije od nekog većeg značaja jer je skup, poseduje visok stepen transmisionih gubitaka (0.6 – 0.85) i ograničen je na vrlo male snage (150-200kW).
- Turbinski propulzivni kompleks sa mehaničkom ili električnom transmisijom, tzv turbo mehanički ili turbo električni propulzivni kompleks.



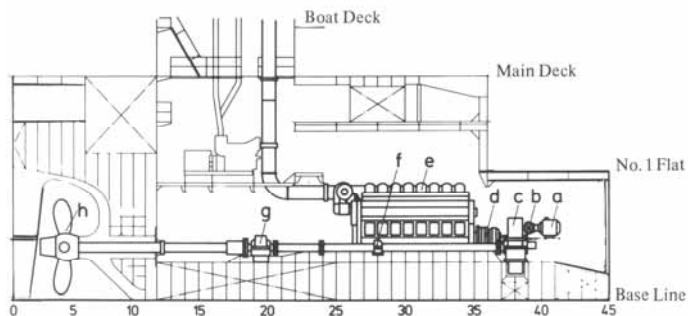
Slika 1. Direktni dizel propulzivni kompleks bez reduktora
a) dizel motor; b) propeler fiksnog koraka



Slika 3. Turbinski propulzivni kompleks sa mehaničkom transmisijom) parna turbina; c) reduktor; d) odzivni ležaj vratilnog voda; e) ležaj vratilnog voda; f) propeler fiksnog koraka



Slika 2. Direktni dizel propulzivni kompleks sa reduktorom
a) dizel motor; b) elastična spojnica; c) reduktor; d) propeler fiksnog koraka



Slika 4. Pogonski kompleks kontejnerskog broda "Sloman Royal"
a) hidrostatička pumpa za pramčani propeler; b) elastična spojnica; c) reduktor sa dva ulaza i jednim izlazom; d) kuplung spojnica; e) dizel motor; f) ležaj vratilnog voda; g) odzivni ležaj vratilnog voda; h) propeler fiksnog koraka

Zahvaljujući brzom razvoju energetske elektronike napravljen je gotovo revolucionarni progres u propulziji brodova, odnosno u brodskim transmisionim sistemima. Ovaj novi transmisioni sistem nosi u sebi velike kako ekonomske, tako i tehničke potencijale koji danas još nisu dovoljno prostudirani, tako da ovaj rad ima između ostalog cilj da ove potencijale makar deskriptivno opiše i da dodatno zainteresuje svetsku brodograđevnu teoriju i praksu. Očekujemo da će ovaj novi transmisioni sistem za nekoliko godina u potpunosti istisnuti najmasovniji korišćen sistem direktne transmisije. Potvrdu za ovakvu tvrdnju imamo u činjenici da su svi veliki putnički brodovi za krstarenja, izgrađeni poslednjih godina u svetu opremljeni sa ovim novim transmisionim sistemom. U zavisnosti od sprege sa pogonskim motorima razlikujemo dizel-električni propulzivni kompleks (sprega sa dizel motorima) i turbo-električni propulzivni kompleks (sprega sa turbinom).

Pri izboru propulzivnog kompleksa brodovlasnici trgovačkih brodova na Zapadu su razmatrali određeni broj uticajnih faktora koje navodimo u daljem tekstu, ali koji nisu poređani po važnosti.

1. Pouzdanost i inženjerski rizik
2. Plovidbena ruta
3. Dužina neprekidne plovidbe ili akcioni radijus koji utiče na kapacitet tankova goriva
4. Luke u kojima se obavlja bunkerisanje goriva, vrsta i cena goriva
5. Mesta mogućeg obavljanja remonta
6. Procenat vremena koje brod provodi u luci
7. Prosečna temperatura vazduha i mora
8. Potrebna snaga pogonskog kompleksa zavisno o veličini broda i potrebne brzine broda
9. Težina pogonskog kompleksa
10. Težina goriva za datu dužinu putovanja
11. Prostor koji zauzima pogonski kompleks – faktor koji utiče na kapacitet skladišta i tonažnu izmeru broda
12. Broj propelera i njihova brzina obrtanja – faktor koji utiče na efikasnost propelera
13. Zahtevi za ekonomičnost pri promenjenoj brzini plovidbe
14. Sposobnost manevrisanja
15. Nivo generisane buke i vibracije
16. Tip broda

Od navedenih uticajnih faktora najvažniji je svakako pouzdanost koja može izazvati ne samo zastoje u plovidbi već povećava i operacione troškove, utiče na vreme obavljanja ture, kao i na reputaciju broda brodske kompanije. Na osnovu obavljenih teorijskih proračuna koji su potkrepljeni analizom standardnih i eksperimentalnih ispitivanja brodskih propelera u slobodnoj vožnji eksplicitno proizilazi da je najvažniji uticajni faktor onaj naveden pod brojem 13. Dobro je poznato da se brzina kretanja broda dobija kao tačka preseka krive otpora i propelerske krive, na osnovu čega proizilazi da se promena brzine može ostvariti promenom otpora ili promenom proizvedenog potiska propelera. Smanjenje brzine broda može biti voljno ili nevoljno. Voljno smanjenje brzine broda nastupa kada kapetan npr. proceni da vremenske prilike mogu ugroziti stabilnost broda ili izazvati oštećenje njegove konstrukcije. Nevoljne promene brzine kretanja broda nastaje kao promena vlastitog otpora kretanja, npr. kada brod pri svojoj plovidbi naiđe na područje gde je dubina mora ograničena odnosno kada dolazi do povećanja otpora broda zbog uticaja plitke vode. Treba napomenuti da ovaj efekat zavisno od dubine i brzine broda može dovesti do drastičnog povećanja otpora broda. Drugi razlog nevoljne promene brzine kretanja broda nastaje kada npr. brod nema dovoljno tereta na raspolaganju tako da se brod ne može nakrcati do gazne marke, kao i kada brod iskrca deo svog tereta u nekoj usputnoj luci a kapaciteti balastnih tankova nisu dovoljni da iskrcanu količinu tereta nadomesti tečnim balastom.

PONAŠANJE PROPELERA SA FIKSNIM KRILIMA PRI PLOVIDBI U BALASTU

Pre svega potrebno je objasniti šta znači plovidba broda u stanju balasta.

Svi brodovi zahtevaju odgovarajući zaronaj da bi se obezbedila plovnost. Ako nemamo dovoljno korisnog tereta neophodno je ukrcati balast. Sve do pojave čeličnih parnih brodova, balast je bio u čvrstom stanju, obično pesak ili šljunak. Utovaranje i istovaranje ovakvog balasta je bilo skupo. Sredinom 70-tih godina 19. veka se uvodi dvodno kao strukturni deo brodske konstrukcije. Pojava dvodna uz korišćenje tada dostupnih parnih pumpi omogućilo je korišćenje morske vode kao balasta. Balastni tankovi su obično bili smešteni u dvodnu, pramčanom i krmenom piku. Kapaciteti ovih tankova nisu bili

uvek dovoljni za uronjaj celog prečnika sporo obrtnog propelera.

Za mnoge teretne brodove, deo vremena koji su provodili u balastu je bio procentualno mali (brodovi koji su u jednom smeru plovidbe prevozili uglj, a u drugom smeru žitarice). Problemi su se mogli dogoditi kada se sa pražnjenjem tankova goriva tokom plovidbe smanjivala masa broda što je izazivalo izranjanje broda. Izuzimajući problem deformacija zakovica usled sleminga, najozbiljniji problem je bio lom propelerskog vratila zbog zaletanja motora. Ovo zaletanje motora je karakteristično za slučaj kada propeler značajno izroni iz vode što dovodi do naglog rasterećenja propelera. Raniji radovi o balastiranju, kao što je Tharle-ov rad iz 1903. godine [1.], su preporučivali dodatni kapacitet balastnih tankova, čime se smanjivao korisni teretni prostor što nije bilo po volji brodovlasnika.

Noviji tipovi brodova kao što su tankeri za naftu i brodovi za prevoz rude obično su provodili polovinu svog radnog veka u balastu. U slučaju tankera balast se krcao u teretne tankove kada bi brod plovio prazan. Iako je dostupnog prostora za utovar balasta bilo u izobilju, javljali su se problemi korozije i zagađenosti kada su se teretni tankovi koristili za balast. Uvođenje dizel propulzije 30-tih godina 20. veka dovelo je do smanjenja veličine potrebnih tankova goriva. U slično vreme se pojavilo i varenje kao nova tehnologija spajanja oplata i ostalih delova konstrukcije broda. Ove dve novine su znatno uticale na smanjenje deplasmana neopterećenog broda, tako da su se za balastiranje koristili dodatni duboki tankovi i to krcanjem balasta u prazne tankove goriva.

Jedan od nekoliko radova koji su diskutovali o osobinama balasta je bio BOCLER-ov rad [2.] iz 1942. godine. On je u ovom radu dao preporuku za gaz na pramcu od najmanje $0.025 - 0.03 \times L$ (L – dužina broda) i za uronjaj propelera od najmanje 80% njegovog prečnika.

Posle rata dodatni kapaciteti balasta su se dobili korišćenjem nepristupačnih prostora na brodu kao tankova balasta (npr. Tuneli vratilnih vodova) i dubljim dvodnima ispod pramčanih skladišta. Ponekad su se koristili i tankovi na palubi, a imali su dodatnu prednost što su smanjivali metacentarsku visinu u balastu.

Ekspanzija brodova za rasuti teret 60-tih godina prošlog veka nije dovela do posebnih problema sa balastiranjem. Kapaciteti tankova u dvodnu

su se povećali kao posledica korišćenja levkastih oblika bokova teretnih skladišta (zbog lakšeg istovara zrnastog tereta). Kapaciteti balastnih tankova je uvećan i upotrebom tkz. wing tankova u vrhovima dvoboka. Takođe je bio čest slučaj da se projektuje jedno skladište u srednjem delu broda koje se moglo koristiti i kao duboki tank balasta. Na ovaj način se obezbeđivao dodatni uronjaj posebno pri plovidbi u teškim vremenskim uslovima. Kod ovih brodova kod plovidbe u balastu, uzdužna čvrstoća postaje potencijalni problem usled uvećanih momenata savijanja i smičućih sila.

Kod svih tipova brodova za generalni teret, posebno lajnera koji su retko kad potpuno bez tereta, vodeni balast se može koristiti za trimovanje i popravljavanje stabiliteta. U slučaju kontejnerskih brodova, da bi se ukrcao maksimalni broj kontejnera na palubu balastiranje je obavezno zbog postizanja zadovoljavajućeg stabiliteta. Kod RO-RO brodova vodeni balast može biti neophodan da bi se smanjio krceni trim.

Krcanje balasta u teretne tankove kod tankera ili u tankove goriva kod drugih brodova je danas dozvoljeno samo u slučaju nužde. Posebni tankovi za balast i tečni teret se danas zahtevaju po pravilima IMO MARPOL konvencije. Kapacitet posebnih balastnih tankova mora biti takav da uroni brod i njegov propeler na srednjem gazu od $2 + 0.02 \times L$ [m] pri čemu trim ne sme preći 1.5% od L .

Današnji problem nije toliko u projektovanju brodova sposobnih da se balastiraju na odgovarajući gaz u teškim vremenskim uslovima, već u projektovanju dovoljno fleksibilno upravljivih balastnih sistema. Sa ovakvim sistemom se može obezbediti najekonomičniji gaz i trim za pretežne (najčešće) vremenske uslove. Normalni uslovi za plovidbu često omogućavaju plići gaz. Ovo dovodi do smanjenja okvašene površine broda, a time i smanjenje otpora broda što značajno povećava uštede goriva.

Brodovi za rasuti teret provode značajan deo svog radnog veka u balastu. Veći brodovi koji uglavnom prevoze rudu, uglj i žitarice provode od 40% do 50% svog veka u balastu.

Manji brodovi koji mogu prevoziti više vrsta tereta provode u balastu 30% do 40% svog vremena.

U radu [3.] se kaže da je brzina broda u balastu za 1 do 1.5 čvor veća nego brzina opterećenog

broda. Takođe je tu pokazano da se optimalna brzina u balastu postiže sa istom potrošnjom goriva koja daje optimalnu brzinu opterećenog broda. Brzina broda u službi se određuje u zavisnosti od vozarina i cene goriva na tržištu.

Propeler se projektuje za uslove opterećenog broda, ali sa površinom krila uvećanom da zadovolji smanjenje urona propelera u uslovima balasta. Ovo je potrebno uraditi da bi se sprečio početak kavitacije na krilu propelera. Korak propelera se u nekim slučajevima određuje kao kompromisno rešenje između uslova rada u opterećenom stanju i u stanju balasta.

Važan aspekt osobina broda na različitim gazovima u različitim uslovima plovidbe je da smanjenje deplasmana dovodi do smanjenja neophodne snage za održavanje potrebne brzine. Ovo je prikazano na slici 15. [3.]

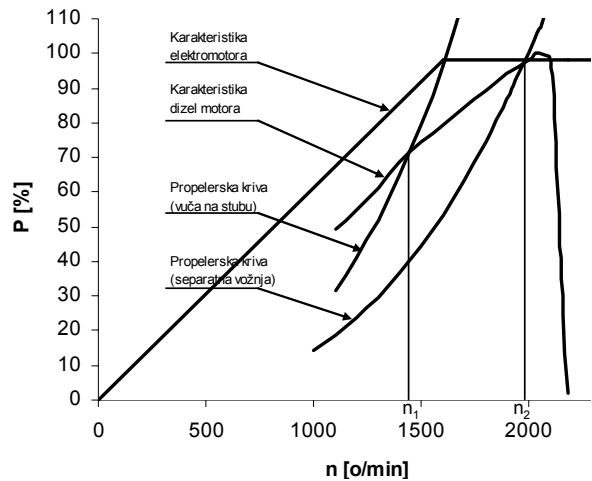
DIZEL ELEKTRIČNI BRODSKI POGONSKI SISTEM

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.

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



Slika 5. Normalizovan dijagram opterećenja pogonskih mašina i propelerskih krivih

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

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
- nema pomoćnih agregata (napajanje brodske mreže preko pogonskih generatora)
- manja buka i vibracije, jer se agregati postavljaju na mestima gde nema ljudi

EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE PONAŠANJA PROPELERA FIKSNOG KORAKA PRI PROMENI BRZINE BRODA

U nemogućnosti da teorijski istražimo ponašanje propelera fiksnog koraka pri promeni brzine plovidbe iskorišćena su modelska ispitivanja propelera u slobodnoj vožnji.

Ako je pogonski motor u stanju da razvije nominalnu snagu i ako je transmisioni sistem u stanju da ovu snagu prenese do propelera, onda je za ekonomiju pogona najodgovorniji propeler sa svojom sposobnošću ili nesposobnošću da isporučenu snagu transformiše u

propelerski mlaz odnosno silu koja pokreće brod. Iz teorije i prakse dobro je poznato da je propeler datog fiksnog koraka u stanju da apsorbuje raspoloživu snagu i proizvede potrebni potisak samo i isključivo samo ako brod plovi brzinom za koju je propeler projektovan. Ako je brzina broda veća od brzine za koju je propeler projektovan onda taj propeler nije u stanju da apsorbuje ponuđenu snagu odnosno propeler opterećuje motor sa njegovom nominalnom snagom. Ukoliko je brzina broda manja od brzine za koju je propeler projektovan onda taj propeler pri nepromenjenoj brzini rotacije traži veću snagu od ponuđene da bi održao datu brzinu rotacije, odnosno propelere u ovom slučaju preopterećuje pogonski motor.

Oba slučaja imaju veliki uticaj na ekonomičnost rada motora kao i na vek trajanja motora.

Kod rasterećenja pogonskih motora brod nije u stanju da razvije nominalnu brzinu pa stoga nije u stanju ni da u predviđeno vremenu obavi predviđeno putovanje.

Da bi uspostavili funkcionalnu zavisnost između promene brzine plovidbe i veličine propelerom apsorbovane snage iskorišćeni su rezultati ispitivanja brodskih modela prikazanih u formi odgovarajućih polinoma za veliki broj propelera različitih geometrija.

Pored toga imali smo na raspolaganju rezultate probne vožnje lučkog remorkera, izgrađenih u bivšem Brodogradilištu "Tito" u Beogradu, instalisane snage 2310ks (1723kW) opremljenog prekretnim propelerom prečnika 2.9m.

Probne vožnje su uključivale merenja pri brzini nula, odnosno ispitivanje maksimalne vrednosti vučne sile na stubu, pa sve do maksimalne

brzine od 13.4kn ili tzv. brzine u separatoj vožnji. Za svaku brzinu korak propelera je podešavan sve dok propeler ne bi apsorbovao svu raspoloživu snagu. Za šest različitih vrednosti koraka propelera, uzetih iz rezultata probne vožnje remorkera, izračunata je apsorbovana snaga kao i brzina plovidbe za nominalni broj obrtaja od $n = 2000/\text{min}$.

Dostiziva brzina plovidbe remorkera određena je na presečištu krive predate snage propelera dobijene iz Wageninških polinoma i odgovarajuće krive otpora remorkera. Tako izračunate krive apsorpcije za šest različitih koraka propelera ucrtane su u dijagram u kojem je debljom linijom predstavljena kočiona karakteristika datog motora (Slika 6).

Očitavanjem vrednosti apsorbovanih snaga i postignutih brzina za izračunatih 6 slučajeva omogućila je da se očitane vrednosti uvrste u pretpostavljenu eksponencijalnu zavisnost

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^n,$$

gde je:

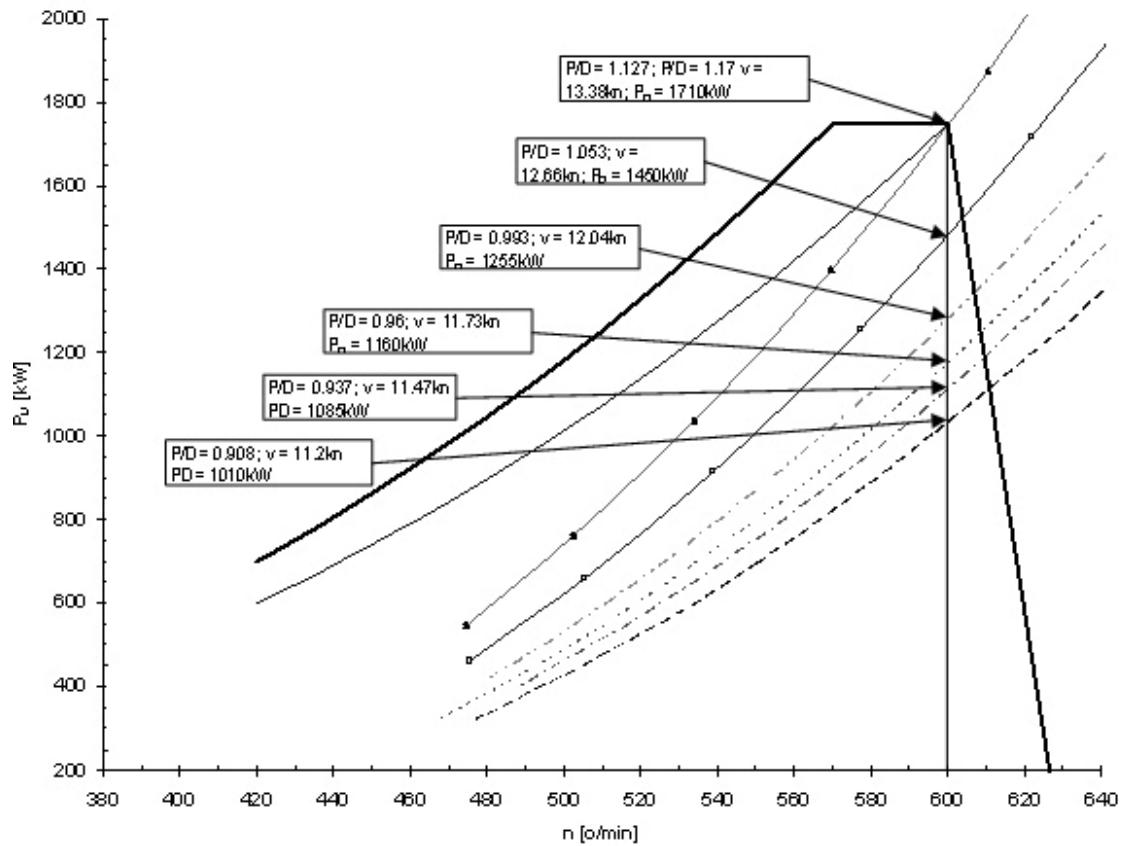
P_2 – nominalna snaga

v_2 – brzina pri nominalnoj snazi

P_1 – snaga koju apsorbuje propeler pri brzini v_1

v_1 – trenutna brzina plovidbe

Za očitane vrednosti eksponent n se kretao od 2.931 - 2.982, pa je zaključeno da eksponent $n=3$ daje dobru aproksimaciju ove funkcionalne veze koju je potrebno i teorijski dokazati.



Slika 6. Prikaz apsorbacije propelera fiksnog koraka zajedno sa kočionom krivom motora

J	v [m/s]	v [kn]	v [km/h]	K_T	K_Q	K_{Tn}	η_0	Q [Nm]	P_D [kW]
0	0.000	0.000	0.000	0.62	0.0565	0.323	0	155805	3589.5
0.05	0.532	1.034	1.914	0.587	0.0563	0.292	0.083	155253.4	3576.8
0.1	1.063	2.067	3.828	0.557	0.056	0.263	0.158	154426.2	3557.7
0.15	1.595	3.101	5.742	0.527	0.0555	0.235	0.227	153047.4	3526.0
0.2	2.127	4.134	7.656	0.49	0.0549	0.209	0.289	151392.8	3487.8
0.25	2.658	5.168	9.570	0.471	0.054	0.184	0.347	148910.9	3430.7
0.3	3.190	6.201	11.484	0.443	0.053	0.161	0.399	146153.3	3367.1
0.35	3.722	7.235	13.398	0.416	0.0518	0.14	0.447	142844.2	3290.9
0.4	4.253	8.269	15.312	0.388	0.0504	0.12	0.49	138983.5	3202.0
0.45	4.785	9.302	17.226	0.36	0.0488	0.101	0.528	134571.4	3100.3
0.5	5.317	10.336	19.140	0.331	0.047	0.084	0.56	129607.7	2985.9
0.55	5.848	11.369	21.054	0.301	0.045	0.067	0.586	124092.5	2858.9
0.6	6.380	12.403	22.968	0.27	0.0427	0.05	0.604	117749.9	2712.8
0.65	6.912	13.436	24.882	0.237	0.0401	0.033	0.611	110580.2	2547.6
0.7	7.443	14.470	26.796	0.202	0.0373	0.016	0.603	102858.9	2369.7
0.75	7.975	15.503	28.710	0.165	0.0342	-0.002	0.575	94310.26	2172.8
0.8	8.507	16.537	30.624	0.125	0.0308	-0.021	0.518	84934.39	1956.7
0.85	9.038	17.571	32.538	0.083	0.0271	-0.042	0.415	74731.23	1721.7
0.9	9.570	18.604	34.452	0.038	0.0231	-0.063	0.234	63700.79	1467.6

Slika 7. Parametri fiksnog propelera za $P/D = 1.17$

Iz dijagrama datog na slici 6 primetno je da je samo propeler koraka od $P/D = 1.17$ u stanju da pri $n = 200$ o/min apsorbuje svu raspoloživu snagu pogonskih dizel motora u iznosu od 1723kW. Smanjenjem koraka propelera opada i vrednost apsorbovane snage, pa tako imamo da propeler fiksnog koraka sa omerom koraka $P/D = 1.053$ pri nepromenjenoj brzini rotacije apsorbuje 1450kW, tako da propeler ne apsorbuje oko 260kW što predstavlja rasterećenje motora od oko 15%. Daljim smanjenja koraka za $P/D = 0.993$ i $n = 200$ o/min propeler je u stanju da apsorbuje samo 1255kW, što predstavlja rasterećenje motora od oko 36%. Najdrastičniji slučaj nastupa kada je korak propelera $P/D = 0.937$ i tada propeler apsorbuje samo 60% od nominalne snage motora. Ovo rasterećenje nastaje kao posledica redukcije brzine broda za približno 2.5kn. Brodovlasnici suočeni sa ovom činjenicom da bi ekonomičnost i pri promeni brzine plovidbe bili su prinuđeni da na svoje brodove ugrađuju propelere promenljivog koraka. Ugradnja ovih propelera nije ni malo jednostavna, jer traži ugradnju šupljeg vratila od motora do glavčine propelera, zatim ugradnju

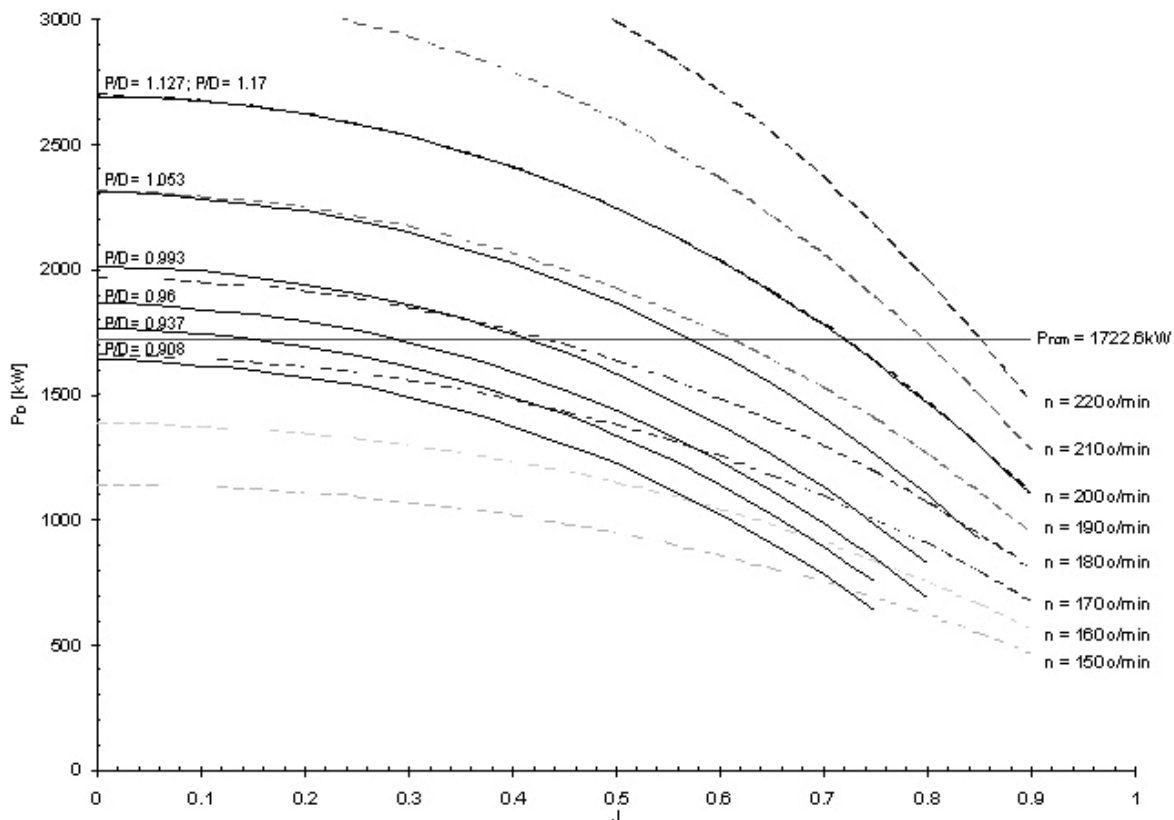
mehanizma za promenu koraka kao i ugradnju posebnog tanka za smeštaj hidrauličkog ulja kojim se preko odgovarajućeg hidrauličkog sistema vrši daljinska regulacija koraka propelera. Ovaj uređaj iziskivao značajno povećanje investicione cene broda kao i operativnih troškova broda.

Prema najjednostavnijoj impulsnoj teoriji propelerskog delovanja promena veličine apsorbovane snage može se objasniti promenom veličine napadnog ugla pod kojim fluid udara u profil krila propelera, što je identično promeni skliza propelera. Jasno je da će promena napadnog ugla profila izazvati i promenu uzgonske sile i otpora profila. Skliz profila definisan je sledećim izrazom

$$s_r = 1 - \frac{v_A}{P \cdot n}$$

gde je P - korak propelera a n broj obrtaja.

Iz ovog izraza proizilazi da se skliz propelera odnosno napadni ugao brzine fluida na profil krila propelera može promeniti promenom koraka propelera kao i promenom broja obrtaja.



Slika 8. Apsorbcija snage fiksnog propelera ($P/D = 1.17$) pri različitim brzinama obrtanja

Uočava se da propeler koraka $P/D = 0.908$ za $n = 200$ o/min nije bio u stanju da apsorbuje nominalnu snagu motora, dok je povećanjem broja obrtaja na $n = 220$ o/min apsorbovao nominalnu snagu motora od 1723kW.

REZULTATI ISPITIVANJA VLASTITOG PROTOTIPA DIZEL ELEKTRIČNOG POGONA MALE SNAGE SA PRSTENASTIM PROPELEROM

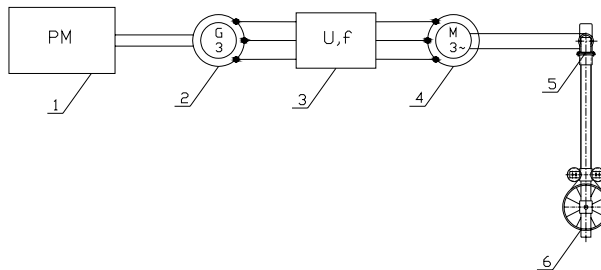
Da bi se uverili u prednosti koje ima dizel električni pogon, prema definiciji dizel električni pogon zovemo onaj pogon kod kojeg elektromotor pogoni direktno propeler preko odgovarajućeg kratkog vratilnog voda nudi odlučili smo da izradimo vlastiti prototip ovog pogona i da ga ispitamo. Budući da bismo raspolagali nikakvim finansijskim sredstvima to smo morali da izradimo prototip sa minimalnom cenom koštanja i da za njegovu realizaciju koristimo na raznim mestima pozajmljena sredstva.



Slika 9. Čamac sa ugrađenim dizel motornim agregatom i naponsko frekventnim invertorom postavljenim na vrhu agregata

Kao prvo prototip je morao biti izuzetno male snage kako bi mu cena bila što niža. kao drugo primenili smo za transmisiju snage od elektromotora do propelera kaišni pogon sa ozubljenim kaišem, kao najjeftiniji, a dovoljno siguran transmisioni sistem.

Da bi se kaišni sistem transmisije mogao primeniti, morali smo, umesto klasičnih propelera da primenimo propelere sa prstenom u formi aero profila čvrsto fiksiranim na vrhu krila kojega u stručnoj literaturi zovu ring propeller.



Slika 10. Šematski prikaz komponenata električne transmisije od SUS motora do prstenastog propelera (1-pogonski SUS motor; 2-trofazni generator; 3-invertor; 4-asinhroni motor; 5-kaišni prenos; 6-prstenasti propeler)

Da ne bi ova kombinacija bila tržišno konkuretna, morali smo razviti metod proračuna ovakvih propelera, kako bi se ubedili da su performanse ovakvog propelera dovoljno bliske performansama klasičnih propelera. Tek kada smo se u ovo uverili pristupili smo izradi prototipa.

Elektromotor je trofazni, asinhroni, proizvođača "Sever" iz Subotice.

Osnovni podaci elektromotora su:

- | | |
|--|-----------------------|
| • Tip | 2.ZK 112 M-2 |
| • Nominalna snaga | 4 kW |
| • Nominalni broj obrtaja | 2830min ⁻¹ |
| • Stepen iskorišćenja | 0.82 |
| • Faktor snage | 0.93 |
| • Nominalna struja | 7.8 A |
| • Nominalni moment | 13 Nm |
| • Odnos polazne i nominalne struje | 7.6 |
| • Odnos polaznog i nominalnog momenta | 3.2 |
| • Odnos maksimalnog i nominalnog momenta | 3.3 |
| • Klasa rotora | KR 16 |
| • Mehanička zaštita | IP 54 |
| • Masa | 24 kg |

Prenos snage se vrši preko zupčastog kaiša. Broj zuba na pogonskom zupčaniku iznosi 22 a na pogonjenom 62. Prenosni odnos je 2.82.



Slika 11. Prstenasti propeler

Prstenasti propeler je trokraki, sa korakom 0.9. Spoljašnji prečnik propelera iznosi 201mm a unutrašnji 180mm.

Invertor je trofazni, proizvođača Control Technics, tip Commander SE, za motore snage 0.75 to 7.5 kW. Osnovni podaci su:

- Tip SE23200750
- Broj ulaznih faza 3
- Nominalni ulazni napon (+-10%) 200-240 V
- Nominalna snaga 7.5 kW
- Nominalna snaga 10 hp
- Nominalni broj obrtaja 3000min⁻¹
- Nominalna struja 28.5 A
- Kratkotrajna struja (150%) 42.8 A

Kada je nabrojana oprema teškom mukom nabavljena izrađen je prstenasti propeler i nabavljen nazubljeni kaiš. Onda je sva oprema ugrađena na jedan plastični čamac dužine 5.5 metara, širine 1.1m, proizvođač čamca je Hins Novi Sad.

Na slici 7 vidi se izgled čamca sa ugrađenim dizel motornim agregatom i naponsko frekventnim invertorom postavljenim na vrhu agregata. Nakon montaže svih nabrojanih elemenata pristupilo se merenjima svih relevantnih parametara električnog pogona u toku vožnje po Dunavu. Probna ispitivanja su izvršena kako u toku plovidbe maksimalnom brzinom, tako i u toku merenja pri brzini nula t.j. sa čamcem privezanim za kuku.

f (Hz)	F (N)	V (V)	I (A)
15	50	120	2,9
25	80	182	3,1
35	130	270	3,4
45	210	342	3,9
55	270	372	4,2
65	450	350	7,2

Tabela 2. Izmerene vrednosti električnih parametara

ZAKLJUČAK

Funkcionalna zavisnost apsorbovane snage propelera i relativne promene brzine broda data na strani 6 ovog rada dobijena je numeričkom analizom određenog broja propelera fiksnog koraka. Da bi data funkcionalna zavisnost mogla biti opšte prihvaćena potrebno je dobiti verifikaciju bazena za ispitivanje brodskih modela. Prema preliminarnoj funkcionalnoj zavisnosti proizilazi da je opadanje apsorbovane snage promenom brzine broda vrlo veliko, nezavisno od uzroka koji su ovu

promenu brzine uzrokovali. Podsetimo se da promena brzine broda može nastati kao posledica plovidbe u teškim vremenskim uslovima ili smanjenja deplasmana broda zbog nedostatka tereta tj. plovidbe u balastu. Nema potrebe dokazivati kako redukcija apsorbovane snage snažno utiče na ekonomičnost plovidbe broda kao i racionalnog korišćenja energije. Iz gornjeg proizilazi da se ekonomična plovidba ne može ostvariti bez usklađivanja propelera i pogonske mašine.

Da već i mala promena brzine broda vrlo snažno utiče na ekonomiju broda zato što se apsorpcija propelera menja čak sa trećom potencijom relativne brzine, bez obzira da li je ova promena brzine uzrokovana zbog plovidbe u teškim vremenskim prilikama, zbog plovidbe u balastu ili zbog uticaja plitke vode.

Nije moguće obezbediti ekonomičnost plovidbe broda bez obezbeđenja ekonomije pogonskog kompleksa.

Ekonomija pogonskog kompleksa, na sadašnjem nivou tehničkog razvoja, može se obezbediti ugradnjom odgovarajućeg propelera sa promenljivim korakom ili ugradnjom odgovarajućeg dizel električnog sistema sa tristorским naponsko frekventnim konvertorima. U prvom slučaju usaglašavanje pogonskog motora i propelera se postiže odgovarajućom regulacijom koraka propelera, a u drugom slučaju se usaglašavanje propelera i pogonskog motora obavlja promenom brzine rotacije propelera fiksnog koraka pri nepromenjenom broju obrtaja pogonskog motora.

Treba napomenuti da je ovaj drugi način investiciono povoljniji i pored usaglašavanja propelera nudi određene povoljnosti koje su u radu pomenute.

Imajući sve ovo u vidu nameće se jedan vrlo smeo i možda preuranjen zaključak da je vreme gradnje broskog pogonskog kompleksa direktnom transmisijom i propelerom fiksnog koraka na izmaku i da će se u buduće graditi brodski kompleksi isključivo sa elektro pogonom i regulacijom frekvencije preko naponsko frekventnih konvertora.

Rezultati ispitivanja prototipa prstenastog propelera sa električnim pogonom su u toj meri povoljni da, kada bi se ispitivanja provela i u području viših snaga i kada bi se dobila verifikacija odgovarajućih međunarodnih klasifikacionih društava bili bi u stanju da našim brodarima i brodograditeljima ponudimo rešenje

propulzije i kormilarenja koje je nekoliko puta jeftinije od postojećeg sistema propulzije i kormilarenja. Sa ovim rešenjem naši brodari i brodograditelji bi mogli da budu mnogo konkurentniji na svetskom tržištu. Za realizaciju ovog projekta potrebno je obezbediti mala finansijska sredstva i ako odgovorni u ministarstvu za nauku i zaštitu okoline ovo pročitaju i pokažu svoju zainteresovanost mi ćemo sa zadovoljstvom izraditi specifikaciju potrebnih sredstava.

LITERATURA:

- /1/ Grobmann G. "Auslegung der Hauptmaschine für Schwerwetter auf der Grundlage von Bordmessungen", Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft 73-79, 83. Band, 1989
- /2/ Chapman L.B., "The marine power plant", McGraw-Hill Book Company, Inc, New York and London, 1942.
- /3/ Buxton I.L., Logan J.A. "The ballast performance of ships with particular reference to bulk carriers", Transactions RINA, Volume 129, 1987.
- /4/ Gallin C., Hiersig H., Heiderich O., "Ships and their propulsion system", Lohmann&Stolterfoht GmbH, Witten – West Germany

NUMERICAL ANALYSIS OF ABSORBED POWER REDUCTION OF THE FIXED PITCH PROPELLER WHILE THE SHIP IS OPERATING AT "OFF" DESIGN SPEED

In this paper the economy of the different marine plants is elaborated. Particular attention is given to the elaboration of the propeller power absorption dependence at the different operational speed independently of its size and design speed. In order to simplify the definition of Marine Power Plant Economy (MPPE) it's

suitable to introduce the new technical term, new at least for the domestic ships theory and practice.

In the domestic professional literature we name it "usklađivanje" which we use to define possibility of fixed pitch regulation in such way to make it capable to absorb all available main engine power.

In the German professional literature is named "anpassung fixed pitch propeller and haupt machine" /1/. German colleagues use more adequate definition of this technical term "anpassung fixed pitch propeller and haupt machine" in such way that the ship is consuming minimum fuel per sailed mille.

In the English professional literature probably named "adjusting" fixed pitch propeller and main engine in such way to minimize the fuel consumption.

On up to date technological level enables MPPE to be achieved either by installing adequate CPP or installing the diesel electric power plant.

In the first case the controlling of the MPPE is achieved by the adequate controlling of the propeller pitch, while in second case controlling of MPPE is achieved by the adequate controlling propeller rotational speed by means of frequency voltage converter.

It seems that the second alternative has lower purchasing cost and more over offers many other advantages which are mentioned in this paper.

Key words: diesel electric marine power plant, controllable pitch propeller (CPP), adjusting of the propeller with main engine power