

Igor BELAMARIĆ **Glavni stroj i propulzor**

1. dio članka objavljen je u *Brodogradnja* br. 3/2003. (Ur.)

Recentna zbivanja na sporokretnoj dvo-taktnoj pozornici iziskuju makar kratki osvrt prije predviđenog nastavka i zaključnog razmišljanja o današnjoj, i jednoj izglednoj budućoj sponi: brod - glavni stroj - propulzor.

Motor S65ME-C

Na nagovor japanskog brodograđevnog kruga, *MAN-B&W* projektira i u travnju 2004. godine predstavlja novog člana svoje ionako brojne i raskošne sporokretne dvo-taktno obitelji. Tvrdi se da će taj novi član, motor S65ME-C upravo idealno pogodovati modernim *Suezmax* tankerima i *Cape-size bulk carrierima*. Eksplicite se ističe kako će to biti 7-cilindarska alternativa već dobro uvedenom i potvrđenom motoru 6S70ME-C.

Premda rijetko, u praksi se događalo da pojedini graditelji uvedu novi model parametara blizak već postojećem. Činjenica jest da to ima stanovite nepovoljne financijske implikacije, kao i množenje rezervnih dijelova unutar dane flote. Najčešće se događalo da su se tako međusobno isključivali (dojam: kadšto, s predumišljajem...) susjedni/bliski članovi dotične obitelji. Pogledajmo i usporedimo, dakle, glavne značajke motora S70 i S65, predočene u tablici 3.

Kao što se vidi, motor S65 nešto je manje opterećen, tj. posjeduje razvojni potencijal, a zacijelo je i koljenčasta osovina dimenzionirana tako da to bezbolno dopusti. No može li motor 7S65 djelotvorno zamijeniti postojeći 6S70, i to u sferi tankera i bulkera nosivosti 150 000 do 180 000 dwt? Naime, 6S70ME-C razvija MCR = 18 660 kW pri 91 min⁻¹, dok 7S65ME-C ima MCR = 17 990 kW pri 92 min⁻¹. Da bi potonji dosegao snagu od 18 660 kW trebao bi povisiti srednji efektivni tlak na 19 bar,

Adresa autora:
Tolstojeva 41, 21000 Split

Tablica 3

Značajka → Motor ↓	d mm	s mm	s/d	N min ⁻¹	c _s m/s	p _e bar	p _e · c _s bar·m/s	vol. lit.*	kW/ /cil	P/A**	kW/ lit	Q kNm
S70ME-C	700	2800	4,00	91	8,49	19,0	161	1077,6	3110	80,8	2,89	327
S65ME-C	650	2730	4,20	92	8,37	18,5	155	905,9	2570	77,4	2,84	270

* Cilindarski volumen, dm³

** Snaga po jedinici stapne površine, kW/dm²

a okretaje na 93 min⁻¹. To jest moguće, ali je upravo za propulziju dotičnih sporih tankera i bulkera nepovoljnije, jer se s 2,2 posto većim brojem okretaja na dijagramu B-δ ide udesno, dakle, prema nižim omjerima uspona P/D i nižim koeficijentima η_p.

Konačno, ističe se da je optimiziran potrošak goriva motora S65, tako da pri MCR iznosi SFC = 167 g/kWh, nasuprot 169 g/kWh kod motora S70. Međutim, snižavanjem snage po isotahi L1-L2 do MCR' = 17 990 kW, što može odgovarati privremenoj SMCR motora 6S70 MC-E, snižava se i potrošak goriva potonjega. S druge strane, moguće je to sniženje snage izvesti po izobari L1-L3 tako da se dođe na nepunih 88 min⁻¹, ili kombinirano, te se, dakle, putem većeg stupnja propulzije nadoknađuje razlika u potrošku goriva. Zaključno: nameće se pitanje o opravdanosti umetanja motora S65 između, inače vrlo uspješnih susjeda, S60 i S70.

Tablica 4

Značajka Motor	d mm	s mm	s/d	N min ⁻¹	c _s m/s	p _e bar	p _e · c _s bar·m/s	vol. lit.*	kW/ /cil	P _B / /A**	kW/ lit	P _B / /L***	Q kNm
RTA96C	960	2500	2,60	102	8,50	18,6	158	1809,6	5720	79	3,16	3,0	536
K98ME-C	980	2660	2,71	94	8,33	18,2	152	2 006,4	5720	76	2,85	2,8	581
K108ME-C	1080	2660	2,46	94	8,33	18,2	152	2436,8	6950	76	2,85	2,9	706
K108ME-C ¹	1080	2660	2,46	95	8,42	18,53	156	2436,8	7150	78	2,93	3,0	719

* Cilindarski volumen, dm³

** Snaga po jedinici stapne površine, kW/dm²

*** Snaga po jedinici duljine temeljne ploče

važniji parametri K108ME-C i susjednog K98ME-C, kao i eventualno pojačanog K108ME-C¹, te najjačeg motora *Wärtsilä-Sulzer* RTA96C; sve pri MCR.

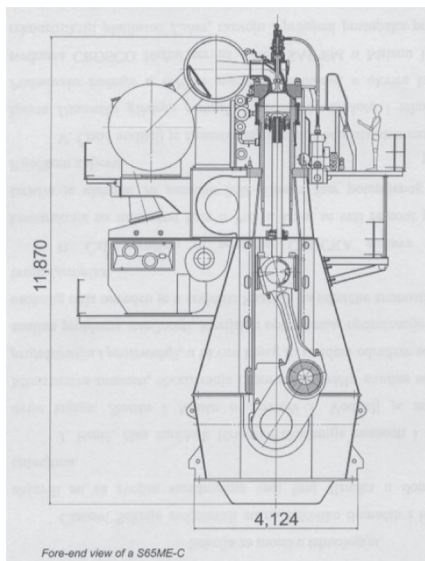
Dakle, snaga (MCR) motora 14K108ME-C iznosi 97 300 kW, suha masa 3258 t, duljina 32,65 m, visina oko 14 m, a širina temeljne ploče 4,64 m. Po svemu, to je apsolutno najveći brodski dizelski motor u povijesti, pa će biti zanimljivo reći o njemu nešto više u drugom okviru. Budući da se podrazumijeva izravno spajanje, tj. jednovijčana konfiguracija, ostaje da se ocijene uvjeti i mogućnosti apsorpcije tako velike predane snage, koja premašuje sve do sada viđeno.

Na svoj je način zanimljiva podudarnost snage motora RTA96C i K98ME-C, tako da oba 14-cilindarska sloga razvijaju 80 080 kW, ali pri različitim brzinama vrtnje i srednjim efektivnim tlakovima. Također se vidi da je *Sulzerov* motor jače opterećen, mehanički i termički. Oba graditelja deklariraju i jednaki potrošak goriva koji, pri MCR, iznosi 171 g/kWh, što pak rezultira umnoškom stupnja termičke iskoristivosti i mehaničkog stupnja djelovanja $\eta_t \cdot \eta_m = 0,493$. Imajući niže okretaje i veći zakretni moment Q , motor K98ME-C, u odnosu na RTA96C, bolje će odgovorati relativno sporijim brodovima, gdje je izraženija komponenta sile, odnosno poriva.

Hidrodinamički aspekti jednovijčane propulzije velike snage

Druga generacija *postpanamax* kontejnerskih brodova s više od 6000 TEU i brzinama u službi koje prelaze 25 čvorova, približila se vrlo velikim snagama od kakvih 70 MW. Tako velike propulzijske snage u jednovijčanom polju sustrujanja bitno smanjuju projektnu sigurnosnu zalihu. Stoga se usporedo razmatraju i dvovijčani sklopovi, tj. podjela snage na dva vijka te odgovarajuće rasterećenje. Međutim, brodovlastnici daju prednost jednovijčanoj propulziji kao ekonomičnijoj, uz vijak koji je, nalazeći se u sredini, bolje zaštićen.

Ovdje se, dakle, radi o jednovijčanim brodovima s izravno spojenim dvotaktnim sporokretnim dizelskim motorima prosječne brzine vrtnje oko 100 min⁻¹. Njihovi vijci, tipično, imaju šest fiksnih krila promjera iznad 8,5 m i velikog omjera površine krila prema disku, obično $A_e/A_o > 0,90$. S obzirom na spomenutu veliku snagu zahtijeva se dostatna čvrstoća, sigurnost od kavi-



Motor S65ME-C

cijske erozije i induciranih vibracija, kao i visok stupanj propulzijske djelotvornosti.

Veliko specifično opterećenje snagom tih propelera, tj. više od 1 MW/m² površine diska, zatim rad u nejednolikom polju sustrujanja uz vrlo visoke obodne brzine od 45 m/s ili čak i više, ostavlja krajnje malo sigurnosnog pretička. Pažljivo oblikovanje krmenog dijela trupa i postizanje što homogenijeg polja sustrujanja, zatim osiguranje obilne vršne zračnosti te izraženo zakrivljena krila pritom poboljšavaju kavitacijsku sliku i ublažavaju vibracije izazvane vijkom. Čvrstoća krila, pak, upućuje na vertikalnu izvodnicu, ili dapače, onu s negativnim nagibom.

Za usporedbu: tipična obodna brzina vijka npr. *Suezmax* tankera ili *bulker*a iznosi oko 35 m/s, a specifično opterećenje snagom oko 0,26 MW/m² površine diska; dok su vijci dvaju brzih teretnih *linera*, izgrađenih u splitskom brodogradilištu sedamdesetih godina minuloga stoljeća, dosegali 37 m/s i 0,57 MW/m². Potonji su vijci u ono doba izazvali mnoge neprilike: kavitacijsku eroziju, vibracije, strujni umetak u gornjem dijelu otvora, odn. propelerne statve, da bi se ublažila turbulentnost pritjecanja u tom sektoru.

- Kod brodova za prijevoz kontejnera od oko 10 000 TEU i gaza 15 m (v. *Brodogradnja* br. 2/2001), s predviđenom snagom od 100 MW dolazi se do vijka promjera 10 m, što daje opterećenje od kakvih 1,27 MW/m² diska. Brzina na pokusnoj plovidbi pri 90 MW i 95 min⁻¹ iznosi oko 27, a u službi oko 26 čvorova. Obodna brzina vijka doseže 50

m/s pa se može zamišljati sudar vrška krila i vode, brzinom od 180 km/sat, poglavito u gornjem sektoru kruga. Primjena najsloženijih alata pokazuje da je to hidrodinamički još provedivo, makar se nalazilo i na samoj granici. Naime, J. Holtrop i H. Valkhof (MARIN, rad izložen na skupu RINA-e posvećenom *Design and Operation of Container Ships-u*, 23-24. travnja 2003, London.), raspravljajući o hidrodinamičkoj slici jednovijčane propulzije kontejnerskih brodova velike snage, povezuju glavne parametre kao što su vršna zračnost, dopustiva dubina vrha središnjeg sustrujanja, te neke od glavnih značajka propelera, putem *indeksa teškoće* (*Difficulty Index*, DI, u preliminarnoj projektnoj fazi. Prema tome, DI ne bi smio prijeći brojčanu vrijednost 7:

$$DI = \frac{T N^2 \Delta w^5 \nabla^{3/4}}{5 \cdot 10^7 Z Ae/Ao \sqrt{C}} < 7$$

- Δw - veličina sustrujanja pri vršnom radijusu vijka, tj. $\Delta w = (V_{\max} - V_{\min}) / V = w_{\max} - w_{\min}$
 C - najmanja zračnost između vrška krila i korita, m
 N - brzina vrtnje vijka, min⁻¹
 Z - broj krila,
 T - poriv vijka, kN
 ∇ - volumen istisnine broda, m³.

Prema modelskim ispitivanjima navedene klase jednovijčanih brodova od oko 10 000 TEU, spomenuti autori izveli su formule za privremeno određivanje snage propulzije P_D i poriva vijka T na pokusnoj plovidbi pri punom gazu od 15 m:

$$P_D = 0,0034 V^{3,842} \nabla^{0,45405} (B/L)^{0,2711} C_p^{1,264}$$

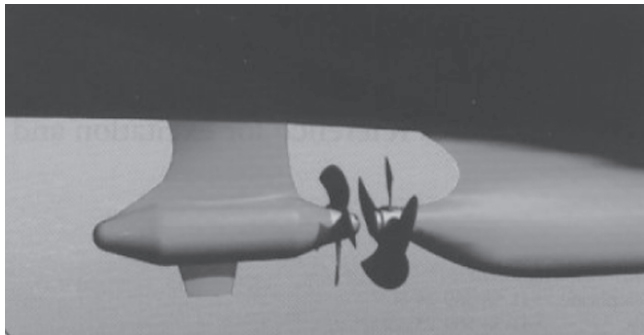
$$T = 0,018 V^{2,6832} \nabla^{0,3875} (B/L)^{0,19524} C_p^{1,37}$$

gdje su:

- P_D - snaga, kW
 V - brzina, čvorovi
 B - širina, m
 L - duljina između okomica, m
 C_p - koeficijent finoće forme
 T - poriv vijka, kN.

Uočava se izražena opasnost od kavitacijske erozije kormila, više uslijed kavitacijskog vrtloga krilnih vrškova, a u manjoj mjeri od glavine vijka. Uobičajena je *mariner*-izvedba kormila, a pritom se djelotvornima pokazuju horizontalne rubne trake. Utješno jest to što su dotične trake,

PRIKAZI



Dva 8-cilindarska motora *Sulzer RTA96C* u gondolama mega kontejnerskoga broda

tj. krilca koja s pretičkom slijede profil kormila, ujedno prokušani konstruktivni element njegova tijela, omogućavajući istodobno udobni kutni var s vanjske strane.

Ono što pogađa brodove za prijevoz kontejnera, poglavito velike s više od 6000 TEU, jest ograničeni gaz mnogih terminala. Već tipičan gaz od 12 m *Panamax* brodova za prijevoz kontejnera uz odgovarajući visoki omjer *B/T*, slabi pomorstvene osobine, uključujući pritom otpor i propulziju. Napuštanje tih ograničenja i prihvaćanje dubljih gazova *meganosača* iznad 10 000 TEU, npr. 16 m, pa i više, bitno bi poboljšalo sliku, naročito hidrodinamičke performanse sklopa: propeler-kormilo. Smanjio bi se omjer *D/T*, vijak bi bio dublje uronjen, polje sustrujanja homogenije i brže, uz bolji stupanj djelovanja vijaka i ljepšu sliku kavitacije.

Današnji trenutak dizelskoga stroja u dvokretu

Da, relativno visok stupanj propulzijske djelotvornosti izravno spojenog sporokretnog dvotaktnoga dizelskog motora, nadmašujući time sve druge konkurentne porivne sklopove, proteklih je pedeset godina obilježio i poticao njegov razvoj i rast, i doveo do – nekoć zaista nepojmljivih – 100 MW vršne snage. Istina, s cilindrom čiji promjer po drugi put u povijesti prelazi 1

metar, te pregolelim sklopom od 14 porodanih cilindara. Bolna iskustva iz prošlosti trebala bi podsjetiti i upozoriti na pogibelji koje donosi taj fizički rast. Troškovi razvoja i uvođenja novih, velikih motora, lomovi i financijski gubici pogađaju indirektno i brodogradilišta, uključivši i naša.

S druge strane, takozvani *economy of scale*, tj. ekonomičnost veće nosivosti (upravo dobivamo *Airbus 380...*), uz zadržavanje visokih brzina brodova za prijevoz kontejnera, upućuju na velike snage propulzije. Koji bi bio pravi put i tko o njemu odlučuje? Simpozij *Sorta 2004* podsjetio nas je na zaboravljanu ulogu *ingénieura* - brodograđevnog, strojarskog ... Što bi se tu moglo reći?

Ne vjerujem u 14-cilindarske pokretačke fizikume mase 3300 tona, smještene u strojnici oceanskog broda. Zaustavio bih se na motoru 12RTA96C snage 68 640 kW pri 102 min⁻¹ (*Wärtsilä-Sulzer*), te 12K98 ME/C snage 68 640 kW pri 94 min⁻¹, odnosno 12K98ME/C-C snage 68 520 kW pri 104 min⁻¹ (*MAN B&W*). Podrazumijeva se buduće umjerenno povećavanje te snage, što bi proizašlo iz daljnjeg razvoja tih istih motora, a putem mogućeg povišavanja srednjeg efektivnog tlaka i diskretnog povećanja stapne brzine. To praktički znači snagu MCR do kakvih 70 MW, koju će lakše dosegnuti motor K98 jer je manje

opterećen od RTA96. Eto, s takvim jednovijčanim maksimumom, ugrađenim u *post-panamax* brod može se doći do postizivog maksimuma TEU za danu brzinu u službi od 25 čvorova, te alternativno posegnuti za još većim brodom, ali nešto manje brzine.

Zahtjevu za uvođenje *mega nosača* iznad 10 000 TEU, uz brzinu u službi od 25 do 26 čvorova, mogu odgovoriti sporokretni dvotaktni motori promjera do 960, odn. 980 mm, i manji, prema današnjem programu vodećih graditelja, dijeljenjem snage uglavnom na dva načina:

a) 1 vijak izravno spojen + 1 CRP gonjen elektromotorom, oba u uzdužnoj ravni simetrije, koristeći, dakle, prednosti jednovijčane propulzije, tj. $\eta_H > 1$, i

b) konvencionalna dvovijčana propulzija s motorima 960 i 980 mm, ili manjim.

Moglo bi se zaključiti da osnivanje, konstrukcija i uvođenje golemih sklopova sporokretnih dvotaktnih dizelskih motora, s više od 12 cilindara, provrta iznad 1 m i snage 100 MW i više, izaziva mnoge neizvjesnosti, osobito utrošak energije i vremena uz velike novčane izdatke. Umjesto toga bilo bi racionalnije pažnju i napore usmjeriti prema motorima vršne snage 70 MW i manje, sve do najmanjih snaga kakva 2 MW (npr. motor *MAN-B&W - S26MC*), da im se povisi termički stupanj iskoristivosti, poboljša ispušna emisija, osigura pouzdanost kod promjenjivih režima rada.

CRP slog tvrtke ABB

