

KAKO I KOLIKO SE POTROŠNJA GORIVA NA BRODOVIMA MOŽE SMANJITI SA DIZEL ELEKTRIČNOM PROPULZIJOM (DEP)?

Prof. dr Branislav Bilen, dipl. inž .
Mašinski fakultet, Beograd

Prof. dr Zoran Nikolić, dipl. inž .
Institut GOŠA, Beograd

Svetske rezerve tekućeg goriva su sve manje, tako da svaki deo procenta uštede ima veliki značaj kako u pogledu uštede nafte, tako i u pogledu smanjenja emisije štetnih gasova iz motora. Na sreću, postoji alternativa, i to je ugradnja tzv. dual fuel diesel motora koji umesto dizel goriva koriste utečniji zemni plin/nafta, čije su svetske rezerve znatno veće od tekućih goriva. Na žalost, ta tehnologija još nije zaživela u našim brodogradilištima verovatno radi dosta problema oko projektovanja sistema cevovoda goriva kod ovakvih pogona i verovatno radi odsustva propisa klasifikacionih društava o gradnji ovakvih pogona. U ovom radu obrađena je mogućnost uštede goriva koje DEP pruža. Pomenute su takođe i ostale prednosti koje ovaj novi pogonski sistem nudi. Ovde bih od ostalih pogodnosti koje DEP pruža pomenuo samo jednu, i to mogućnost dezintegracije pogonskog kompleksa, što projektantima pogonskih kompleksa na brodovima pruža velike mogućnosti racionalizacije i optimizacije pogona broda, odnosno uštede u potrošnji goriva. Ovaj rad je urađen sa ciljem da brodograditeljima objasni na koji način dizel električna propulzija (DEP) omogućuje brodu da smanji potrošnju goriva, a elektro inženjerima ukaže kako brodograditelji mogu profitabilno iskoristiti tehničke mogućnosti koje su oni obezbedili. Pored toga, za dva odabrana slučaja, u radu je izračunato koliko se potrošnja goriva može smanjiti. Iz predočenih podataka se vidi da je ušteda goriva sa DEP-om je vrlo atraktivna, pogotovo kad se imaju u vidu ogromne količine tekućeg goriva koje brodovi u svetu troše.

Ključne reči: dizel električna propulzija, stepen delovanja propelera u slobodnoj vožnji, ušteda goriva, smanjenje emisije izduvnih gasova, propulzivni stepen delovanja propelera

UVOD

Ušteda goriva je za brodare od vrhunskog značaja, jer se na osnovu tog podatka može lako izračunati smanjenje operativnih troškova broda, odnosno povećanje svog profita.

Na prvi deo pitanja, kako uštedeti gorivo na brodovima, načelno govoreći, postoje dva odgovora. Prvi odgovor glasi poboljšanjem propulzije, a drugi odgovor glasi smanjenjem vlastitog otpora broda. U ovom radu je obrađeno poboljšanje propulzije, jer za razmatranje druge mogućnosti smanjenja otpora koje se može postići katamaranskim ili trimaranskim formama broskog trupa, kao i podmazivanjem trupa broda vazдушnom pelenom i sl. Za obradu ovog problema bilo bi

potrebno obaviti mnogo modelskih ispitivanja za koje nismo posedovali sredstva.

1) Smanjenje potrošnje goriva moguće je ostvariti poboljšanjem energetske transformacije mehaničke energije dizel motora u energiju propelerskog mlaza ili drugim rečima povećanjem ukupnog propulzivnog stepena delovanja. U fazi projektovanja broda moguće je uticati na neki od faktora čiji proizvod predstavlja ukupni propulzivni stepen delovanja η_d , međutim, na postojećem brodu to nije moguće učiniti, ukoliko se ne izvrši supstitucija postojećeg direktnog dizel pogona sa DEP-om. Faktori čiji proizvod predstavlja ukupan stepen korisnosti η_d su: uticaj trupa broda, efikasnost transmisije i kao najuticajniji faktor je stepen delovanja propelera u slobodnoj vožnji η_0 . Efikasnost transmisije uključuje efikasnost broskog reduktora (ukoliko je na brodu ugrađen) i osovinskog voda. Na ove efikasnosti brodograđevni inženjeri nemaju uticaj već

proizvođači reduktora i kliznih ležajeva osovinskog voda i statvenih cevi. Kod dizel električne propulzije (DEP)-a se između dizel motora i propelera ugrađuje generator, kao i razvodni i upravljački uređaji i pogonski elektromotori, što unosi nove gubitke u transmisionom lancu.

2) U principu, ušteda u potrošnji goriva može se ostvariti povećanjem efikasnosti bilo kojeg člana transmisionog lanca. U ovom radu smo se u najvećoj meri koncentrisali na uštedu goriva koja se može ostvariti optimizacijom rada propelera, jer je to područje u kojem brodograđevinski inženjeri i hidrauličari imaju najveći uticaj i jer jedino pomoću propelera se najefikasnije mogu koristiti pogodnosti i velike tehničke mogućnosti koje nudi ovaj novi tip broskog pogona, koji su nam u najnovije vreme stvorili svetski proizvođači elektro-opreme.

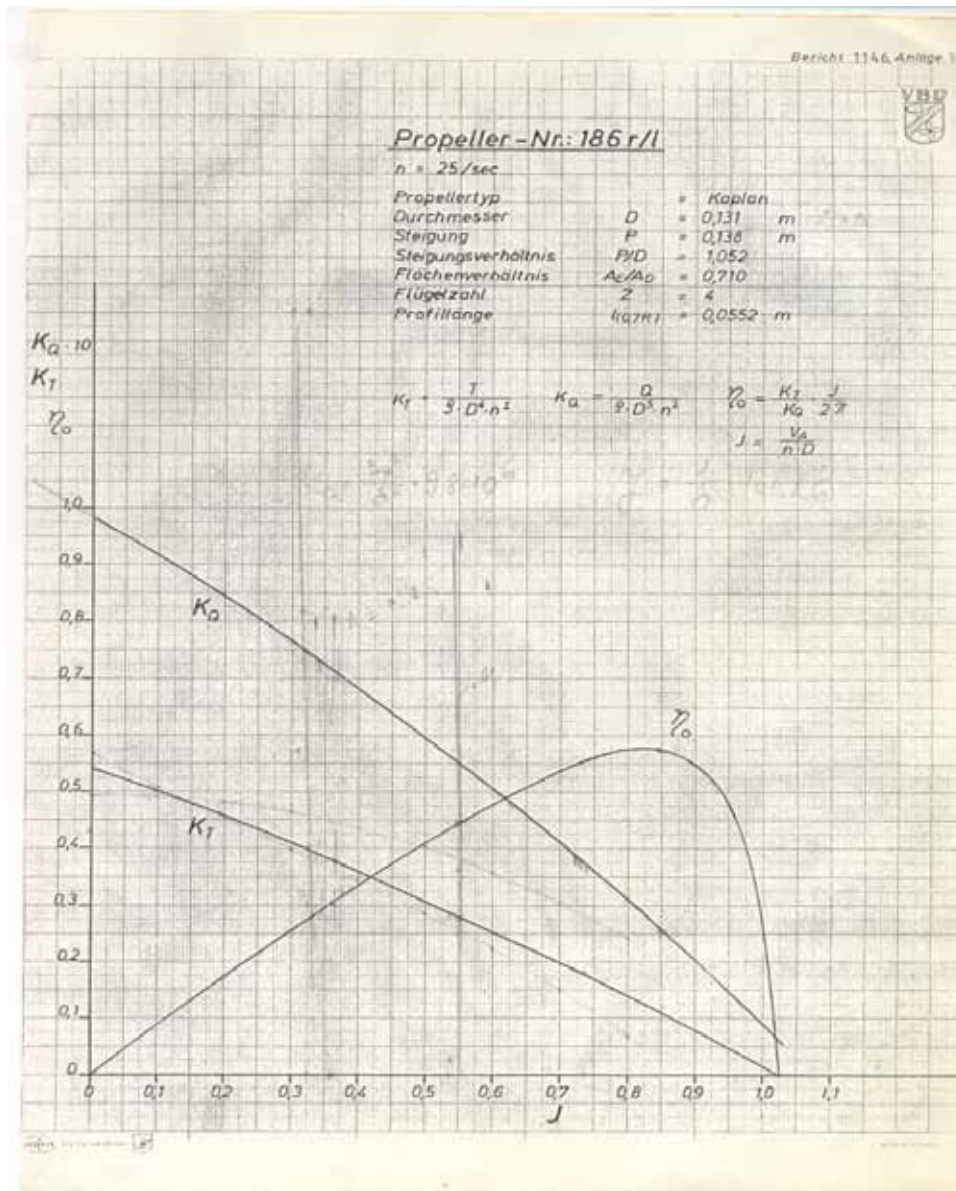
Povećanje efikasnosti propelera znači poboljšanje energetske transformacije mehaničke snage pogonskih motora u snagu propelerskog mlaza, što drugim rečima znači povećanje ukupnog propulzivnog stepena delovanja u kojem stepen delovanja modela propelera u slobodnoj vožnji zauzima dominantno mesto, pa je zato njemu u radu posvećeno najviše pažnje. Uprkos ovih novo uvedenih gubitaka, sa novom energetskom transformacijom, DEP stvara mogućnost uštede goriva na brodovima prvenstveno poboljšanjem efikasnosti ostalih delova pogonskog sistema tj. propelera i dizel motora. Osnov uštede goriva proizlazi iz činjenice da je u dobro dizajniranom DEP-u, snaga koju traži propeler "odspojena" od broja obrtanja dizel motora. Drugim rečima kod DEP-a, dizel motor /generator se obrće nominalnom brzinom, dok propeler može da se obrće sa bilo kojom brzinom obrtanja u opsegu od nule do maksimalne i to u oba smera obrtanja. Ovo znači da se DEP može biti mnogo brže i bolje prilagoditi promenljivoj opterećenju, nego konvencionalni pogonski sistem. Na moru, promenljiva opterećenja nastaju smanjenjem broja putnika ili tereta, plovidbom na talasima ili klizanjem (surfing) niz talase. Ove varijacije opterećenja obezbeđuju značajnu mogućnost uštede u potrošnji goriva. Povećanjem efikasnosti motora i propelera moguće je gubitke od električne konverzije naknadno ugrađenog DEP-a više nego kompenzovati. Kod DEP-a se između dizel motora i propelera ugrađuju generator, i upravljački ormani pogonskih elektromotora, što unosi nove gubitke u transmisionom lancu. Može se sa pravom postaviti pitanje: kako je

moguće uštedeti gorivo, ako je ugradnjom DEP-a uvedena i dodatna energetska transformacija, i sa njom dodatni transmisioni gubici koji bez DEP-a ne bi postojali. Uprkos ovih novo uvedenih gubitaka, DEP može ostvariti određenu uštedu goriva na brodovima poboljšanjem efikasnosti ostalih delova pogonskog sistema tj. propelera i dizel motora

OBJAŠNJENJE IZGLEDA KRIVE ETA-NULA VS. KOEF. NAPREDOVANJA JOT-A

Brodograđevinskim inženjerima dobro je poznato kako izgleda kriva stepena delovanja propelera u slobodnoj vožnji u funkciji koeficijenta napredovanja Jot (η_0 u funkciji jot-a), koja se dobija ispitivanjem modela propelera u slobodnoj vožnji. Kriva efikasnosti propelera (slika 1) za nultu vrednost koeficijenta napredovanja ima vrednost nula, ali sa porastom vrednosti koeficijenta napredovanja raste da bi pri nekoj vrednosti koeficijenta napredovanja dostigla maksimalnu vrednost posle čega opet opada ka nuli. Međutim, teorijsko objašnjenje karaktera ove krive čini mi se da i nije opšte poznato. Kod objašnjavanja karaktera ove krive, pogodno je nju podeliti u dva dela i to deo krive koji ima pozitivan gradijent rasta i deo krive koja ima negativan gradijent rasta promenom λ . Deo krive η_0 sa pozitivnim gradijentom rasta promenom λ može se objasniti porastom sile uzgona aero profila, odnosno krilnog elementa propelera. Potvrda ove tvrdnje može se dobiti uvidom u dijagram ispitivanja bilo kojeg aero profila u vazдушnom tunelu u funkciji napadnog ugla fluida na aero profil.

Deo krive η_0 sa negativnim gradijentom rasta promenom može se objasniti porastom koeficijenta trenja profila uzrokovanog porastom vrednosti Re broja, koji raste rastom koeficijenta napredovanja λ . Na osnovu prethodno rečenog, proizilazi logičan zaključak da koeficijent napredovanja λ kod propelera ima istu ili sličnu funkciju kao i napadni ugao kod aeroprofila. Da ovaj prethodno izrečeni logički zaključak nije sasvim bez osnova, služi činjenica da promena λ istovremeno znači i promenu brzine broda, odnosno brzine ulaska fluida u propeler, a ovo povećanje brzine fluida dovodi do ispravljanja mlaza propelera i to kako na usisnoj, tako isto i na potisnoj strani propelera, a na taj način se i napadni ugao fluida na profil propelera menja.



Slika 1. Kriva η_0 vs. Jot-a u slobodnoj vožnji modela propelera tip Nr. 186 r/l prečnika $D = 0,131\text{m}$ sa merilom modela 16 predstavlja prečnik od u 2.096m, odnosno oko 2.1m u naravi, sa 4 krila, odnosa površina $A_E / A_D = 0,710$

KRATAK OSVRT NA TEORIJU KRILNIH ELEMENATA PROPELERA

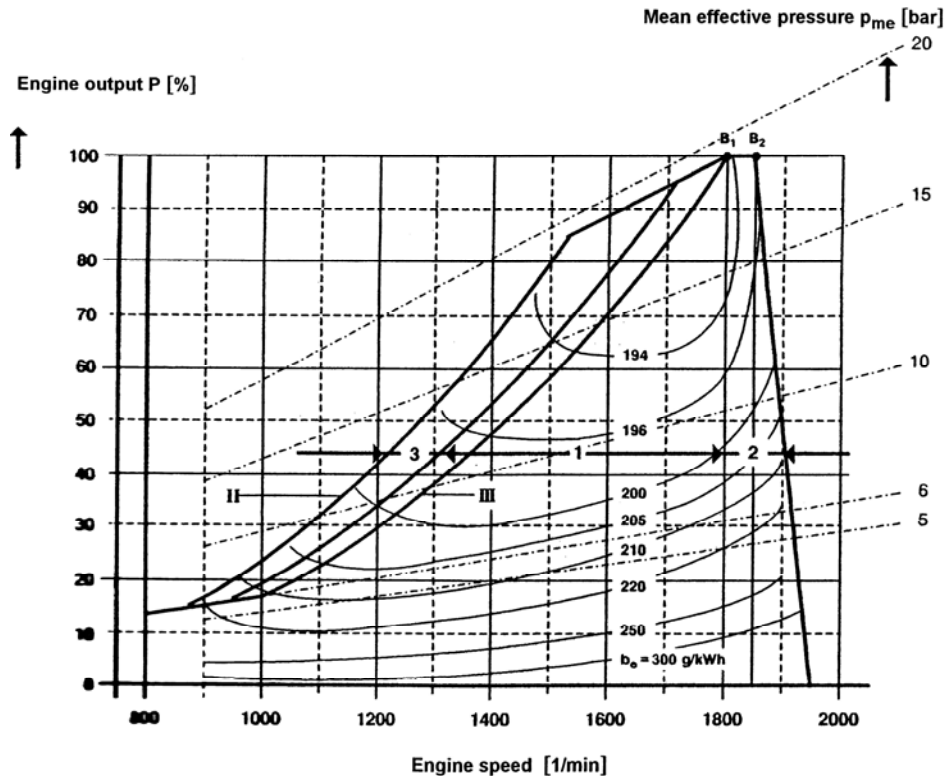
Prema teoriji krilnih elemenata, krilo propelera se razmatra kao da je sastavljeno od krišaka smeštenih na različitim radijusima krila. Ove kriške se protežu od ulaznog do izlaznog ruba krila i imaju aerodinamičan oblik. Interesantno je podsetiti se, da je aerodinamični profil jedino telo u prirodi koje pri kretanju kroz fluid generiše desetak puta veću korisnu silu uzgona od parazitske sile otpora. Ove sile koje generiše aeroprofil obično se izražavaju u formi bezdimenzionalnih koeficijenata C_L lift coeff. i

C_D drag coeff. Integraljenjem projekcije sile uzgona na pravac kretanja, umanjeno za projekciju sile otpora u istom smeru dobija se potisak propelera, a integraljenjem projekcija uzgonske sile po radijusu krila uvećano za projekciju otpora i pomnožen sa pripadnim radijusom dobija se moment Q koji apsorbuje propeler. Iz ovoga se vidi da otpor profila, odnosno krilnog elementa, negativno utiče na η_d , odnosno na η_0 i to na dva načina, umanjeno potiska propelera i uvećavanjem propelerom apsorbovanog momenta, odnosno utrošenog mehaničkog rada za stvaranje datog

korisnog rada. Otpor trenja bilo kojeg krutog tela pri kretanju kroz fluid u najvećoj meri zavisi o Reynoldsovom broju, tako na primer, pri: $Re = 1 \times 10^6$ bezdimenzionalni kvadratični koeficijent trenja jednak je 0.012, dok za $Re = 1 \times 10^7$ bezdimenzionalni kvadratični koeficijent trenja ima vrednost 0.003, verovatno kao rezultat prelaza iz laminarnog u turbulentni karakter strujanja u graničnom sloju profila.

VELIČINA POVEĆANJA EFIKASNOSTI KORIŠĆENJA GORIVA OPTIMIZACIJOM RADA DIZEL MOTORA

Poznato je da specifična potrošnja gotovo svih brodskih motora dizel motora zavisi od broja obrtanja i opterećenja.



Slika 2. Dijagram ispitivanja dizel motora tip TBD 620 V 8 na probnom stolu
 1 = radni opseg za trajan pogon, 2 = opseg regulacije brzine sa 3% brzine iznad nominalne,
 3 = opseg samo privremenog pogona

Poznato je da specifična potrošnja gotovo svih brodskih motora dizel motora zavisi od broja obrtanja i opterećenja. U ovo se lako možemo uveriti posmatranjem dijagrama potrošnje goriva bilo kog brodskog dizel motora. Pri tom da su neki tipovi vrlo efikasni, dok drugi imaju znatno lošiju krivu efikasnosti. Kolektivni uticaj ovih razlika može biti vrlo veliki pri realnoj plovidbi. Kod direktnih dizel pogona ovo pitanje optimizacije je irelevantno budući su motorski broj obrtaja/opterećenja direktno povezani sa propelerskim brojem obrtaja/opterećenje. Jedini način da se ova veza prekine je da se ugradi prekretni propeler za koji smo eksplicitno dokazali na osnovu podataka sa probne vožnje jednog lučkog remorkera instalisane snage 2.310 kW snabdevenim prekretnim propelerom prečnika 3 m. U ovom radu [1] je numerički dokazano da se promena koraka propelera u

različitim režimima plovidbe može u potpunosti zameniti odgovarajućim promenama broja obrtanja propelera. Numerički dokazano je i da DEP može u potpunosti da obezbedi sve propulzione pogodnosti kao i propeler promennljivog koraka, s tim da DEP pored ovih propulzionih pogodnosti on nudi i druge pogodnosti. Može se pokazati da se instalacijom DEP-a na brodu u potpunosti može eliminisati potreba ugradnje prekretnog propelera, s tim da DEP pored propulzivnih karakteristika kojima je u mogućnosti da potpuno zameni prekretni propeler, nosi sa sobom i niz drugih prednosti tj. efikasnost goriva optimizacijom rada dizel motora (DEP može optimizacijom rada dizel motora obezbediti prosečno smanjenje potrošnje goriva u iznosu od oko 10%). Tražili smo i od firme Deutz i dobili pužni dijagram (slika 2) ispitivanja najnovijeg njihovog motora tipa TBD

620 V16 snage 1.0160 kW pri 1.855 min⁻¹. Iz dijagrama (slika2) može se očitati, da specifična potrošnja pri nominalnom broju obrtaja i nominalnoj snazi iznosi 190 gr/h, što je za srednjehode motore sa ovim nominalnim brojem obrtaja izvanredno, rekao bi rekordno niska specifična potrošnja goriva. Kada se tom motoru broj obrtaja smanji na 1.500 min⁻¹ i snaga se smanji na oko 40% nominalne vrednosti, specifična potrošnja poraste na vrednost od 209 gr/h, što predstavlja povećanje specifične potrošnje goriva motora od 10%. Ova provera uštede goriva optimizacijom rada pogonskih dizel motora daje nam za pravo da ovaj procenat koristimo u nastavku ovog rada.

DVA NUMERIČKA PRIMERA ODREĐIVANJA RACIONALNOG PORASTA VREDNOSTI ETA-NULA POMOĆU DEP-A

Racionalnim porastom vrednosti λ zovemo onaj porast koeficijenta napredovanja koji ima za posledicu povećanje vrednosti η_0 . Mogući porast η_0 koji se može ostvariti zavisi od vrednosti λ pri kojem dati brod nominalno plovi, dakle od nominalne vrednosti λ datog broda. Jasno je, da je kod brodova koji nominalno plove pri niskim λ mogućnost povećanja η_0 veća i obrnuto, što, se jasno vidi iz priloženih brojčanih primera. Opseg mogućeg racionalnog porasta λ jednak je razlici nominalnog i optimalnog λ . Porast jota preko optimalne vrednosti nije više racionalan, jer nema za posledicu porast η_0 , već njegovo opadanje. Kod ovoga se može desiti da do optimalne vrednosti jota nije moguće doći, jer bi to tražilo veliko smanjenje broja obrtaja, što bi moglo imati za posledicu potrebu za propelerom suviše velikog omera koraka većeg od 1.4 koji se iz mnogih razloga izbegava. Da bi se odredila nominalna vrednost η_0 , potrebno je odabrati konkretan brod, za koji posedujemo podatke o nominalnoj brzini plovidbe, nominalnom broju obrtanja propelera, dijametru propelera, kao i dijagram slobodne vožnje modela pripadnog propelera. Navedeni podaci mogu se očitati iz modelskog ispitivanja modela odabranog broda. Ako modelska ispitivanja ne posedujemo, a mogu se koristiti i podaci iz realne plovidbe odabranog broda, odnosno iz brodskog dnevnika. Sa nabrojenim podacima može se izračunati vrednost nominalnog jota pri kojem odabrani brod plovi i sa njim iz dijagrama

slobodne vožnje modela propelera očitati nominalnu vrednost stepena korisnosti propelera u slobodnoj vožnji η_0 .

Primer 1. Iz dijagrama slobodne vožnje (slika1) modela datog propelera, moguće za vrednost $\lambda = 0.177$ očitati $\eta_0 = 0.153$, a za $\lambda = 0.32$ očitati vrednost $\eta_0 = 0.285$, što predstavlja procentualno povećanje stepena delovanja u slobodnoj vožnji od skoro neverovatnih 84%. Jasno da nismo gajili iluziju da će se količina utrošenog goriva smanjiti u istom procentu, pa smo zato u poslednjem podpoglavlju dali odgovor na pitanje kolika je stvarna ušteta goriva kod izračunate vrednosti povećanja η_0 . I kod velikoguračkog sastava, smanjenjem broja obrtaja sa postojećih 300 rpm na recimo 180 rpm, koeficijent napredovanja se povećao sa 0.171 na 0.29, što predstavlja procentualno povećanje od 84%. Ako se od ovog procenta odbije procenat za koji je porastao koeficijent napredovanja, povećana je vrednost jota, a u skladu sa postupkom datim u podpoglavlju 7 od 69 % preostaje za smanjenje utrošene snage, a sa njim i utroška goriva od pristojnih 15%.

U ovoj analizi odlučili smo se za veliki gurački sastav koji se sastoji od gurača i 15 barži E 11b ukupne nosivosti 22.500 tona na gazu barži od 2.5 m. Ovaj veliki gurački sastav gurao je jedan dvopropelerni gurač sa instalisanom snagom od 2 x 1.000 kW. Dizel motori su pokretali dva propelera prečnika 2.10 m, omera koraka 1.052 i omera krilne površine 0.710 koji su bili smešteni u sapnici 19 A. Sastav je imao zadatak da preveze datu količinu tereta željezne rude od luke Sulina do luke Smederevo, dakle na relaciji dužine 1.150 km. Prema podacima iz brodskog dnevnika sastav je u uzvodnoj plovidbi proveo 209 sati plovidbe, kod čega je broj obrtaja propelera uglavnom držan u toku cele plovidbe na 300 min⁻¹. Kada se postignutoj prosečnoj brzini prema obali od 5.53 km/h doda prosečna brzina struje vode od 3.4 km/h i kada se ovaj zbir pomnoži sa koeficijentom strujanja koji je prilikom modelskih ispitivanja određen i iznosi 0.245, dobija se brzina ulaska vode u propeler $V_A = 6,74$ km/h. Sa datim podacima lako se izračuna jota = 0.171. Ovako niske vrednosti jota su karakteristične za velike rečne guračke sastave. Sa ovako niskom vrednosti jota, uz kojeg ide i niska vrednost korisnosti propelera u slobodnoj vožnji očigledno nije bilo moguće ni uz najbolju volju realizovati iole rentabilno poslovanje broda,

posebno kada se radi o prevozu nisko tarifirane robe kao što je to bio ovde bio slučaj.

Da bi situaciju popravili, predložili smo brodo vlasniku da izvrši zamenu direktnog dizel pogona sa DEP-om, što on momentalno nije mogao prihvatiti radi nedostatka finansijskih sredstava, kao i kratkih ugovorenih rokova za prevoz datog tereta. Pokazali smo brodo vlasniku da bi ugradnjom DEP-a i zamenom postojećih propelera sa propelerima većeg koraka, s tim da se broj obrtaja propelera sa postojećih 300 min^{-1} smanji na, recimo 180 min^{-1} , čime bi se, pri istoj brzini plovidbe mogao koeficijent napredovanja jota mogao povećati sa sadašnjih 0.171 na vrednost od oko 0.29, što predstavlja procentualno povećanje λ za oko 69%.



Slika 3. Gurački sastav u Đerdapskoj klisuri

Primer 2. Posle ovog prvog numeričkog primera prelazimo na primer brodova koji plove pri λ koji je optimalan ili vrlo blizak optimalnom, a što je karakteristično za morske brodove koji nemaju takva ograničenja kao rečni brodovi. Za podatke i podloge za određivanje mogućeg povećanja η_0 koristićemo gurački sastav koji se sastoji od gurača i jedne barže E IIb, jer jer on po konfiguraciji i gabaritima najpribližniji obalnom morskom brodu odgovarajuće nosivosti i snage. Razumljivo da razlike postoje i one se sastoje u nešto oštrijoj formi trupa obalnog morskog broda, nižem broju obrtaja propelera i većem dijametru propelera, međutim smatram da te razlike neće bitno ugroziti valjanost datih numeričkih rezultata.

Ovaj mali gurački sastav sa snagom gurača od $2 \times 1.000 \text{ kW}$, prema dijagramu auto propulzije /2/ postignuce u mirnoj vodi brzinu od 21.5 km/h . Kada se ovoj brzini doda brzina struje vode i primeni prethodno pomenuti koeficijent sustrujanja $w=0.245$ dobija se brzina ulaska fluida u propeler $V_A=18.37 \text{ km/h}$. Sa

ovim vrednostima dobija se vrednost jot-a za od oko 0.85. U nedostatku podataka o morskobalnom brodu posluživu se dijagramom slobodne vožnje propelera pomenutog gurača od 2000 kW i očitati za vrednost jot-a $=0.85$ vrednost $\eta_0=0.575$, što odgovara temenu krive η_0 . Na prvi pogled moglo bi se reći, da ovde DEP nema šta da poboljšava ako je η_0 već na maksimumu. Međutim, ako razmotrimo šta će se dogoditi sa ovim brodom kada plovi u lošim vremenskim uslovima primera radi pri vetru snage 6 po Boufortovoj skali, kada je srednji pritisak vetra $37.5 \text{ kg/m}^2 /5/$, tada će se, ako vetar duva u smeru kretanja broda njegova brzina povećati u zavisnosti od površine broda izloženoj udaru vetra. U prethodnom slučaju gurača sa površinom izloženom vetru, izračunato je da se kod datog vetra brzina povećava za oko 3.5 km/h . Ovo povećanje brzine uzrokuje povećanje jot sa prethodnih 0.85 porasti na vrednost 0.92 do 0.93. Radi ovog povećanja radna tačka propelera skliznuće sa temena parabole na krak sa negativnim gradijentom rasta, što će imati za posledicu smanjenje η_0 sa 0.575 na vrednost od oko 0.525 što predstavlja smanjenje stepena iskoristivosti od oko 8 - 9%. Sa Depom je moguće, odgovarajućom promenom broja obrtaja propelera skliznutu radnu tačku propelera ponovo vratiti na teme parabole. Znači da Dep kod ovih morskih brodova kada plovi u lošim vremenskim uslovima u datom procentu smanjiti njihovu potrošnju goriva. Kao što vidimo ovaj procenat poboljšanja η_0 je znatno skromniji od prethodno izračunatog, što je bilo za očekivati, međutim, bez obzira što je procenat poboljšanja skroman on se ne sme zanemariti, pogotovu kada se uzme u obzir i promena brzine broda koji će brod ostvariti kada klizi (surfing) niz talase u odnosu na brzinu broda kada plovi na valove koji se formiraju pri datoj brzini vetra. To će izazvati dodatno povećanje, odnosno dodatno klizanje radne tačke propelera u područje još nižih vrednosti η_0 , što bi imalo za posledicu dalje smanjenje η_0 , a s tim i mogućnost povećanja η_0 , promenom broja obrtanja propelera. Ova poslednja tvrdnja i nije posve tačna, jer uvidom u teoriju valova može se videti da brodovi pri plovidbi na valovima datog spektra trpe povećanje otpora, što se za pretpostavljeni ili usvojeni valni spektar može računski proveriti, kod čega plovidba, klizanje niz valove može

verovatno samo kompenzovati povećanje otpora broda pri plovidbi na valove. Ovaj problem zaslužuje da u nekom budućem radu bude detaljnije obrađen.

Osnov ovih poboljšanja proizilazi iz činjenice da je u dobro dizajniranom dizel električnom pogonu snaga koju zahteva propeler je "odspojena" od broja obrtanja dizel motora. Drugim rečima motor/generator može da se obrće punom brzinom sa 100% snagom, dok se propeler obrće sa bilo kojom brzinom obrtanja. Međutim, valorizacija svih prednosti koje ova pogonski sistem nudi može se pokazati i dokazati preko mogućnosti brzog vraćanja dodatno uloženi finansijskih sredstava. Dizel električna propulzija omogućuje efikasnije korištenje dizel motora i propelera čime omogućuje da se neutralizuju gubici dodatne energetske konverzije.

OBJAŠNJENJE KAKO DEP OSTVARUJE POVEĆANJE/SMANJENJE JOT-A KOD BRODOVA

Pitanje koje traži odgovor je: Kako se promenom brzine obrtaja propelera obavlja povećanje/smanjenje jot-a? U prethodnom delu ovog rada rečeno je da je kod DEP-a broj obrtaja propelera odspojen od broja obrtaja dizel motora. Kod DEP-a broj obrtaja propelera, odnosno pogonskog elektromotora se kontroliše isključivo pomoću kontrolera pogonskih elektromotora. Kontroleri se nazivaju invertori ili ciklo-konvertori. To su uređaji koji konvertuju ulazni naizmenični napon stalne frekvencije iz dizel generatora u naizmenični napon promenljive amplitude i kontrolisano promenljive frekvencije. Razvoj ovih uređaja u svetu bazira se na pojavi SCR-a (silicijumskih upravljivih ispravljača) koji su kasnije nazvani tiristorima. [7] Raspon u kojem se izlazna frekvencija iz konvertora kontroliše verovatno se definiše prilikom nabavke određenog pretvarača.

Ukoliko se radi o snagama većim od nekoliko MW, koriste se ciklokonvertori čija se izlazna frekvencija menja u rasponu od nule do 1/2 nominalne. To praktično znači, da se koriste generatori koji imaju standardnu industrijsku učestanost od 50 Hz. Elektromotori se konstruktivno prave tako da imaju standardnu frekvenciju 1/2 od 50 Hz i sa 10 pari polova. Na taj način dobija se prirodna redukcija obrtanja elektromotora a time i propelera na 150 min⁻¹ maksimalno. Normalno da je regulacija konti-

nualna od nule do maksimalne brzine u oba smera sa beskontaktnim preketom.

Ukoliko se radi o pogonima snaga reda do MW, u upotrebi su invertori, čija se izlazna frekvencija menja u rasponu od nule, što praktički znači frekvenciji bliskoj nuli do 100 Hz. Broj obrtaja propelera se određuje tako da se izlazna frekvencija iz konvertora pomnoži sa 60 i podeli sa brojem pari polova elektromotora. Kod ovih snaga generatora broj pari polova obično iznosi 2, a maksimalni broj pari polova elektromotora iznosi 20 [7]. Iz ovoga proizilazi da postoji gornja granica prirodne redukcije o/min⁻¹ između generatora i elektro motora. Kada se generator sa dva para polova obrće sa 1.500 min⁻¹, tada je njegova izlazna frekvencija jednaka 50 Hz, a broj obrtaja elektromotora sa dvadeset pari polova, odnosno propelera iznosi 150 min⁻¹. Ukoliko se promeni frekvencija do 100 Hz, elektromotor, kao i propeler dobijaju brzinu obrtanja od 300 min⁻¹, ali se u opsegu brzina od 150 do 300 min⁻¹ snaga se ne menja, tj. ostaje stalna, a moment opada. Ukoliko se ugradi elektromotor sa 10 pari polova, tada nominalni broj obrtaja elektromotora, odnosno propelera iznosi 300 min⁻¹. Ukoliko se invertorom promeni frekvencija iznad ove, a sto je po svim pravilima elektrotehnike dozvoljeno, elektromotor, kao i propeler dobijaju brzinu obrtanja veću od 300 min⁻¹, pri čemu se snaga ne menja, tj. ostaje stalna, a moment opada.

POSTUPAK ODREĐIVANJA UŠTEDE GORIVA ZA IZRAČUNATU VREDNOST POVEĆANJA ETA-NULA

Postupak određivanja uštede goriva, je vrlo jednostavan i svodi se na primenu elementarnih matematičkih operacija i to da se od izračunatog procenta povećanja η_0 odbije procenat povećanja jot-a, u slučaju da je povećanje η_0 nastalo povećanjem jota. U slučajevima kada je povećanje η_0 nastalo smanjenjem vrednosti jota, tada se procenat smanjenja λ dodaje procentu povećanja η_0 , kao što je to pokazano u primeru 2 gde je pokazano da porast η_0 nastaje kao posledica smanjenja koeficijenta napredovanja jota. Potvrda ovog postupka dobija se na osnovu date opšte poznate formule za određivanje η_0 , koja se koristi za izračunavanje η_0 na bazi

podataka iz ispitivanja modela propelera u slobodnoj vožnji kao i datog propratnog teksta.

U prethodnom poglavlju je pokazano kako smo pomoću DEP-a velikom guračkom sastavu povećali stepen korisnosti propelera u slobodnoj vožnji za neverovatnih 84%. Uskladu sa prethodno iskazanim tekstom od izračunatog povećanja η_0 treba odbiti povećanje jota koje je iznosilo 69 %, što daje da je smanjenje potrebne snage za obavljanje datog korisnog rada samo 15%, kao posledica optimizacije rada propelera.

Sigurno je da bi bilo iluzorno očekivati da će i potrošnja goriva biti smanjena u istom procentu. Ovaj veliki procenat ogromnog povećanja η_0 neće suviše zaintrigirati brodovlasnike, sve dok ne odgovorimo na pitanje koliko se goriva može uštedeti. Da bi odgovorili na ovo pitanje moramo poći od izraza(1) prema kojem se kod modelskih ispitivanja propelera u slobodnoj vožnji, određuje η_0 .

$$\eta_0 = \frac{T \cdot V}{Q \cdot \omega}$$

Sa izmerenim vrednostima potiska T , brojeva obrtaja propelera N i brzine modela V , kao i apsorbovanog momenta od strane modela propelera može se η_0 lako odrediti. Iz datog izraza se vidi da povećanje η_0 može nastati povećanjem korisnog rada $T \cdot V$ ili smanjenjem snage utrošene za proizvodnju datog korisnog rada.

U prethodnim primerima postigli smo povećanje η_0 povećanjem koeficijenta napredovanja. Iz dijagrama slobodne vožnje bilo kojeg propelera se vidi da ovo povećanje izaziva kod propelera smanjenje konstante potiska. Iz ovoga bi se moralo zaključiti da je povećanje η_0 ne može nikako biti posledica povećanja korisnog rada $T \cdot V$, jer je kod svih standardnih propelera konstanta potiska opada sa porastom Jota, a pored toga porast jot-a je nastao smanjenjem brzine obrtanja propelera, dakle vidi se da je smanjenje propelerom proizvedenog potiska smanjuje porastom jot-a iz dva razloga:

$$\eta_0 = \frac{K_T}{K_Q} \cdot \frac{\lambda}{2\pi}$$

jedan je smanjenje konstante potiska K_T , a drugi je smanjenja broja obrtaja propelera koji u izrazu za izračunavanje proizvedenog potiska

figuriše sa kvadratom sekundnog broja obrtaja propelera.

$$K_T = \frac{T}{\rho \cdot D^4 \cdot n^2}$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot D^5 \cdot n^2}$$

Na osnovu izrečenog, ne preostaje nam ništa drugo, nego da zaključimo da je do povećanja η_0 došlo isključivo kao posledica i smanjenja utrošene snage potrebne za poroizvodnju datog datog korisnog rada. Primena prethodnog zaključka znači da je prethodno izračunato povećanje η_0 od 84% kod velikog guračkog sastava, treba oduzeti procenat povećanja koeficijenta napredovanja.

Da bi odredili koliko je smanjenje utrošene snage, treba od ovog velikog procenta oduzeti povećanje η_0 izazvano povećanjem jota. Tako dobijena procentualna razlika predstavlja iznos za koji je utrošena snaga smanjenja, a iz toga je lako odrediti smanjenje potrošnje goriva. Procenat povećanja jota u slučaju plovidbe velikog sastava iznosi 69%, što odbijeno od izračunatog povećanja η_0 daje razliku od 15%. Odlučili smo da izračunatom procentu ne pridodajemo prognozirani procenat smanjenja potrošnje goriva, koji je posledica optimizacije rada dizel motora, već da taj procenat zadržimo kao rezervu koja bi trebala da poveća verovatnoću uštede goriva od optimizacije rada propelera. Postoji još jedna rezerva koja je sadržana u činjenici da novi, koji treba da bude ugrađen zajedno sa instalacijom DEP-a propeler većeg omera koraka poseduje i veći stepen korisnosti pri istoj vrednosti koeficijenta napredovanja (ostavimo kao rezervu). Ovo znači da se utrošena snaga, a s njom i potrošak goriva smanjio za pristojnih 15%, kao posledica optimizacije rada samo broskog propelera.

Ovde se, dakle, radi o impresivnim procentima, jer smo rekli da na brodovima i deo procenta uštede goriva predstavlja ogromnu vrednost procenta uštede goriva, dobijen optimizacijom rada propelera možda neće biti dovoljno stimulativan za brodovlasnike. Međutim, ako imamo na umu da se ovom relativno umerenom procentu može pridodati procenat smanjenja potrošnje goriva, koja nastaje optimizacijom rada dizel motora, koja je prognozirana da može dostići vrednost od 10%. Ovo smanjenje potrošnje goriva optimizacijom rada dizel motora ovde ne uzimamo u obzir, već ostavljamo

ovaj procenat da bude mirujuća rezerva jer kada ovaj procenat dobijen optimizacijom rada propelera primenimo na utrošenu snagu velikog gurača koja iznosi o $2.135 kW$ dobiće se smanjenje utrošene snage od $341.6 kW$. Kako je prosečna specifična potrošnja dizel motora ovih snaga oko $203 gr/kWh$, dobija se ušteda u potrošnji goriva od blizu 70 litara nafte na sat, što ako se pomnoži sa godišnjim fondom časova plovidbe od oko 1600 časova na rekama, dobija se godišnja ušteda od 112.000 litara, što računajući sa prosečnom cenom nafte na svetskom tržištu od oko 1 evro/litra predstavlja smanjenje operacionih troškova broda od više od 112.000 evra godišnje. Kada se uzme u obzir ušteda koju brodovi mogu ostvariti u plovidbi sa sastavom komponavanom od manjeg broja barži ili u nizvodnoj plovidbi sa praznim baržama, koja prema statističkim podacima zauzima dosta veliki procenat životnog veka ovih brodova. Ako se izračunatoj sumi smanjenja operativnih troškova broda doda smanjenje troškova održavanja, dobija se vrlo respektabilna suma, sa kojom je moguće u relativno kratkom roku povratiti novac upložen za ugradnju DEP-a. Često sam bio prisutan na ovim brodovima kada su plovili nizvodno sa praznim baržama, video sam da najveći broj kapetana u ovim uslovima plovi sa maksimalnim brzinama obrtanja dizel motora, da bi što pre stigli do mesta ukrcaja iz čega proizlazi zaključak da je mogućnost uštede goriva u scenariju sa većim brojem agregata manje snage, zaista kolosalna. U prethodnom tekstu najviše prostora smo posvetili uštedi goriva sa DEP-om, zapostavljajući na taj način druge prednosti koje DEP nudi i za koje smatramo da su vrlo značajne i koje brodovlasnici sami mogu itekako dobro valorizovati.

OSTALE PREDNOSTI DEP-A

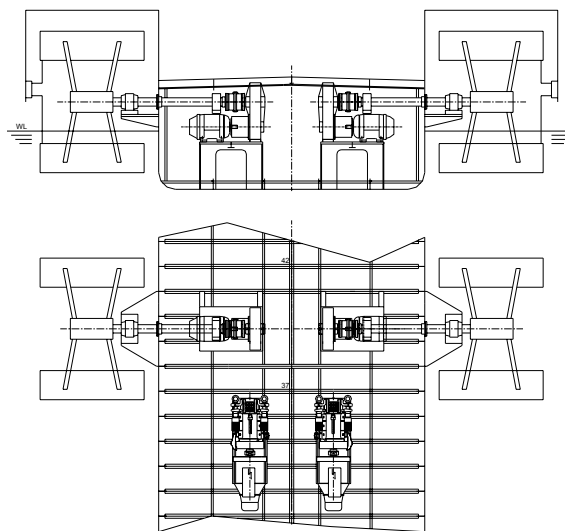
U odnosu na klasične pogone, dizel električni pogon poseduje sledeće prednosti:

1) Kontinualna regulacije brzine propelera i postizanje odličnih manevarskih osobina broda Pogonski elektromotor omogućuje postizanje bilo koje brzine obratanja od nule do maksimalne brzine obrtanja u oba smera obrtanja i mogućnost podešavanja optimalne brzine obrtanja pogonskog točka ili propelera. Ovo znači i eliminacija uređaja za reverziranje kao i brz prekreć propelera i plovidba unazad istom snagom kao za plovidbu napred, što omogućuje brodu da postigne puno kraći

zaustavni put nego brodovi sa direktnim dizel pogonom.

2) Integracija i dezintegracija pogonskog kompleksa DEP-a daje projektantima pogonskog kompleksa neslućene mogućnosti za realizaciju optimalizacije pogonskog kompleksa.

Primer dezintegracije pogonskog kompleksa (u sklopu tacaka 1 i 2) može se dobro sagledati na primeru velikog guračkog sastava i na već pomenuti gurač od $2.100 kW$. Ovaj gurač bi mogao da umesto dva dizel generatora od po $1.000 kW$, bude snabdeven sa primeru radi, tri agregata od po $700 kW$ na $1500 min^{-1}$ i tri pogonska elektromotora snage $670 kW$, jasno, ukoliko se ostajena tropropelernoj varijanti svaki. Treba napomenuti da je svaki od tri agregata jeftiniji od dizel motornog agregata od $1.000 kW$ i $600 min^{-1}$ koliko su bili postojeći motori. Oni su jeftiniji zato što imaju veći broj obrtaja, pa je zahvaljujući tome i njihova masa znatno manja, a s tim i cena. U ovakvom pogonu, moguće je pri uzvodnoj plovidbi sa velikim sastavom uputiti sva tri agregata u pogon, dok bi za plovidbu sa manjim sastavom mogla koristiti dva agregata pri čemu bi treći bio mirujuća rezerva. U ekstremnim slučajevima kada sastav plovi nizvodno sa malim brojem praznih barži, verovatno bi bilo dovoljno da gurač uključi samo jedan agregat, pod uslovom da je taj agregat dimenzionisan tako da može napajati potrebnom nagom pogonske elektromotore, kao i brodsku električnu mrežu sa svim opšte brodskim potrošačima.



Slika 4. Dispozicija pogonskih električnih agregata u mašinskom prostoru Broda sa pogonskim točkovima

Očigledno je, da koncept dezintegriranog pogonskog kompleksa traži dodatna investiciona sredstva, ali je sasvim izvesno da brod sa dezintegriranim pogonskim kompleksom poseduje daleko veću žilavost od konvencionalnih dizel pogona. Posedovanje veće žilavosti znači da je kod tog broda potpuno ili svedena na minimalnu meru i isključena mogućnost da na moru ostane bez pogona ugrožavajući živote posade i dovodeći u opasnost žestoko zagađivanje čovekove okoline i da bespomoćno pluta po moru sve dok ne stignu remorkeri koji će ga otegliti u najbližu luku na remont. Treba imati u vidu da je najveći broj robnih tokova na Dunavu orjentisan uzvodno u Zapadnu Evropu, s tim da se ukrcavanje tereta u najvećem broju slučajeva obavlja na donjem Dunavu, tako da ovi brodovi sprovedu gotovo pola svog radnog veka u plovidbi sa praznim baržama u nizvodnoj plovidbi. Lako je izračunati koliko ovakav način plovidbe može uštedeti veliku količinu goriva.

3) Smanjenje troškova održavanja Poznato je da je održavanje generatora i elektro motora krajnje jednostavno, tako da sam u nekim radovima sa ovom tematikom iz Amerike pročitao tvrdnju da DEP-u održavanje gotovo da i nije potrebno, što smatram da je to ipak komercijalno preterivanje. Međutim, svakako da su troškovi održavanja kod DEP-a puno manji nego što je to kod konvencionalnih pogona.

4) Kako je kod DEP-a mehanička veza pogonskih motora i propelera izostavljena kao i kako je i transport električne energije pomoću električnih kablova, krajnje jednostavna to je moguće postaviti pogonske motore i generatore na bilo kojem pogodnom mestu na brodu, pa čak, u nekim slučajevima i na palubi. Ova činjenica omogućuje da se tuneli osovinskog voda potpuno eliminišu i tako da se u skladištima dobije dodatna zapremina skladišta za smeštaj tereta, kao i da se konstrukcija broda dosta pojednostavni. Pogonski elektromotori mogu se smestiti na samoj krmu broda, tako da otpada potreba ugradnje dugačkog osovinskog voda i velikog broja kliznih ležajeva osovinskog voda, tako da praktično od celog konvencionalnog vratilnog voda ostaje samo propelerska međuosovina, s tim, da se na kraju propelerske osovine mora ugraditi pripadnih odzivni ležaj. Kod brodova kod kojih se ugrađuju elektromotori sa prigradenim reduktorima, podrazumeva se da se u kućištu ovog prigradenog reduktora ugradi odgovarajući radijalno-aksijalni kuglični ležaj koji služi kao odzivni ležaj. U slučaju nedostatka mesta u mašinskom

prostoru svaki agregat bi mogao biti lociran bilo gde na brodu ili čak na palubi gurača.

5) Pogonski dizel motori stalno rade na nominalnom broju okretaja, bez potrebe da te brojeve obrtaja u toku vožnje menjaju. Takav rad pogonskih motora naziva se generatorski režim rada motora Prilazeći luci, brod smanjuje brzinu preko kontrolera promenom frekvencije izlaznog napona kojim se napajaju pogonski elektro motori. Na sličan način vrši se i preket propelera prilikom naglog zaustavljanja broda. Dok sam radio u brodogradilištu posetio sam veliki broj svetski poznatih fabrika brodskih dizel motora i prilikom ovih poseta tražio sam, od najodgovornijih ljudi fabrike, odgovor na pitanje koliko se vek trajanja dizel motora razlikuju ako motor radi sa čestom promenom broja obrtaja i ako radi u generatorskom režimu, kolika je razlika u potrošnji goriva, u emisiji štetnih gasova, kao i u buci i vibracijama. Eksplicitne brojčane odgovore nažalost nisam dobio, već samo načelne da motor u generatorskom režimu rada ima duži vek trajanja, manju potrošnju kao i manju emisiju štetnih gasova. Brojčane vrednosti nisam mogao dobiti, jer je to najverovatnije bila fabrička poslovna tajna.

6) Prisustvo glavnih generatora na brodu može osloboditi brod od ugradnje posebnih pomoćnih dizel generatora za napajanje svih ostalih brodskih potrošača, jer se napajanje brodske mreže može obaviti iz glavnih generatora, koji su obično većih snaga, a u slučaju instalacije dodatnih dizel generatora otpada potreba za instalaciju paralelnog rada ovih generatora.

7) Zahvaljujući činjenici da kod DEP postoje električni instrumenti sa kojima je moguće precizno izmeriti sve parametre struje koju troši pogonski elektromotor, moguće je u svakom momentu odrediti brzinu obrtanja propelera i snagu koju isti apsorbuje. Električni instrumenti će pored obaveznih signala i alarma biti ugrađeni na komandnom pultu broda opremljenog sa DEP-om. Ova činjenica omogućuje da se sva merenja u toku probne vožnje obavljaju iz kormilarnice, otpada potreba ugradnje robusne instalacije Meichakovog torziometra na propelerskom vratilu, što bi u velikoj meri olakšalo rad ekipa koje vrše merenja na probnim vožnjama i što bi znatno povećalo tačnost izmerenih rezultata. Sa ovim izmerenim veličinama, uz dodatak merenja brzine broda pomoću GPS-a moguće je u svakom momentu, pomoću odgovarajućeg kompjuterskog

programa izračunati snagu sa kojom brod u datom momentu plovi i sa pripadnim kompjuterskim programom izvršiti potrebnu korekturu frekvencije napona kojim se napajaju pogonski elektro motori, kako bi propeler i dizel motor doveli u optimalni režim rada. i tako realizovali maksimalnu uštedu goriva. Algoritam za ovaj kompjuterski program ćemo razraditi u toku daljeg našeg angažovanja na ovoj temi, a pokušaćemo i da izradimo uređaj koji bi bez ikakve intervencije posade u svim režimima plovidbe bio u stanju da zada parametre koji obezbeđuju optimalnu plovidbu broda, tj. plovidbe kod koje se troši najmanja količina goriva po pređenoj jedinici plovnog puta.

8) U prethodnom poglavlju pomenuto je, da je alternativno rešenje za uštedu goriva, koje bi produžilo vek trajanja postojećih utanjenih svetskih rezerve sirove nafte, ugradnja dual fuel diesel motora koji naftu **koriste samo pri startu motora, a posle prelaze na utečnjeni zemni plin.** U jednom izveštaju firme koja proizvodi ove motore sam pročitao da ovi motori imaju problem regulacije broja obrtaja kao i preket motora. Stručnjaci iz ove firme su predložili da se problem reši ugradnjom prekretnih propelera. Smatram da ovaj predlog nije mudro rešenje i da nije sve obuhvatno. Verovatno kolege nisu upoznati sa činjenicom da DEP u potpunosti zamenjuje prekretni propeler i pored toga nudi niz pomenutih dodatnih prednosti. Smatram da je daleko racionalnije rešenje ugradnja DEP-a kod kojeg bi ovi motori pogonili.

9) Često sam bio prisutan u sporovima između brodovlasnika i proizvođača dizel motora koji su doveli i do međunarodne arbitraže. Spor se sastojao u tome da je brodovlasnik krivio proizvođača motora, da su mu motori loši i da traže vrlo česti remont i zamenu pojedinih delova motora. Na ovo su proizvođači motora krivicu prebacivali na brodovlasnika, jer je on u eksploataciji preopterećivao motore, tako što bi opterećivali gurače sa velikim sastavima, u želji da prevezu što veću količinu tereta i ostvare veću zaradu. U slučaju ugradnje DEP-a, ovaj problem se potpuno eliminiše, jer u sklopu pomenutih konvertora postoji vrlo efikasna i sigurna **električna zaštita dizel motora od preopterećenja.**

10) Iz svega što je rečeno o DEP-u, očigledno je da ne u slučaju instalacije DEP-a na brodovima koji treba da rade na gornjem Dunavu **problem apsorpcije instalisane**

snage biva u potpunosti eliminisan, tako da je i ovo jedna vrlo značajna pogodnost DEP-a.

LITERATURA

- 1/1 B.Bilen istraživanje propulzionih i drugih pogodnosti koje mpruža dizel-električna propulzija u primeni na brodovima
- 1/2 Systematische Widerstand-Propulsion versuche mit keilspant Leichter verbanden auf begrenzten Wassertiefen Versuchsanstalt fuer Binnenschiffbau Duisburg Bericht Nr.1146 Dezember 1985.
- 1/3 Basic wing and airfoil theory by Alan Pope Mc Graw-hill book company 1951 handbuch der Werften Band XVIII. By Prof. Dr. ing. K. Wendel
- 1/4 Hodkost i upravljajemost sudov by M. JA . Aljferjev Moskva 1967.
- 1/5 Strscheletzky Hydrodinamische Grundlage fuer Berechnung Schiffschrauben Verlag G. Braun, Karlsruhe
- 1/6 The marine power plant by Lawrence B. Chapman second edition, Mc Graw-HILL Book Company, Inc. New york and London 1942.
- 1/7 Fizikalne veličine i mjerne jedinice by Kuzman Ražnjević, Nakladni zavod Znanje, Zagreb.
- 1/8 Brodske mašine i uređaji by Z. Nikolić and G.Počuča ITN-Sanu, Beograd 2003.
- 1/9 Prospektni materijal firme Deutz i osnovne karakteristike dizel motora tip TBD 620 V16
- 1/10 Nikolić, Z., Diesel – electric propulsion of the reconstructed paddle wheel river ship "Krajina", Conference Proceedings AES 2003 Broadening the Horizons, Edinburgh, UK, (2003), 117 – 123.

THE QUESTION IS: HOW AND HOW MUCH FUEL CAN BE SAVED WITH DIESEL ELECTRICAL PROPULSION(DEP) INSTALLED ON THE SHIPS?

The aim of this paper is to explain how naval architect can profitable exploit a new devices recently developed different type of invertors recently developed from firms, manufacturers of electrical equipments.

In the paper is accentuated problem how much fuel can be saved with DEP, because this, problem shipbuilding professionals are less informed.

In order to illustrate how much fuel can be saved with this new propulsion technologies at the end of this paper there are two illustrative numerical examples given. In these examples calculation is made of the amount of the fuel oil which can be saved with DEP reinstalled on the given ships and on the given route.

In the examples, ships have been selected so that the first example work on the ship which belongs to the river ships i.e. the ships which

navigate generally at very low advance ratio, and the other ship which belongs to the sea going coastal ships which navigate generally at the advance ratio which are optimal or very close to optimum value of the advance ratio.

Key words: Diesel Electric Propulsion (DEP), propeller functioning ratio in free sail, fuel saving, exhaust gas emission decrease, propulsion propeller functioning ratio