

Propulzijska parna turbina na brodovima od 1960. do danas

UDK 621.16/.18:656.12»1960/1987«

UVOD

Povijest propulzijske parne turbine na brodovima počinje sa Sir Charles Parsonsom još 1894. [1], kada je on obavio prvu pokusnu vožnju sa postrojenjem koje ga nije zadovoljilo. No već je 1896. njegova »Turbinia« s novim postrojenjem snage 1690 kW uz $n = 36,64 \text{ s}^{-1}$ postigla brzinu od 29,6 čvorova. Nešto kasnije je, nakon izmjena oblika i veličine vijaka zadivila na svečanom prikazivanju brodova u Spitheadu brzinom od 34,5 čvora.

U isto su vrijeme stapni parni strojevi već bili dostigli visok stupanj razvoja. Uskoro se, 1911., pojavio i dizel motor nove izvedbe pogodan za propulziju prekooceanskoga broda, postavljen na brodu Seelandia.

Tako je počela utakmica između tri vrste propulzije na brodovima. Dva su takmaca, dizel motor i parna turbina, ostali na poprištu sve do današnjih dana, dok je stapni parni stroj uglavnom nestao iz upotrebe (kao zanimljivost valja spomenuti da se zadnjih godina u nekim časopisima uporno pojavljivao oglas tvrtke Skinner iz SAD koja nudi svoje stape parne strojeve za ugradnju na brodove u propulzijske svrhe, te je nedavno dovršen i jedan trajekt u Poljskoj, pogonjen Skinnerovim stapnim parnim strojem, uz upotrebu ugljena kao goriva).

Poslije I svjetskoga rata u pomorstvu prevladava parna propulzija [4], pri čemu se za veće snage, pogotovo iznad 4000 kW koristi parna turbina. Pred II svjetski rat dizel motor postaje ozbiljan takmac parnoj turbini. 1940. pojavljuje se motor koji radi na teško gorivo zvano Bunker »C«, što je važan trenutak u borbi za zauzimanje mjesta na brodovima [9].

Međutim, motori su se izrađivali za snage do najviše 5000 kW, te im je upotreba bila ograničena na brodove do 10 000 DWT uz brzinu od 17 čvorova. Veće snage dolazile su u obzir samo za parne turbine.

Između dva svjetska rata broj je parnih i dizelmotornih brodova bio približno izjednačen, ali je nosivost parnih brodova ukupno bila veća.

Sredinom 60-ih godina počinju se graditi dizel motori za snagu do 25 000 kW, što je dovoljno i za najveće teretne brodove. Specifična je potrošnja goriva za ove motore iznosila oko 0,210 kg/kWh, a za parne turbine oko 0,270 kg/kWh [4]. Međutim, specifična se potrošnja motora i turbine ne može jednostavno uspoređivati, bez daljih razmatranja. Treba uvijek imati u vidu da potrošnja goriva kod turbine uključuje i potrebe osnovnih potrebnih pomoćnih strojeva. Turbinsko je postrojenje bilo u stanju koristiti gorivo lošije kakvoće, dakle, niže cijene. Među-

tim, veličine brodova što su se tada gradili, bile su takve da je dizel motor bio vrlo prikladan izbor za propulziju.

Do ponovnoga oživljavanja brodskih propulzijskih parnih turbina dolazi krajem 1962. [2]. Tada američka tvrtka General Electric najavljuje svoju izvedbu propulzijskoga parnoturbinskoga postrojenja MST—13. Ovo je postrojenje bilo jednoravninsko, tj. sa simetralama svih ležajeva i kondenzatora u jednoj ravnini, te je zahtijevalo manju visinu strojarne.

Početak 1963. Stal-Laval iz Švedske nudi na tržištu svoj niz parnoturbinskih postrojenja s oznakom AP (Advanced Propulsion — unaprijeđena propulzija). Prvo je ugrađeno u Shellov tanker »Drupa« od 68.000 DWT u 1965. godini [8].

Graditelji turbina su predviđali da će se graditi sve veći tankeri, koji će zahtijevati sve veće snage za propulziju. K tome se očekivala i gradnja većega broja velikih kontejnerskih brodova, s brzinama oko 30 čvorova, kojima će također biti potrebne velike snage za propulziju. Parna je turbina osobito prikladna za velike tankere, jer je njima potrebna i vrlo velika količina pare za pomoćne svrhe. Tako npr. na tankeru »Nanny« od 495 000 tdw treba 105 t/h pare za pomoćne svrhe. Ovu paru daje jedan od njegova dva propulzijska parna kotla kapaciteta 120 t/h, tako da pomoćni kotao uopće nije potreban. Ovaj se podatak odnosi na potrebe za parom za vrijeme iskrcavanja goriva [14]. U vožnji se pomoćna para također može dobiti korištenjem pare iz propulzijskih kotlova.

Također je važno za velike tankere da se inertni plin za punjenje tankova tereta može dobiti od dimnih plinova iz glavnih kotlova, budući je faktor pretička zraka za izgaranje manji od 1,05 npr. na spomenutom tankeru »NANNY«, s kotlovima Combustion Engineering CE V2M — 12 čak manji od 1,03. Zbog toga je sadržaj kisika u dimnim plinovima manji od 4%.

Ispušni se plinovi iz dizel motora ne smiju koristiti kao izvor inertnoga plina za tankove tankera, jer je zbog znatno većega pretička zraka za izgaranje i ispiranje, postotak kisika iznad dozvoljene granice za inertni plin. Obično je granica alarma na 6% O₂. Zato treba postaviti poseban generator inertnoga plina koji troši gorivo.

2. Oživljavanje parnoturbinske propulzije

Za ilustraciju povećanja broja parnoturbinskih propulzijskih kompleksa na brodovima sredinom šezdesetih godina vrijedi pogledati stati-

stike dovršenih, porinutih u more i naručenih brodova, izrađene za rujan 1967. godine [2]. Vidi se da instalirana snaga za propulziju među dovršenim brodovima pripada sa 93,15% dizel motorima, a sa 6,85% parnim turbinama. Najznačajniji su proizvođači (po redu) Mitsubishi, GE (USA), Westinghouse, Stal — Laval, De Laval.

Među brodovima koji su u istom razdoblju porinuti u more na instaliranu snagu dizel motora otpada 88,89%, a 11,11% snagu turbina. Među naručenim brodovima 67,9% instalirane snage imalo bi pripadati dizel motorima, a čak 32,1% parnim turbinama. Kao izrazito najjači proizvođači parnih turbina javljaju se General Electric i Stal — Laval. Do 1979. Stal — Laval je isporučio ukupno 310 kompleta postrojenja tipa AP [6]. Na mnogim su brodovima i parne turbine General Electric, Mitsubishi i Kawasaki.

Gradnja većega broja brodova s parnoturbinskom propulzijom nastavlja se sve do 1976. [10]. U razdoblju od 1976. do 1983. broj se ovih brodova kretao kako slijedi: 113, 50, 32, 14, 22, 13, 2, 10. Zanimljivo je da u 1983. broj nije pao na nulu, iako se to moglo očekivati. Ovo je otprilike i vrijeme kada se pojavljuju i prvi brodovi nakon više od 20 godina, koji imaju parnoturbinsku propulziju, a koriste ugljen kao gorivo. Prvi je bio »River Boyne« u 1982. [16], [17] i [18]. Sa »Energy Independence«, isporučenim 1983., ukupno je 10 brodova [19], što novogradnja, što pregrađenih s prethodnog loženja tekućim gorivom, koji danas koriste ugljen kao gorivo za propulziju.

Među malim brojem brodova koji su i dalje imali parnu propulziju obično se uvijek nalazio, ili su se isključivo nalazili, ako se radi o brodograditeljima izvan SAD, brodovi za prijevoz ukapljenoga zemnoga plina LNG. Razlog za ovo leži u činjenici što prilikom prijevoza dio ukapljenoga plina, koji je u tankovima na približno atmosferskom tlaku i odgovarajućoj temperaturi zasićenja od oko — 163°C, isparava zbog prolazanja topline kroz izolaciju tankova.

Ispareni se plin mora odvoditi kako tlak u tankovima ne bi rastao, te se može ispuštati u atmosferu, ponovo ukapljivati u skupim uređajima i skupim postupkom, ili koristiti kao dio goriva za loženje kotlova. Drugi je dio goriva tekuće gorivo, tj. kotlovi koriste dva razna goriva, istovremeno iz raznih plamenika. Ovim se snizuje ukupni trošak za gorivo i dobiva ekonomičniji pogon.

LNG brodovi imaju ukapljenoga plina u tankovima i nakon iskrcavanja glavnine tereta, jer moraju ostaviti količinu plina potrebnu za hlađenje tankova ispravljanjem, kako bi pri dolasku na ponovno ukrcavanje temperatura u tankovi ma bila na propisano niskoj razini.

3. Neke karakteristike najčešće ugrađivanih parnoturbinskih postrojenja

To su svakako STAL — LAVALOVA postrojenja iz niza AP te GENERAL ELECTRICOVA postrojenja s oznakom MST — 13.

Turbinska su postrojenja oko 1907. uz tlak pare od 14 bar trošila goriva 0,68 kg/kWh, svedeno na današnju kakvoću [9]. Oko 1960. uz tlak od 40 bar, temperaturu 440 do 450°C, specifična je potrošnja parnoturbinskih postrojenja između 0,320 i 0,327 kg/kWh te stupanj djelovanja 0,27.

Postrojenja uvedena oko 1963. najčešće koriste tlak oko 60 bar, a uvode se i tlakovi od oko 80 bar te oko 100 bar. Temperatura pregrijanja za sve je tlakove ista i iznosi između 510 i 520°C. Podaci za pojedina postrojenja nalaze se u [2], [3], [9].

Razlog usvajanju ove temperature pregrijanja je korištenje za izradu cijevi pregrijača u najtoplijem dijelu niskolegiranih feritnih čelika sa 1% Cr i 0,4% Mo, te 2,25% Cr i 1% Mo. Oni se mogu koristiti do temperature stijenke od 566° C [9]. Zanimljivi su zbog cijene, tehnoloških svojstava i otpornosti na rad u promjenjivim režimima rada. Spomenuta temperatura bi trebala biti garancija da se uz neophodnu temperaturnu razliku za prolaz topline nigdje ne postigne nedopustivo visoka temperatura materijala pregrijača.

Turbine su u dva kućišta, sa dva paralelno postavljena vratila i strujanjem pare u suprotnom smjeru u dva kućišta.

Broj okretaja visokotlačnoga rotora je reda veličine 100/s, a niskotlačnoga 66.67/s. Različiti brojevi okretaja čine da su srednji promjeri rotora različiti, manji u visokotlačnom dijelu a veći u niskotlačnom dijelu. Tako se postiže da lopatica u visokotlačnom dijelu ne bude prekratka, a u niskotlačnom preduga.

Turbina za vožnju natrag smještena je u kućištu niskotlačnoga rotora, i sastoji se najčešće od dva Curtisova kola sa po dva vijenca radnih lopatica.

Jednoravninsko AP postrojenje STAL — LAVAL i GE MST — 13 iste izvedbe načelno su vrlo slična. Veća je razlika samo u izvedbi rektora. Kod obaju para iz niskotlačne turbine odlazi u kondenzator strujeći u smjeru osi turbine, jer je i simetrala kondenzatora približno u istoj ravnini sa simetralama ležajeva.

Redovno se koriste višestepene akcijske turbine, čime se smanjuje dužina i masa postrojenja, dok su reakcijske izvedbe uglavnom izvan upotrebe (Westinghouse i Blohm und Voss).

Kao prvi regulacijski stupanj koristi se namjesto Curtisova kola jedan akcijski stupanj izrazito većega promjera od slijedećega stupnja (parcijalni privod u prvom stupnju ovo omogućuje).

Izbacivanje Curtisova kola pridonosi, makar malenom, povećanju stupnja djelovanja turbine. Općenito je karakteristika ovih postrojenja korištenje svih, pa i najsitnijih, mogućnosti povećanja stupnja djelovanja postrojenja kao cjeline, polazeći od kotla pa sve do vijka.

U konstrukcijskim se detaljima svih elementa sustava nastoji postići što veća jednostavnost, npr. kućišta STAL — LAVALOVIIH turbina,

vrlo jednostavan oblik kondenzatora za razliku od starih srcolikih kondenzatora. Posebno se nastoji povećati pouzdanost dijelova sustava pažljivom konstrukcijom, izborom materijala i preporučena održavanja. Npr. u kondenzatorima se uvode cijevi od mjedi s aluminijem (78% Cu, oko 20% Zn, oko 2% Al i vrlo mali postotak arsena koji je koristan kao inhibitor korozije). Za povećanje otpornosti cijevi prema koroziji preporučuje se obrada otopinom željeznoga sulfata Fe^3SO_4 [13].

Kod STAL — LAVALOVIIH turbina novije izvedbe manevarski je ventil ujedno i brzozaporni, koriste se samo tri grupe sapnica itd.

Stal — Laval je uveo vrlo zanimljive novosti u konstrukciju reduktora. Oni su ili dvostepeni za visokotlačni rotor i dvostepeni za niskotlačni rotor, ili trostepeni za visokotlačni i dvostepeni za niskotlačni rotor. Pri tome prva dva stupnja za visokotlačni rotor mogu biti epicikličke (prvi »zvijezda« izvedba, drugi planetarna), a prvi za niskotlačni planetarne izvedbe (zbog nižega broja okretaja centrifugalna sila na »plane- te« neće biti prevelika.

S vremenom uvedeni stupanj automatizacije posve je jednak onome kod dizel motora.

Postignuta specifična potrošnja goriva kreće se od 0,273 kg/kWh do 0,248 kg/kWh, uz stupnjeve djelovanja od 0,308 do 0,338.

Ovdje treba još jednom napomenuti da se potrošnja goriva kod dizel motora i parne turbine ne odnosi na iste svrhe, budući da se u potrošnju turbine odmah uračunava i para potrebna za pogon neophodnih pomoćnih strojeva i uređaja. Ovo detaljno razmatra H. Rein u [5], te polazeći od iznesenih postavki uspoređuje ekvivalentnu potrošnju goriva turbinskoga postrojenja s međupregrijanjem pare, sporohodnoga dizel motora i srednjekretnoga dizela. Njihove nominalne potrošnje su, uz goriva različitih kakvoća 0,238 kg/kWh, 0,181 kg/kWh. Nakon korektura potrebnih za svodenje na istu razinu dobiva slijedeće ekvivalentne vrijednosti potrošnje goriva: parna turbina 0,2383 kg/kWh, dizel motor 0,244 kg/kWh te srednjekretni dizel motor 0,232 kg/kWh. Naravno, može se izraziti sumnja u autorove pretpostavke i postupak, ali je rezultat ipak vrlo dojmljiv, te služi kao značajna ilustracija problema.

4. Neki uzroci povišenja uspješnosti i smanjenja potrošnje goriva

4.1. Kotao. Prije svega, stupanj djelovanja kotla povišen je sa 0,87 u 1960. na 0,907 (s obzirom na gornju ogrijevnu vrijednost goriva), odnosno 0,957 na donju nešto iza 1965. Ovo se temelji na:

1. Snižanju pretička zraka za izgaranje usavršavanjem sustava za raspršivanje goriva i vrtloženje u ložištu. Tu ubrajamo i prijelaz na stropno loženje ili tangencijalno loženje u CE V2M9 kotlu.

2. Snižanju temperature na izlazu dimnih plinova iz kotla sa ranijih 170°C [2], na 130°C i konačno samo 116°C. U ovom slučaju ogrijevne površine zagrijača zraka treba da budu otporne na niskotemperaturnu koroziju, npr. emajlirane.

4.2. Povećanje broja regenerativnih grijača napojne vode

Osobito značajno utječe povećanje broja ovih zagrijača do 5, te je to broj koji se nastoji koristiti. Napojna voda ulazi u kotao sa temperaturom koja može doseći i 220°C.

4.3. Način pogonjenja turbogeneratora

Najstarija postrojenja imaju turbogeneratore pogonjene kondenzacijskom parnom turbinom. Novije izvedbe koriste protutlačnu parnu turbinu, uključenu u parni sustav glavne turbine. Npr. para iz turbine turbogeneratora dijelom služi za grijanje deaeratora, a dijelom za dalju ekspanziju u niskotlačnoj turbini.

Najnovija ideja za uštedu je korištenje turbogeneratora privješeni na reduktor i napojnih pumpi pogonjenih sa reduktora glavne turbine (veći stupanj djelovanja) [9]. STAL — LAVAL više voli protutlačni turbogenerator i napojnu pumpu eventualno privješenu na turbogenerator.

4.4. Hlađenje kondenzatora, evaporatora i ulja za podmazivanje

I za ove se svrhe može koristiti glavni kondenzat, te se tako vraća i najmanja količina topline.

4.5. Uspostavljanje strujanja morske vode kroz kondenzator samim gibanjem broda (scoop system)

Kada je brzina broda manja od neke unaprijed određene, radi cirkulacijska pumpa. Postigne li brod zadanu brzinu, cirkulacijska se pumpa isključuje, struja morske vode prema kondenzatoru je obilazi i ulazi u kondenzator zahvaljujući prikladno oblikovanom otvoru na dnu broda (scoop). Obično se u ovom slučaju koristi jednoprolazni kondenzator zbog manjih otpora strujanja, a najčešće se koristi na tanke- rima.

4.6. Način održavanja vakuuma u kondenzatoru odnosno izvlačenja zraka iz njega

Parni je ejektor bio ranije jedini korišten. Vrlo je pouzdan, ali troši mnogo energije. Zato su mnogi zbog uštede prešli na upotrebu vakuumske pumpe pogonjene elektromotorom.

4.7. Primjena naknadnoga ili međupregrijavanja

Prvi je put primijenjeno već 1940. u SAD na brodovima »Examiner« i »Venore« [9]. Slije-

deci je bio brod »Idemitsu maru« 1966. godine

Otada do 1980. izgrađeno je 23 broda s ovakvim tipom procesa. Dobiva se stupanj djelovanja iznad 0,338, ali je zbog veće složenosti sustava i problema s naknadnim pregrijačem za vrijeme vožnje natrag rijetko korišteno na brodovima.

4.8. Komentar s obzirom na načine povišenja stupnja djelovanja

Kotao ložen tekućim gorivom, postigavši rad uz pretičak zraka 1,025 (npr. MARINE RADIANT od BABCOCK WILCOXA, V2M9 od COMBUSTION ENGINEERING), uz temperaturu dimnih plinova na izlazu od 116°C, ne može dalje povišivati svoj stupanj djelovanja. Prema tome, stupanj djelovanja od 0,907 prema gornjoj ogrijevnoj vrijednosti teškoga goriva ili 0,957 prema donjoj ogrijevnoj vrijednosti istoga goriva, predstavlja granični stupanj djelovanja broskog kotla na tekuće gorivo.

Jedan važan elemenat, koji je išao u prilog veće uspješnosti turbinske propulzije, bila je mogućnost postizanja znatno nižih brojeva okre-

dukcije u reduktoru. Ovi su brojevi okretaja teoretski mogli doći i do 1/s, što je bilo znatno niže od onoga što su mogli postići sporohodni dizel motori (danas ovo već nije sasvim točno). Međutim, vrlo niski brojevi okretaja vijka primjenjivi su samo za vrlo velike vijke, a ovi za brodove sa vrlo velikim gazom, kakvi se danas više ne grade (spominjalo se uštede na propulzijskoj snazi od čak 10 do 15% za najveće tan- kere).

Broj regenerativnih zagrijača, uz dva visokotlačna grijača doveden na ukupno pet, također ne pruža dalje mogućnosti povišenja stupnja djelovanja. Sve ostale mogućnosti, uz loženje tekućim gorivom, tlakove 60, 80 ili 100 (105) bar te nešto ispod 520°C posve su iskorištene.

Stanje u kondenzatoru nisam ni spominjao jer se ono standardno uzima kao 0,05 bar, s tim da uz nižu temperaturu mora bude nešto niže, uz višu nešto više.

Zaključak je da nužno treba, želimo li povisiti stupanj djelovanja, ili učiniti da turbinsko postrojenje daje jeftiniju energiju, pristupiti je-dnom od slijedećih zahvata:

Castrol

MARINE OILS

World-wide 24 hours Supply
and technical service



Please contact:
The Burmah Oil (Deutschland) GmbH
Castrol Marine Division
Esplanade 39, 2000 Hamburg 36
Phone: 04035941
Telex: 213676

Our Agent in Yugoslavia:
Transjug Rijeka
Trščanska 8
RIJEKA
Phone: 311 11
Telex: 24115

1. Bitno povisiti tlak i temperaturu pare na ulazu u turbinu, kako bi se povisila ulazna entalpija pare i povisio toplinski stupanj djelovanja — posljedica će biti problemi mehaničke prirode: izbor materijala za najosjetljivije dijelove, izbjegavanje korozije na raznim mjestima u kotlu, novi materijali za parnu turbinu.

2. Izabrati drugi tip postrojenja, npr. spoj plinske i parne turbine — problem veća složenost pogona, što na brodu nije poželjno, i veći troškovi nabave, te ograničenost u izboru goriva.

3. Iskoristiti činjenicu da je parna turbina pogonski stroj s vanjskim izgaranjem te da može koristiti i možda jeftinije vrste goriva kakve dizel motor ne može koristiti (barem danas). Tako je bilo u prošlosti, kada je turbina mogla koristiti daleko teže i jeftinije tekuće gorivo. Ova se mogućnost u nedavnoj prošlosti, oko 1980. godine pružila s ugljenom. Problem je zamišljanje i stvaranje, ili bolje rečeno odabiranje najprikladnijih uređaja za prebacivanje ugljena i loženje od već postojećih na kopnu, s obzirom na okolnosti koje uvjetuje brod.

Razvoj brodskih sporohodnih dvotaktnih dizel motora, s obzirom na sposobnost korištenja goriva sve lošije kvalitete i zato jeftinijih, mogućnost postizanja sve većih pa i najvećih potrebnih snaga, stalnoga povisivanja njihova stupnja djelovanja s jedne strane, a nagli skok cijena goriva nakon 1974., depresija na tržištu broskog prostora uz smanjenje vozarina s druge strane, sužavali su interes za propulzijske parne turbine i smanjivali broj narudžbi. To je dovelo do upornih nastojanja proizvođača parnih turbina da učine ovaj stroj ponovo vrijednim takmacem dvotaktnoga sporohodnoga dizel motora na polju brodske propulzije.

Najprije su ipak brodovlasnici i proizvođači morali riješiti probleme u kojima su se našli mnogi, čak i posve novi brodovi s turbinskom propulzijom. To su bili prije svega vrlo veliki tankeri i kontejnerski brodovi treće generacije. Ovi drugi su imali ponekad i najveću snagu propulzijskih strojeva. Neki kontejnerski brodovi iz trgovačke flote pod zastavom SAD imali su parne turbine ukupne snage 2 x 44 118 kW, s dva vijka. Snaga od 2 x 29 412 kW bila je kod ovih brodova vrlo česta.

5. Rješavanje problema ekonomičnosti turbinskih brodova nakon porasta cijena tekućega goriva i krize tržišta broskog prostora

Neki su brodovi jednostavno usidreni ili čak prodani u rezališta. Na onima koji su bili ostavljeni u plovidbi činjeno je nekoliko zahvata.

5.1. Zamjena parnih turbina dvotaktnim sporohodnim dizel motorima

Ovo je vrlo skup i složen posao. Pogotovo je problem uređivanje prostora na brodu na

koji se može postaviti i nasloniti veliki motor, vrlo velike mase.

5.2. Zamjena parnih turbina srednjekretnim četverotaktnim dizel motorima

Ovi su motori znatno manje mase. Lakše se i u kraćem vremenu može pripremiti mjesto na koje se moraju postaviti motori. Tako je npr. tankeru »Mobil Hawk«, građenu 1976. zamijenjena parna turbina od 26850 kW uz 1,5/s sa dva IHI — SEMT — Pielstick 12 PC 4 četverotaktna dizel motora uz 6,67/s.

5.3. Promjena karakteristika parno turbinskoga postrojenja

Na primjer, da bi se u nekom STAL — LAVAL turbinskom postrojenju diglo visokotlačni rotor a namjesto njega stavilo visokotlačni i srednjetačni dio novijega postrojenja VAP (Very Advanced Propulsion), kako bi se omogućilo primjenu viših parametara pare i time viši stupanj djelovanja, jedan bi se kotao morao iznijeti u komadima, dok bi ostali bitni dijelovi sustava ostali netaknuti, a to je glavna prednost, uz manje izmjene.

5.4. Promjene u detaljima istoga postrojenja, kako bi se omogućio ekonomičan rad na znatno manjoj snazi od prvobitno predviđene

Jednu analizu ovoga slučaja daje K. Matsumoto u [22]. Ističe kao osnovno da postrojenje mora raditi na smanjenoj snazi, što znači i na manjem stupnju djelovanja i to zbog:

1. povećanja gubitka zbog prigušivanja (regul. prigušivanja)
2. smanjenja stupnja djelovanja turbine uz regulaciju grupama sapnica
3. smanjenja stupnja djelovanja ciklusa zbog poremećaja u oduzimanju pare za regenerativno grijanje na manjoj snazi
4. sniženja temperature pregrijanja pare, do kojega dolazi kada se kapacitet kotla smanji na 70 do 80%
5. povećanja udjela u snazi nepropulzijskih činilaca.

Da bi se navedeno izbjeglo može se:

1. smanjiti presjeke sapnica u turbini, bilo zamjenom dijafragmi, bilo zatvaranjem nekih sapnica. Doći će do porasta tlakova kroz turbinu, te se može uspostaviti uobičajeni tlak na oduzimanju pare.
2. Učiniti da kotao radi na nižem tlaku, budući da će tada volumen pare biti veći.
3. Proširiti područja u kojem se može raditi uz oduzimanje pare za regenerativno zagrijavanje. Ovo je obično na oko 80% ili više snage glavne turbine. Promijene li se veličine na koje su podešeni ventili za oduzimanje, davanje, itd. tako da se regenerativno zagrijavanje može provoditi i na manjoj snazi, povisit će se toplinski stupanj djelovanja.

Autor ističe da je zamjena dijafragmi sa sapnicama tako laka i jednostavna i može se obaviti u vrijeme redovnog pregleda te ne utječe na uporabivost broda. Donosi velike uštede uz mali trošak.

6. Novi putevi u nastojanju da se poveća ukupna ekonomičnost parnoturbinskoga postrojenja

Utvdili smo ranije da se jedina mogućnost pruža u povišenju parametara pare na ulazu u turbinu, izmjeni rasporeda postrojenja te uvođenju korištenja jeftinijega goriva, kakvo ne može koristiti dizel motor. Sva tri puta su intenzivno razmatrana, neki i uzeti istovremeno, s velikom upornošću, nakon spomenute krize.

ATLAS

jugoslavenska
putnička
agencija

Pružna sve vrste usluga
domaćim i stranim putnicima
i turistima u vezi putovanja
i boravka kao što su:

IZLETI U ZEMLJI I INOSTRANSTVU
vlastitim voznim i plovnim parkom

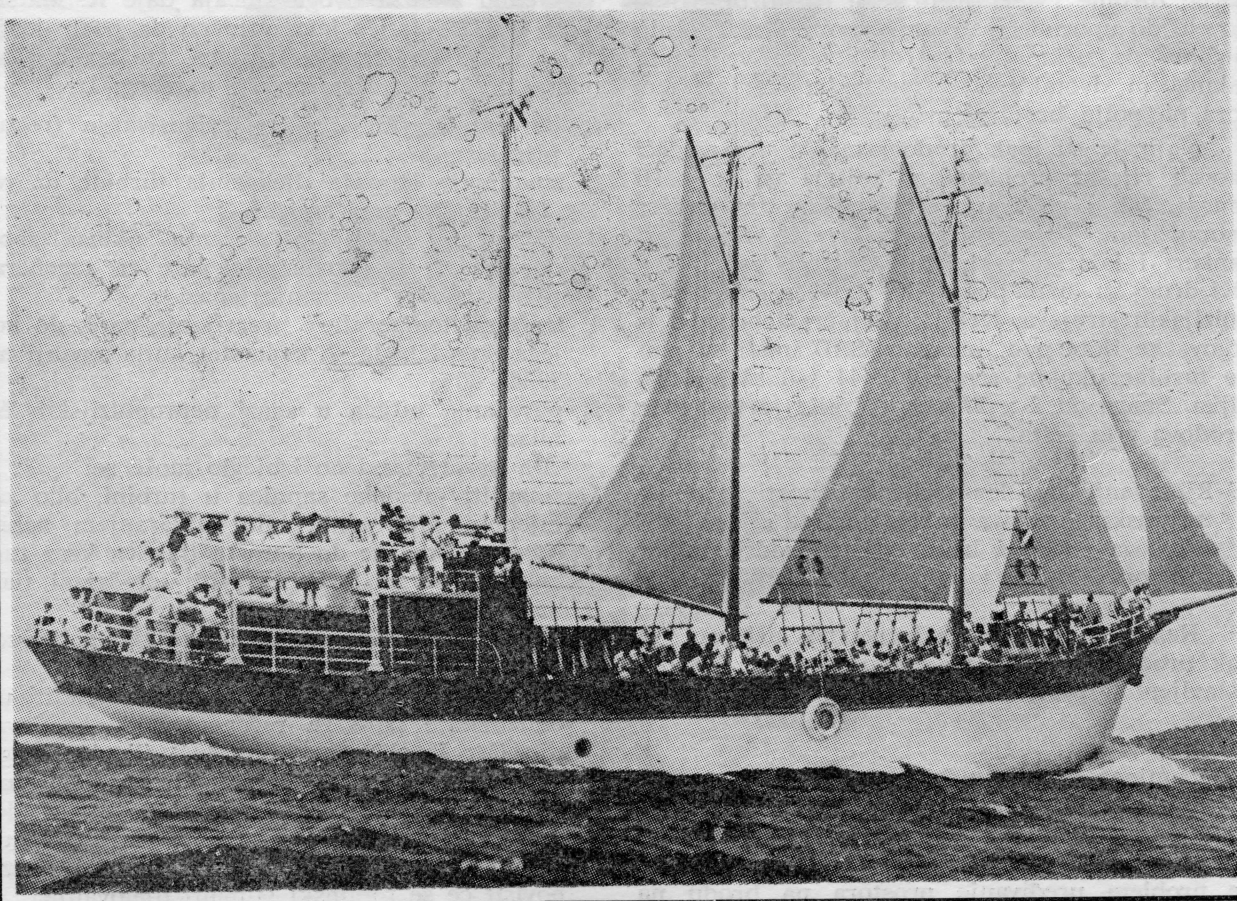
KRUŽNA PUTOVANJA / REZERVACIJA
SMJEŠTAJA, PRODAJA I REZERVACIJA
SVIH VRSTA VOZNIH ISPRAVA / ORGANIZACIJA
LOVA / VODIČKA SLUŽBA /
MJENJAČNICA i dr.

Direkcija
Dubrovnik, Pile 1

Tel.: 27-333, 22-222
Tlg.: ATLAS Dubrovnik
Tlx.: ATLAS 27515, 27583

ATLAS

GARANTIRA PRVORAZREDNU USLUGU



Međutim, jedino što je našlo primjenu već do sada na brodu jest korištenje drugoga, jeftinijega goriva tj. ugljena. Stal — Laval je demonstrirao sve nove sastavne dijelove svoga VAP — propulSION sustava u 1981., ali još nijedno takvo postrojenje nije postavljeno na brod.

6.1. STAL — LAVALOV sustav VAP — propulSION

Postrojenje je predviđeno za snage od 10 do 34,5 MW, s međupregrijavanjem pare. Konačna je temperatura pare 600°C uz primjedbu u [6] da se s obzirom na materijale upotrebljene za cijevi pregrijača i visokotlačne turbine može očekivati prijelaz na 700°C. Naime, radi se o nikalnim slitinama koje su u plinskim turbinama izvrnuti s uspjehom znatno višim temperaturama. Brojevi okretaja vijka bili bi 1 do 2/s.

Pregrijana para temperature 500°C i odgovarajućega tlaka između 100 i 140 bar dobiva se iz klasičnoga membranskoga kotla (npr. Marine Radiant, Babcock Wilcox). Pregrijavanje na 600°C obavlja se fluidiziranim ložištu s kvarcnim pijeskom kao intertnim medijem, koji se skupa s česticama goriva održava u fluidiziranom stanju pomoću zraka. Temperatura izgaranja u fluidiziranom ložištu je oko 850°C, čestice kvarca ne dozvoljavaju prijanjanje pepela s vanadijevim pentoksidom uz stijenke cijevi, te se ne javlja visokotemperaturna korozija.

Koeficijenti prijelaza topline su veći 4 do 5 puta nego u običnim kotlovima. Ložište s fluidiziranim slojem može koristiti razne vrste goriva. Iskustvo od preko 2000 sati od 1978. do 1981. dokazalo je da se u ložištu s fluidiziranim slojem može uspješno ložiti vrlo teško gorivo loše kakovće.

Sustav je zamišljen s pet stupnjeva predgrijavanja napojne vode i rotacijskim grijačem zraka. Za snagu od 20 MW trebalo bi 16 kg/s pare, tj. 2,88 kg/kWh. Specifična potrošnja goriva za istu snagu, za sve namjene, bila bi 0,235 kg/kWh, tj. stupanj djelovanja bio bi 0,36, a na većoj snazi nešto veći, 0,38.

Visokotlačna i srednjetačna turbina nisu zamišljene na zajedničkom vratilu, već su VT, ST i NT turbine posve odvojene. Manja je osjetljivost na toplinsko deformiranje i manji gubici u brtvenicama jer zračnosti mogu biti manje.

Kako zbog visokih parametara pare i maloga specifičnoga volumena ne bi lopatice u visokotlačnom i srednjetačnom dijelu bile prekratke, trebalo je smanjiti promjer rotora a povećati im broj okretaja, s obzirom na brojeve okretaja u AP — postrojenjima. Tako se za navedenu snagu predviđa 233,33/s za rotor visokoga tlaka, 208,33/s za rotor srednjega tlaka, 75/s za NT rotor.

Cijevi prvoga i naknadnoga pregrijača, urojnene u ložišta sa fluidiziranim slojem, pravljene su od nikalne slitine Incoloy 800 H.

Oblik kućišta je zamišljen tako da nema problema s naprezanjima na horizontalnim pribubicama i da što uspješnije zadovolji zahtjevima manevriranja na brodovima.

Rotor i lopatice prvih stupnjeva napravljene su od nikalnih slitina za visoke temperature. Dužina rotora VT je 1200 mm a masa 140 kg. Ukupna je masa visokotlačne 1100 kg. Kućište je otkovano od nikalne slitine, dijafragme od čelika sa 12% Cr. Spajane su zavarivanjem elektonskom zrakom.

VT turbina ima četiri grupe sapnica. Manevarski su ventili smješteni između osnovnoga kotla i ložišta sa fluidiziranim slojem, te su izvrnuti samo temperaturi od 500°C.

Osnovna je zamisao da se turbine, zupčani prijenosi i odrivni ležaj isporučuju kao u tvornici sklopljena cjelina. U zajedničkoj temeljnoj ploči je spremnik za sakupljanje ulja te su tamo i svi ostali neophodni pomoćni sustavi i uređaji. Sklop se može prevoziti kao cjelina a to olakšava postavljanje.

Prema proračunima STAL — LAVALA 1981. VAP sustav nadilazi dizel motor za tankere koji saobraćaju između Arabijskoga zaljeva i Zapadne Evrope istom ako je nosivost tankera veća od 200 000 tdw, uz dizel generator s vlastitim motorom. Ako se na tankeru postavi osovinski generator onda to vrijedi istom za tankere nosivosti iznad 240000 tdw. Ima li brod turbogenerator na otpadnu toplinu, granica je iznad 260000 tdw.

Ako bi VAP sustav koristio jeftinije gorivo, neprikladno za dizel motor, uz razliku u cijeni goriva od 3% i uz porast postepeno prema 12% u dvanaestoj godini rada, VAP bi imao prednost već na tankerima nosivosti od 110000, 150.000, 170000 tdw

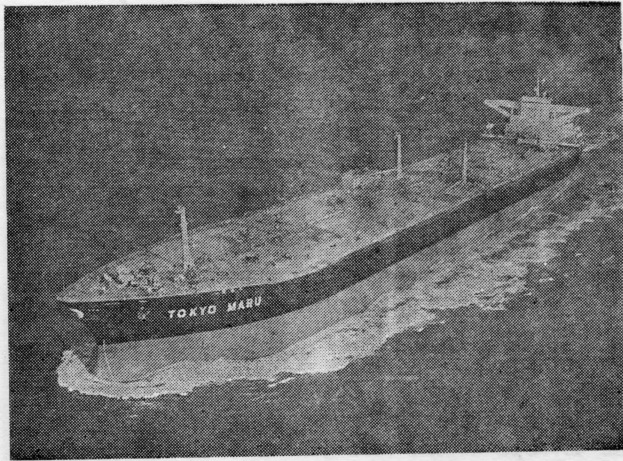
Zanimljiva je procjena da bi cijena dizel motora na teško gorivo bila oko 30% niža od VAP postrojenja iste snage. U slučaju da bi VAP sustav koristio ugljen a dizel motor tekuće gorivo uz cijene od 40\$/ toni ugljena i 160\$ po toni tekućega goriva, imao bi takav VAP sustav 40 do 50% niže troškove u radu uz istu brzinu broda. Uključivanjem svih ostalih troškova prednost VAP sustava pada na 8%.

6.2. Brodovi s parnim turbinama i ugljenom kao gorivom

Zbog stanja koje je bilo uočljivo sredinom 1980. godine, kad je cijena ugljena koji se može koristiti na brodovima bila oko 5 puta niža od cijene teškoga tekućega gorivo, računali su pokazali da bi turbinski brod uz upotrebu ugljena imao najniže ukupne troškove korištenja. Počele su rasprave o najprikladnijem rasporedu uređaja, izboru načina prebacivanja ugljena, načinu loženja itd. na brodu s ugljenom kao gorivom za propulziju.

Australci su prvi poslali brodogradilištima zahtjev za slanje ponude za gradnju takvoga broda. Naručili su zatim 2 broda u Italiji i dva u Japanu. Svi imaju oko 75000 tdw. Dva su namijenjena prijevozu boksita uz sjeveroistočnu obalu Australije, a dva za prijevoz ugljena za Japan. Nešto kasnije je u SAD rađen »Energy Independence«. U Španjolskoj je najavljeno pre-

građivanje dva turbinska tankera na tekuće gorivo, uz pravljenje nekih novih dijelova, u dva broda za rasuti teret sa parnim turbinama i loženjem ugljenom, te dva dizel motorna tankera.



U svim ovim slučajevima parnoturbinsko postrojenje nije imalo nekih novih elemenata. Parametri pare su bili vrlo konzervativni, s ciljem da ne bi došlo, zbog visoke temperature stijenki, do taljenja pepela i znatnoga prljanja ogrijevnih površina. Brodovi građeni u Japanu koriste paru od 60 bar i 475°C uz dva regenerativna grijača vode. Snaga stroja je 13970 kW pri 1,33/s.

Brodovi iz Italije imaju također turbinu od 13970 kW. Broj okretaja je 1,42/s. U oba je slučaja upotrebljen kotao CE V2M — 9S prilagođen za loženje ugljenom.

Ono što je, s obzirom na sudbinu brodskih parnih turbina ovdje zanimljivo, jest to da je gradnjom brodova na ugljen dokazano da u slučaju potrebe možemo napraviti moderan sustav za prebacivanje ugljena na brodu, koji se daje jednako automatizirati kao i sve što je u vezi sa dizel motorom. Dakle, bude li jednoga dana, iz danas nejasnih razloga potrebno koristiti se ugljenom kao gorivom na brodovima, parna je turbina zasada jedino sigurno propulzijsko sredstvo. Međutim, da bi se usavršili uređaji za korištenje ugljena, svi autori koji o tome pišu jednoglasno spominju da bi vrlo važnu ulogu imao odigrati uređaj za izgaranje u fluidiziranom ložištu. Naime, on bi omogućio korištenje različitih vrsta ugljena na istom brodu, postizanja više temperature pare, sprečavanje prljanja zbog taljenja pepela itd. Ovaj bi uređaj također koristio za izbjegavanje zagađivanja okoliša izgaranjem ugljena. On, naime, može vezati velike količine sumpora uz upotrebu odgovarajućega dodatka u fluidiziranom sloju, smanjiti ispuštanje NOx i čestica prašine.

7. ZAKLJUČAK

Parna je turbina odigrala ogromnu ulogu u povijesti broskog strojarstva. Dramatičan napredak dizel motora ograničio je njenu ulogu u trgovačkoj mornarici u zadnjim godinama. Vr-

toglav porast cijena tekućih goriva, i znatno manji ugljena, učinio je neko vrijeme privlačnom ideju o gradnji brodova s parnim turbinama uz upotrebu ugljena. Dokazano je da je moguće da se takvi brodovi naprave i budu uspješni s tehničke strane. Pad cijena tekućih goriva izmijenio je ponovo gospodarsku stranu slike o korisnosti ovih brodova. Poučeni iskustvima posljednjih godina moramo biti na oprezu, zadovoljni što je krizno razdoblje izazvalo stvaranje novih rješenja koja ostaju iskustveno blago čovječanstva.

LITERATURA

- 1 J. GUTHRIE, »A History of Marine Engineering«, Hutchinson, London 1971.
- 2 K. M. B. DONALO, »Marine Steam Turbines«, Institute of Marine Engineers, London 1977.
- 3 R. COATS, »Marine Steam Turbines«, Institute of Marine Engineers, London 1975.
- 4 V. DJURIC, »Parni kotlovi — posebna poglavlja«, BIGZ, Beograd 1973.
- 5 H. REIN, »A true comparison of Ships machinery«, Marine Propulsion (II) 5 — 1982., London.
- 6 NORBERG, »Marine steam turbines«, referat pripremljen za konferenciju »Future fuels and the diesel«, London 1979.
- 7 G. A. LARSEN, »Turbine plants in large ships«, referat pripremljen za izlaganje u Trondheimu 8. siječnja 1970., Stal — Laval, Finspong
- 8 »Ready for steam revival« redakcijski članak u Shipbuilding and Marine Engineering International, (VII) 8 — 1981.
- 9 T. OHMORI, T. MIYATAKE, K. MIYASHITA, T. SAWAMURA, »Trends and Prospects of Steam Propulsion Plant«, Bulletin of Marine Engineering Society in Japan, vol. 8, no. 2 — 1980.
- 10 SH. NAGASHIMA, »Marine Engineering Progress in 1983., 3. Steam Turbines«, Bulletin of the M. E. S. J., vol. 12, no. 2 — 1984.
- 11 W. J. FOX, »Marine Steam Engines and Turbines«, Newnes — Butterworths, London 1975.
- 12 »Steps toward higher pressure steam turbine plants«, Marine propulsion, (II) 3 — 1979. London
- 13 »Handbook no. 300 — Propulsion machinery — Tupe AP« STAL — LAVAL, Finspong
- 14 »NANNY, twin screw, steam turbine in skeg machinery«, Marine Propulsion (II) 2 — 1979., London
- 15 Z. ELČIĆ, »Parne turbine«, u Praktičar 3 — Strojarstvo 2, str. 943 — 1022, školska knjiga, Zagreb 1973.
- 16 »River Boyne«, Marine engineering / Log, vol. 87, no. 12, November 1982, New York
- 17 A. FUKUGAKI, »Coal fired ships — how to make them really viable« Second international coal fired ships conference, New York 21 — 22. October 1980.
- 18 V. OZRETIĆ, »Brodovi s pogonom na ugljen«, Brodogradnja (XXX) 4 — Zagreb 1983.
- 19 R. GRASSFELD (prema članku autora), »Energy Independence, A Coal fired Spark from USA«, The Motor Ship, June 1984.
- 20 »Mobil Hawk conversion«, Shipbuilding and Marine Engineering International, September 1979.
- 21 »Steam to steam conversion«, Marine Propulsion, vol. 3, no. 4 — 1980.
- 22 K. MATSUMOTO, »A Means to Save Fuel Cost in Existing Turbin Ships«, Bulletin of M. E. S. J., vol. 9, no. 4, 1981.
- 23 »Marine Propulsion, March 1980., London
- 24 »Ready for Steam Revival«, Shipbuilding and Marine Engineering International, July/August 1981.
- 25 Edited by J. R. HOWARD, »Fluidised beds, combustion, and applications«, Applied Science Publishers, London and New York 1983.