

Miroslav SAMBOLEK

Reaktivni propulzori - osnovni pojmovi i spoznaje

Stručni rad

U radu se sustavno prikazuje najopćenitija teorija reaktivnih propulzora - RP, njihova svojstva, različite vrste takvih propulzora i njihovi dijelovi, te veličine o kojima im ovisi stupanj korisnosti. Polazeći od najosnovnijih zakona fizike gradi se jednostavni, pregledni matematički model ovih propulzora, nužnih za pogonjenje brodova i zrakoplova. Naglašena je posebnost RP u odnosu na ostale propulzore, koje se radi određenosti može nazivati aktivnima, te sličnost njihova načina djelovanja s načinom pretvorbe toplinske energije u mehaničku, koja je opisana Drugim glavnim stavkom termodinamike. Radi jednostavnosti izvođenja i bolje preglednosti promatra se izolirani propulzor. Procijenjeni su raznovrsni gubitci snage, razmotreni su bezdimenzijski parametri koji karakteriziraju opterećenje propulzora, te su definirani stupnjevi korisnosti RP. Prikazana je originalna tablica koja sadrži potpuni sustav relacija važnih za opisivanje djelovanja RP.

Ključne riječi: propulzori, reaktivna propulzija

Reaction Propulsors – Basic Concepts and Comprehension

Professional paper

The most general theory of reactive propulsors – RP, their characteristics, various types, their principal parts and quantities on which their efficiency depends are reviewed. Starting from elementary physical laws, a simple and transparent mathematical model of RP, indispensable in ship's and airplane's propulsion, is constructed. The specific features of RPs compared to other types of propulsors, which are for the sake of unambiguousness called active, are pointed out. Some analogy of RP's way of action with the process of transformation of heat energy to mechanical work, as described by the second law of thermodynamics, is accentuated too. For the sake of simplicity of the derivation and clearer insight, an isolated RP is considered. Different sources of energy losses are judged, nondimensional parameters of RP loading are reviewed and efficiencies are defined. An original table containing a full set of formulas which are necessary to describe the functioning of RP is presented.

Key words: propulsor, reaction propulsion

Adresa autora (Author's address):
Brodarski institut, Zagreb

Primljeno (Received): 2006-05-31
Prihvaćeno (Accepted): 2006-09-11
Otvoreno za raspravu (Open for discussion): 2007-12-20

Uvod

Ovim se člankom želi podsjetiti na neke odavno dobro poznate činjenice o teorijama djelovanja propulzora [2], ali uvesti i nove pojmove. Pita li se zašto treba ponovno govoriti o nečemu poznatome, može se odgovoriti da se to, što je poznato, želi prikazati na drugačiji, novi način. Cilj je dati sažeti, lako razumljivi i fizički očiti prikaz koji će pomoći da se bolje shvate i dožive, da postanu bliži, pojmovi o načinu rada reaktivnih propulzora - RP. No osim toga ovdje se uvode i neke nove funkcije, pojmovi, formule i prikazi, koji se posebno odnose na način definiranja opterećenja propulzora, te na određivanje stupnja korisnosti.

Na početku evo objašnjenja nekih osnovnih pojmova o *reaktivnim propulzorima*.

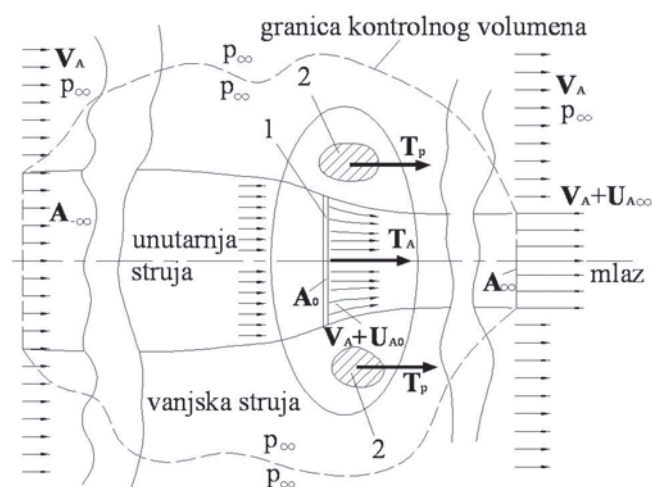
Reaktivni propulzori - RP *nužni* su kada se želi na neko tijelo djelovati određenom silom (najčešće jednakom otporu medija koji ga okružuje, zrak ili voda, s namjerom da bi se tijelo gibalo jednolikom brzinom), a pritom se ne može ostvariti mehaničku silu između tijela koje se giba i tijela – to je gotovo uvijek Zem-

lja – u odnosu na koje se (ono) giba. Međutim, ako se spomenuta mehanička sila ipak može ostvariti rabe se *aktivni propulzori*, primjerice kotač na cesti ili tračnici. Ali, naravno, i vozilima koja se gibaju *površinom* drugih nebeskih tijela (Mjesec, Mars) nije nužna primjena reaktivnih propulzora.

Osnovna je značajka reaktivnoga propulzora da on *aktivnom* silom djeluje na neku konačnu masu – najčešće fluid koje uzima iz okolice, odnosno kod raketnih propulzora na masu koja je ukrcana na vozilo – tako da se *poriv* T , sila kojom propulzor djeluje na tijelo/vozilo na koje je ugrađen, ostvaruje kao *reaktivna* sila ubrzavane mase.

Premda se ponekad RP primjenjuju samo zato da se stvori potrebna sila (npr. odsukivanje broda), ipak najčešće propulzor goni/tjera vozilo brzinom V_A . Tako RP pri gibanju obavlja rad, razvija korisnu *snagu poriva* P_T . Za pogon potrebnu snagu P_D propulzor dobiva od pogonskoga stroja; prema tome RP je pretvornik *dovedene snage* P_D u korisnu snagu P_T . Iznimno važan pokazatelj uspješnosti RP je stupanj korisnosti $\eta_o = P_T / P_D$, koji se naziva *stupanj korisnosti izoliranoga propulzora*. Stupanj korisnosti RP bitno se – kvalitativno, a ne samo kvan-

titativno - razlikuje od stupnja korisnosti mehaničkih, aktivnih propulzora, kao, primjerice, već spomenutoga kotača na krutoj podlozi. Razlika je u tome što je za djelovanje RP *nužno* "izgubiti" određenu snagu. Po tome kao pretvornik energije RP pokazuje izvjesnu sličnost s toplinskim strojevima, koji također pri pretvorbi toplinske energije u mehanički rad uvijek moraju neki dio toplinske energije predati toplinskom spremniku niže temperature [6].



Slika 1 Prikaz brzina strujanja i poriva na složenom RP koji se sastoji od aktivnog dijela 1 i pasivnih dijelova 2; elipsa prikazuje cijeli propulzor

Figure 1 Presentation of the flowing velocities and thrust developed on RP consisting of active part 1, and passive parts 2; the ellipse encircles the complete propulsor

Ovdje će se govoriti samo o brodskim RP koji ubrzavaju dio vode kroz koju se gibaju, pri čemu neki dio mase vode protječe kroz propulzor. RP mogu biti *jednostavni*, oni imaju samo jedan dio, i *složeni*, koji imaju više dijelova na kojima se stvara poriv. Na slici 1 shematski je elipsom, koja obuhvaća i aktivne i pasivne dijelove, predodčen cijeli propulzor. Granice kontrolnog volumena su tako daleko od RP da je svugdje na njima tlak jednak tlaku neporemećene vode.

Dijelovi propulzora koji ostvaruju poriv mogu biti *aktivni* i *pasivni*. Aktivni su oni koji prenose dovedenu snagu na vodu, oni razvijaju poriv T_A , dok se pasivnima ne dovodi snaga, ali strujanje vode i na njima stvara silu uzgona, koja ima neku, od nule različitu, sastavnicu u smjeru poriva jednaku T_p . Tako za ukupni poriv RP vrijedi: $T = T_A + T_p$.

Obični brodski vijak primjer je *jednostavnoga* propulzora, koji ima jedan aktivni dio; vijak u Kortovoj sapnici je *složeni* RP kojemu je aktivni dio vijak, a sapnica pasivni dio; RP kojega čini par suosnih, suprotnovrtećih vijaka je *složeni* propulzor koji ima dva aktivna dijela.

Izvanjsku struju propulzora čini voda koja struji oko ili kroz RP, ali joj se *ne mijenja* energija, dok je *unutarnja struja* sastavljena od vode koja je pri strujanju kroz aktivni dio propulzora *primila* energiju. Dio unutarnje struje iza propulzora zove se *mlaz*.

Gotovo da nema primjera propulzije broda gdje su RP i trup broda tako udaljeni, da praktički ne postoji njihovo *međudjelovanje*/interakcija, osim moguće kod izvanbrodskoga Z pri-

gona s vrlo dugom "nogom". Ipak, u ovom se radu – radi jednostavnosti i bolje preglednosti – to međudjelovanje zanemaruje i promatra se *izolirani propulzor*, ili kako se kaže propulzor u *uvjetima neograničene vode* ("open water condition").

1. Osnovni zakoni fizike važni za objašnjenje djelovanja reaktivnih propulzora

Osnovne odnose između veličina važnih za proučavanje RP može se dobiti primjenjujući neke temeljne prirodne zakone, pri čemu će se promatrati zbivanja unutar kontrolnog volumena, dalje KV, omeđenoga kontrolnim plohama, tj. unutar konačnih kapljevitihi ili plinovitihi tijela omeđenih geometrijskim plohama [3], [4], [9].

Prvo će se primijeniti načelo klasične fizike o *održanju mase*. Pretpostavljaju se neviskozna tekućina gustoće ρ i gibanje nekoga općenitoga propulzora brzinom V_A . Pritom je jednak (nema ni izvora niti ponora tekućine) protok mase M (kg/s) kroz sve presjeke unutarnje struje propulzora, brzina struje na ulazu u KV je V_A , a na izlazu $V_A + U_{A\infty}$. Izlazni presjek unutarnje struje RP ima ploštinu A_∞ , a ulazni A_0 . Onda se jednadžba kontinuiteta, jer se vodu smatra nestlačivom, može ovako napisati:

$$M / \rho = A_0(V_A + U_{A0}) = A_\infty(V_A + U_{A\infty}) = A_\infty V_A \quad (1)$$

Načelo o održanju energije omogućuje primjenu I. stavka termodinamike na zatvoreni KV koji uključuje dostatno veliki volumen vode u okolišu RP kojemu se dobavlja mehanička snaga P_D . Korisna *snaga poriva* $P_T = T \cdot V_A$ umnožak je brzine gibanja propulzora V_A u odnosu na okolnu vodu i sile poriva T . Ta se snaga, u ovome modelu izoliranoga RP, iznosi iz kontrolnog volumena ili ako se smatra da je pojava stacionarna, onda iz KV mora istjecati energija. Prema tome brzina prirasta energije u KV iznosi $\Delta P = P_D - P_T$. Općenito, bilo kakav RP, a posebno brodski vijak, vodi u KV predaje za poriv neiskorištenu snagu ΔP koja može imati mnoge raznolike oblike, od kojih je najvažnija kinetička energija translacije mlaza. Brzina translacije mlaza općenito nije svugdje jednaka, ali će se nadalje, opet radi jednostavnosti, pretpostavljati stalnom, nepromjenjivom po presjeku. Za razliku od drugih oblika gibanja vode iza RP ovo je gibanje *nužno* za stvaranje poriva, pa se ni u jednom modelu RP, bez obzira koliko je pojednostavljen, ne smije zanemariti. Snaga gubitaka zbog kinetičke energije translacije mlaza označuje se P_{AL} , pri čemu se indeks odnosi na engleski "axial loss", a iznosi:

$$P_{AL} = \frac{M \cdot U_{A\infty}^2}{2} = \frac{T \cdot U_{A\infty}}{2} \quad (2)$$

Ukupno dovedena mehanička snaga P_D veća je od snage $P_j = P_T + P_{AL}$ koju bi trebalo dovesti RP, a koja se zove *snaga mlaza*, kada bi postojali samo nužni gubici. Brodski vijak, kao jednostavni propulzor, uvijek stvara i *kinetičku energiju rotacije mlaza*, jednaku P_{RL} ("rotational loss"). Taj se gubitak, u *složenom* RP koji uz vijak ima i satorsko kolo, može barem djelomično iskoristiti, pri čemu treba napomenuti da postojanje rotacijskoga gubitka nije nužno za djelovanje RP.

Nadalje se u KV susreće gubitak snage, koji je ovdje uvjetno nazvan *ireverzibilnim* gubitkom P_{IL} , koji se sastoji od a) *kinetičke energije* kaotičnoga, *turbulentnog* gibanja P_{TL} i b) mehaničke snage pretvorene u toplinu, *disipacije* mehaničke energije P_{DL} , tako da je $P_{IL} = P_{TL} + P_{DL}$.

Moguće nije naodmet objasniti razloge zbog kojih je autor ubrojio i gubitke zbog turbulentnosti strujanja u ireverzibilne gubitke, kojima - naravno - po svojem termodinamičkom karakteru disipacija imanentno pripada. Dobro je poznata „kaskada“ postupnoga smanjivanja na početku velikih vrtloga u turbulentnom strujanju, prema sve manjima i manjima, dok se u konačnici turbulentnost ne svede na gibanje molekula, što je, naravno, toplinski gubitak, tj. povećanje unutarnje energije tekućine. Ako si dopustimo izlet u područje znanstvene fantastike mogli bi zamisliti kako bi se u nekim drugim mjerilima linearnih dimenzija i vremena - neka slična razumna bića koja mnogo brže žive - moglo iskoristiti neki vrlo mali, kratkovječni vrtlog, kao što vjetrenjačama iskorištavamo vjetar, vrtložno strujanje velikih atmosferskih vrtloga.

Sada se može pisati zakon održanja energije, odnosno - u uvjetima ustaljenoga strujanja - snage:

$$\Delta P = P_D - P_T = P_{AL} + P_{RL} + P_{LL} = P_{AL} + P_{RL} + P_{TL} + P_{DL} \quad (3)$$

Pokusom se snaga P_D može lako odrediti, ne samo na modelu, već i na brodu, dok je snagu P_T na vijku u naravi, za razliku od modela teško odrediti, jer je poriv veličina koju nije jednostavno mjeriti.

2. Načelo održanja količine gibanja

Kombinacija Drugoga i Trećega Newtonovog zakona izražena u obliku u kojemu se može zgodno primijeniti na strujanje fluida naziva se stavak o impulsu, ili integralni Eulerov teorem, koji je izveden iz zakona očuvanja održanja količine gibanja. Za primjenu ovoga teorema potrebno je prikladno definirati kontrolni volumen KV; uzevši da je on tako velik da su tlakovi na zatvorenoj plohi koja ga obuhvaća svugdje jednaki i ograničivši se samo na sastavnice sila u pravcu gibanja propulzora dobiva se sljedeći izraz u kojemu je poriv izražen pomoću veličina u beskonačno udaljenom presjeku mlaza, odnosno veličina na disku:

$$T = M \left((V_A + U_{A_\infty}) - V_A \right) = M \cdot U_{A_\infty} = \rho A_\infty (V_A + U_{A_\infty}) U_{A_\infty} = \rho A_0 V_0 U_{A_\infty} \quad (4)$$

Važno je naglasiti da napisana formula vrijedi kako za jednostavni, tako i za složeni propulzor, pri čemu se poriv stvara na svim dijelovima složenoga propulzora.

Međutim, na jednostavnom propulzoru, koji se zamišlja u obliku propulzorskog diska, čitav poriv T djeluje samo na disk, pa se sila poriva može dobiti pomoću razlike tlakova na stražnjoj p_2 i prednjoj strani p_1 diska, a koje se određuje dvokratnom primjenom Bernoullijeva teorema (integrala ili jednadžbe).

$$T = (p_2 - p_1) A_0 = \rho A_0 \left(V + \frac{U_{A_\infty}}{2} \right) U_{A_\infty} \quad (5)$$

Bernoullijev je teorem, također, izveden iz zakona o očuvanju količine gibanja, pa je važno da se ne primjenjuje na isti dio strujanja kao i Eulerov teorem, tj. od jedne do druge beskonačnosti, već od diska do pozitivne, odnosno drugi put do negativne beskonačnosti. Naime, uzastopna uporaba u biti iste zakonitosti, ali različito izražene, ne može dovesti do dobro definiranog modela - jedna jednadžba nedostaje.

Usporedba dva izraza za poriv, (4) i (5), pokazuje da je u primjeru jednostavnog RP brzina strujanja kroz disk jednaka

$$V_0 = V_A + \frac{U_{A_\infty}}{2}, \text{ što znači da je aksijalna sastavnica na disku indu-}$$

cirane brzine jednaka polovini brzine inducirane u beskonačno dalekom presjeku mlaza. To je sadržaj u teoriji RP često primjenjivanoga *teorema Froudea - Finsterwaldera*, [1] i [2].

3. Razni načini definiranja opterećenja propulzora

Stupanj korisnosti propulzora, o kojem će se još govoriti, ponajprije i pretežito ovisi o njegovu opterećenju. Pored uobičajenog i općenito primjenjivanog koeficijenta opterećenja vijka porivom, C_{Th} , ovdje se spominju i neki drugi koeficijenti opterećenja; riječ je o opterećenju momentom i snagom, te o drugačijem načinu definiranja koeficijenta, tj. glede A_∞ ploštine beskonačno dalekoga presjeka mlaza. To je važno da bi se moglo proučavati i druge tipove propulzora, a ne samo slobodne vijke, osobito da bi se moglo uspoređivati vijke s mlaznim propulzorima. Opterećenje RP određuje gornju granicu *stupnja korisnosti propulzora* η_o , koju nikad nije moguće prijeći, a može se definirati na više načina. Vrlo jednostavan, ali fizički vrlo utemeljen i razumljiv parametar opterećenja je omjer/kvocijent aksijalne sastavnice inducirane brzine u mlazu u beskonačnoj udaljenosti iza propulzora i brzine dostrujavanja:

$$\beta = \frac{U_{A_\infty}}{V_A} \quad (6)$$

Sljedeća, dobro poznata mogućnost definiranja opterećenja je pomoću *koeficijenta opterećenja porivom*; pritom se može kao karakterističnu ploštinu uzeti hidraulička ploština RP, a to je ploština aktivnog dijela propulzora, pa se dobiva:

$$C_{Th} = \frac{2T}{\rho V_A^2 A_0} \quad (7)$$

gdje je za obični brodski vijak $A_0 = \frac{D^2 \pi}{4}$.

Ako se pak uzme ploština presjeka mlaza u beskonačnosti A_∞ , što je vrlo pogodno ako se želi usporediti vijke s mlaznim propulzorima, jer je A_∞ približno jednak ploštini sapnice mlaznoga propulzora, dolazi se do sljedećega izraza, koji nije obuhvaćen popisom simbola ITTC-a:

$$C_{T_\infty} = \frac{2T}{\rho V_A^2 A_\infty} \quad (8)$$

Manje se susreće, ali je uključena u popis simbola ITTC-a, veličina zvana *koeficijent opterećenja snagom*:

$$C_P = \frac{2P_D}{\rho V_A^3 A_0} \quad (9)$$

Modificirani koeficijent opterećenja vijka snagom, izražen pomoću ploštine presjeka mlaza u beskonačnosti, definiran je ovako:

$$C_{P_\infty} = \frac{2P_D}{\rho V_A^3 A_\infty} \quad (10)$$

U tablici 1 sustavno su prikazani svi ovdje spomenuti bezdimenzijski parametri kojima se izražava opterećenje reaktivnih propulzora, kao i formule pomoću kojih se od jednoga poznatog parametra može doći do drugih, traženih.

4. Stupnjevi korisnosti reaktivnoga propulzora

U stvarnim uvjetima propulzoru se isporučuje *dovedena snaga* P_D , dok bi isti propulzor u uvjetima kad nema drugih gubitaka osim *neizbježivih*, trošio manju snagu koja se naziva *snaga mlaza* i označena je simbolom P_J . Snaga mlaza jednaka je zbroju korisne snage poriva P_T i neizbježive snage gubitaka P_{AL} zbog kinetičke energije mlaza.

$$P_J = P_T + P_{AL} \quad (11)$$

Treba razlikovati *idealni* stupanj korisnosti propulzora, koji nazivaju i *stupanj korisnosti mlaza*

$$\eta_{TJ} = \frac{P_T}{P_T + P_{AL}} = \frac{P_T}{P_J}, \quad (12)$$

od *realnoga* stupnja korisnosti η_o izoliranoga propulzora kod kojega se povrh neizbježivoga gubitka kinetičke energije aksijalne brzine mlaza P_{AL} pojavljuju i svi ostali razni gubici. Taj se realni stupanj korisnosti može u obliku umnoška ovako prikazati:

$$\eta_o = \frac{P_T}{P_D} = \frac{P_T}{P_J} \cdot \frac{P_J}{P_D} = \eta_{TJ} \cdot \eta_{JP}. \quad (13)$$

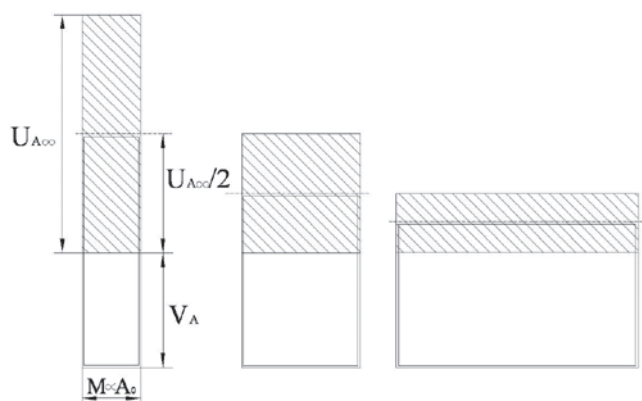
Omjer snage mlaza i RP dovedene snage naziva se *hidraulički stupanj korisnosti*

$$\eta_{JP} = \frac{P_J}{P_D}. \quad (14)$$

Stupanj korisnosti izoliranoga propulzora je stvarna, izmjeriva fizička veličina, koju se može razmjerno lako odrediti pokusom *slobodne vožnje* modela propulzora u bazenu. Za razliku od njega, nedostižan *idealni stupanj korisnosti mlaza* η_{TJ} je veličina koju treba procijeniti, u okviru neke teorije, odnosno nekog matematičkog modela RP, tako da se predvidi gubitak snage P_{AL} .

Kao što je već uvodno spomenuto, stupanj korisnosti RP se *bitno*, kvalitativno, razlikuje od stupnja korisnosti aktivnih mehaničkih propulzora, kao npr. kotača lokomotive ili dizalice na tračnicama, odnosno automobilskoga pneumatika na asfaltu. Ta bitna razlika u odnosu na aktivni propulzor sastoji se u tome što je za djelovanje RP *nužno* "izgubiti" određeni dio snage dovedene RP-u. Po tome kao pretvornik energije RP pokazuje izvjesnu sličnost s toplinskim strojevima, koji također pri pretvorbi toplinske energije u mehanički rad uvijek *moraju* neki dio toplinske energije predati toplinskom spremniku niže temperature. Na slici 2 geometrijski je pokazana ovisnost stupnja korisnosti mlaza, definiranog jednadžbom (12), pri čemu je korištena u tablici 1 dana ovisnost stupnja korisnosti mlaza η_{TJ} o

$\beta = \frac{U_{A\infty}}{V_A}$; osjenčani pravokutnici predočuju isti poriv T koji se zahtijeva od RP; stupanj korisnosti jednak je kvocijentu ploštine praznoga pravokutnika i dvostruko obrubljenoga pravokutnika.



Slika 2 Slikovni prikaz ovisnosti stupnja korisnosti mlaza η_{TJ} o protoku mase M , koji je, pri istoj brzini pritjecanja V_A razmjernan ploštini hidrauličkoga presjeka propulzora A_0 .

Figure 2 Graphical presentation of the dependence of the jet efficiency η_{TJ} on mass flow M , which is at same inflow velocity V_A proportional to the area of RP hydraulic section A_0 .

5. Veza između karakterističnih parametara reaktivnih propulzora

Ovdje će se prikazati neke često korištene relacije koje se primjenjuju kako bi se predvidio stupanj korisnosti RP kad je poznat samo vrlo ograničeni broj podataka. Dobro je poznata i često korištena formula Rusa Vetčinkina [1], koja izražava idealni stupanj korisnosti vijčanoga propulzora pomoću koeficijenta opterećenja vijka porivom (7), a glasi:

$$\eta_{TJ} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + C_{Tn}}}. \quad (15)$$

I pomoću koeficijenta opterećenja propulzora snagom koji je dan izrazom (9) može se izračunati idealni stupanj korisnosti; ova nova formula, koja se može smatrati pandanom ranije napisane formule Vetčinkina, ali je bitno složenijeg oblika, glasi:

$$\eta_{TJ} = \frac{-2 \cdot 6^{2/3} C_p + 6^{1/3} \left(9C_p^2 + \sqrt{3} \sqrt{C_p^3 (16 + 27C_p)} \right)^{2/3}}{3C_p \left(9C_p^2 + \sqrt{3} \sqrt{C_p^3 (16 + 27C_p)} \right)^{1/3}}. \quad (16)$$

Zbog svoje glomaznosti nije prikladna za neposredno izračunavanje, ali se može ucrtati u dijagram. Prednost joj je što se u nekoj ranijoj fazi osnivanja broda već približno poznaju snaga i brzina broda, tako da je C_p moguće izračunati.

Pomoću koeficijenta opterećenja vijka porivom, svedenoga na ploštinu presjeka mlaza u beskonačnoj udaljenosti od RP, formula (8), može se proračunati idealni stupanj korisnosti ovom vrlo jednostavnom formulom:

$$\eta_{TJ} = \frac{4}{3 + \sqrt{1 + 2C_{T\infty}}}. \quad (17)$$

Ovaj je izraz uobičajen pri promatranju mlaznoga propulzora, gdje se naziva *koeficijent korisnosti mlaza*, [8]. Kod mlaznoga propulzora ploština presjeka mlaza u beskonačnosti praktički je jednaka ploštini izlaznoga presjeka sapnice. Razlika je samo

u koeficijentu kontrakcije, koji je kod dobro izvedenih sapnica gotovo jednak jedan.

Kako za izolirani vijak (*ne* vijak u sapnici) vrijedi poznati teorem Froudea-Finsterwaldera, to se odnos među plošinama A_0 i A_∞ može izraziti pomoću omjera brzina, formula (6)

$$A_\infty = A_0 (2 + \beta) / (2 + 2\beta). \quad (18)$$

Sve funkcijske ovisnosti između pojedinih ovdje promatranih bezdimenzijskih veličina prikazane su u eksplicitnom obliku u tablici 1, odnosno one, koje traže duže izraze, na posebnom popisu.

Tablica 1 Funkcijske ovisnosti među promatranim bezdimenzijskim veličinama
Table 1 Functional relationship between relevant nondimensional quantities

| | $\beta = \frac{U_{A_\infty}}{V_A}$ | $C_{Th} = \frac{2T}{\rho V_A^2 A_0}$ | $C_{T_\infty} = \frac{2T}{\rho V_A^2 A_\infty}$ | $C_P = \frac{2P_D}{\rho V_A^3 A_0}$ | $C_{P_\infty} = \frac{2P_D}{\rho V_A^3 A_\infty}$ | $\eta_{TJ} = \frac{TV_A}{P_D}$ |
|--|---|---|--|-------------------------------------|---|---|
| β | 1 | $\sqrt{1 + C_{Th}} - 1$ | $\frac{\sqrt{1 + 2C_{T_\infty}} - 1}{2}$ | Formula 1 $\beta(C_P)$ | Formula 2 $\beta(C_{P_\infty})$ | $2 \frac{1 - \eta_{TJ}}{\eta_{TJ}}$ |
| $C_{Th} = \frac{8 \cdot K_T}{\pi \cdot J^2}$ | $\beta(2 + \beta)$ | 1 | $C_{Th} = \frac{C_{T_\infty} + \sqrt{1 + 2C_{T_\infty}} - 1}{2}$ | Formula 3 $C_{Th}(C_P)$ | Formula 4 $C_{Th}(C_{P_\infty})$ | $C_{Th} = \frac{4(1 - \eta_{TJ})}{\eta_{TJ}^2}$ |
| $C_{T_\infty} =$ | $2\beta(1 + \beta)$ | $2(C_{Th} + \sqrt{1 + C_{Th}} + 1)$ | 1 | Formula 5 $C_{T_\infty}(C_P)$ | Formula 6 $C_{T_\infty}(C_{P_\infty})$ | $\frac{4(2 - 3\eta_{TJ} + \eta_{TJ}^2)}{\eta_{TJ}^2}$ |
| $C_P = \frac{16 K_Q}{\pi J^3}$ | $\frac{2\beta(1 + \beta/2)^2}{\beta/2(2 + \beta)^2} =$ | $C_P = \frac{C_{Th} + \sqrt{C_{Th}^2 + C_{Th}^3}}{2}$ | $\frac{-2 + 5C_{T_\infty} + \sqrt{(2 + C_{T_\infty})^2 (1 + 2C_{T_\infty})}}{8}$ | 1 | Formula 7 $C_P(C_{P_\infty})$ | $C_P = \frac{4(1 - \eta_{TJ})}{\eta_{TJ}^3}$ |
| $C_{P_\infty} =$ | $\frac{\beta(2 + 3\beta + \beta^2)}{\beta(1 + \beta)(2 + \beta)} =$ | $C_{Th}(C_{Th} + 1 - (C_{Th} + 1)^{3/2})$ | $C_{P_\infty} = \frac{3C_{T_\infty} + \sqrt{C_{T_\infty}^2 + 2C_{T_\infty}^3}}{4}$ | Formula 8 $C_{P_\infty}(C_P)$ | 1 | $\frac{4(2 - 3\eta_{TJ} + \eta_{TJ}^2)}{\eta_{TJ}^3}$ |
| $\eta_{TJ} =$ | $\frac{2}{2 + \beta}$ | $\frac{2}{1 + \sqrt{1 + C_{Th}}}$ | $\frac{4}{3 + \sqrt{1 + 2C_{T_\infty}}}$ | Formula 9 $\eta_{TJ}(C_P)$ | Formula 10 $\eta_{TJ}(C_{P_\infty})$ | 1 |

Formule iz tablice 1:

Formula 1

$$\beta(C_P) = \frac{\left[-2 + \left(8 + 27C_P + 3\sqrt{3} \sqrt{C_P(16 + 27C_P)} \right)^{1/3} \right]^2}{3 \left(8 + 27C_P + 3\sqrt{3} \sqrt{C_P(16 + 27C_P)} \right)^{1/3}}$$

Formula 2

$$\beta(C_{P_\infty}) = -1 + \frac{\left(\frac{2}{3} \right)^{1/3}}{\left(9C_{P_\infty} + \sqrt{-12 + 81C_{P_\infty}^2} \right)^{1/3}} + \frac{\left(9C_{P_\infty} + \sqrt{-12 + 81C_{P_\infty}^2} \right)^{1/3}}{2^{1/3} 3^{2/3}}$$

Formula 3

$$C_{Th}(C_P) = \frac{-2 \cdot 6^{2/3} C_P + 6^{1/3} \left(9C_P^2 + \sqrt{3} \sqrt{C_P^3(16 + 27C_P)} \right)^{2/3}}{3 \left(9C_P^2 + \sqrt{3} \sqrt{C_P^3(16 + 27C_P)} \right)^{1/3}}$$

Formula 4

$$C_{Th}(C_{P_\infty}) = \frac{1}{6} \left(\frac{2 \cdot 2^{1/3}}{\left(27C_{P_\infty}^2 + 3\sqrt{3} \sqrt{C_{P_\infty}^2(27C_{P_\infty}^2 - 4)} - 2 \right)^{1/3}} - 2 + 2^{2/3} \left(27C_{P_\infty}^2 + 3\sqrt{3} \sqrt{C_{P_\infty}^2(27C_{P_\infty}^2 - 4)} - 2 \right)^{1/3} - 2 \right)$$

Formula 5

$$C_{T_\infty}(C_P) = 2 \frac{\left(\left(9C_P(6C_P - 17) + 3\sqrt{3} \sqrt{C_P(2C_P + 3)^2(27C_P + 16)} - 8 \right)^{1/3} + 2 \right)^2 - 30C_P}{3 \left(9C_P(6C_P - 17) + 3\sqrt{3} \sqrt{C_P(2C_P + 3)^2(27C_P + 16)} - 8 \right)^{1/3}}$$

Formula 6

$$C_{T\infty}(C_{P\infty}) = \frac{1}{6} \left(8 - \frac{4 \cdot 2^{1/3} (9C_{P\infty} - 4)}{\left(27(C_{P\infty} - 2)C_{P\infty} + 3\sqrt{3}\sqrt{C_{P\infty}^2(27C_{P\infty}^2 - 4)} + 16 \right)^{1/3}} + 2 \cdot 2^{2/3} \left(27(C_{P\infty} - 2)C_{P\infty} + 3\sqrt{3}\sqrt{C_{P\infty}^2(27C_{P\infty}^2 - 4)} + 16 \right)^{1/3} \right)$$

Formula 7

$$C_P(C_{P\infty}) = \frac{1}{12} \left(-2 + 6C_{P\infty} + \frac{2 \cdot 2^{1/3}}{\left(-2 + 27C_{P\infty}^2 + 3\sqrt{3}\sqrt{C_{P\infty}^2(-4 + 27C_{P\infty}^2)} \right)^{1/3}} + 2^{2/3} \left(-2 + 27C_{P\infty}^2 + 3\sqrt{3}\sqrt{C_{P\infty}^2(-4 + 27C_{P\infty}^2)} \right)^{1/3} \right)$$

Formula 8

$$C_{P\infty}(C_P) = \frac{1}{3} \left(-6^{1/3} \left(9C_P^2 + \sqrt{3}\sqrt{C_P^3(16 + 27C_P)} \right)^{1/3} + C_P \left(6 + \frac{2 \cdot 6^{2/3}}{\left(9C_P^2 + \sqrt{3}\sqrt{C_P^3(16 + 27C_P)} \right)^{1/3}} \right) \right)$$

Formula 9

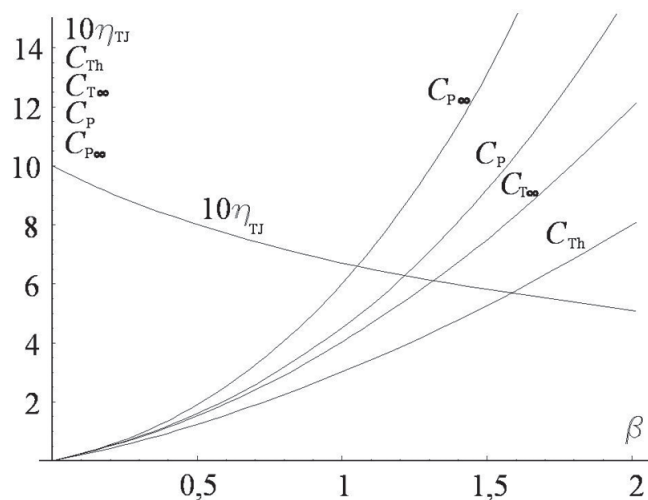
$$\eta_{TJ}(C_P) = \frac{-2 \cdot 6^{2/3} C_P + 6^{1/3} \left(9C_P^2 + \sqrt{3}\sqrt{C_P^3(16 + 27C_P)} \right)^{2/3}}{3C_P \left(9C_P^2 + \sqrt{3}\sqrt{C_P^3(16 + 27C_P)} \right)^{1/3}}$$

Formula 10

$$\eta_{TJ}(C_{P\infty}) = \frac{1}{6C_{P\infty}} \left(8 + \frac{4(-4 + 9C_{P\infty})}{\left(-8 - \frac{27}{2}(-2 + C_{P\infty})C_{P\infty} + \frac{3}{2}\sqrt{3}\sqrt{C_{P\infty}^2(-4 + 27C_{P\infty}^2)} \right)^{1/3}} - 2 \cdot 2^{2/3} \left(-16 - 27(-2 + C_{P\infty})C_{P\infty} + 3\sqrt{3}\sqrt{C_{P\infty}^2(-4 + 27C_{P\infty}^2)} \right)^{1/3} \right)$$

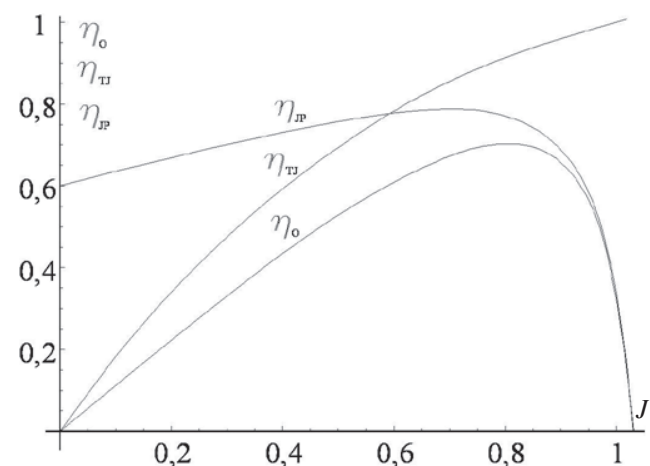
Slika 3 Ovisnost na različite načine definiranoga koeficijenta opterećenja i deseterostruke vrijednosti stupnja korisnosti η_{TJ} o relativnom prirastu brzine u beskonačno dalekom presjeku mlaza RP

Figure 3 Dependence of differently defined loading coefficients and tenfold value of efficiency η_{TJ} on relative increase of water flow velocity in infinitely distant section of RP jet



Slika 4 Ovisnost stupnjeva korisnosti izoliranog vijka WB5.70 s P/D = 1 o koeficijentu napredovanja J; (1) - stvarni (pokusom određeni) stupanj korisnosti η_o , (2) - stupanj korisnosti mlaza η_{JP} (nekad nazivan idealni, teorijski) i (3) - hidraulički stupanj korisnosti η_{JP}

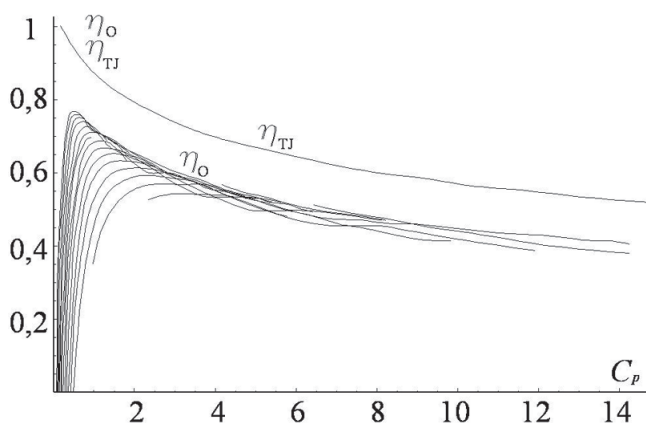
Figure 4 Dependence of efficiencies of the propeller WB5.70, P/D = 1 on advance coefficient J; (1) - open water efficiency (experimentally determined) η_o , (2) - jet efficiency (formerly ideal efficiency) η_{TJ} and (3) - hydraulic efficiency η_{JP}



Radi zornijega shvaćanja odnosa definiranih formulama u tablici, nacrtano je više dijagrama, koji prikazuju neke od važnijih funkcijskih veza. Tako je u obliku dijagrama prikazana ovisnost različito definiranih opterećenja RP, te (idealnog) stupnja korisnosti mlaza η_{TJ} o β - omjeru prirasta brzine i brzine dostrujavanja vode, vidjeti sliku 3.

Radi boljšega uvida u odnose između različito definiranih stupnjeva korisnosti Wageningenskih vijaka [5] pokazana je slika 4 koja se odnosi na vijak WB5.70 s omjerom uspona $P/D=1$.

Budući da se često već u ranoj fazi osnivanja broda poznaju snaga pogonskoga stroja, brzina broda i koeficijent sustrujanja, te promjer vijka, to se može izračunati koeficijent opterećenja snagom C_p , kojega je definicija napisana u tablici 1, a potom je jednostavno odrediti i idealni stupanj korisnosti η_{TJ} . Za vijake raznovrsne geometrije ispitane u Wageningenu pomoću tamo dobivenih regresijskih formula izračunate su vrijednosti η_o stupnja korisnosti u uvjetima slobodne vožnje i te su u obliku snopa krivulja, skupa s idealnim stupnjem korisnosti η_o , η_{TJ} nacrtane u dijagramu na slici 5. Lako je uočiti da je razlika između najvećih u praksi postizivih vrijednosti η_o i apsolutno najveće, načelno moguće vrijednosti η_{TJ} gotovo neovisna o opterećenju vijka i da iznosi oko 0,125.



Slika 5 Dijagram ovisnosti stupnjeva korisnosti o koeficijentu opterećenja propulzora snagom C_p . Na vrhu je krivulja η_{TJ} a ispod je snop krivulja koje odgovaraju stupnjevima korisnosti η_o za razne vrijednosti koeficijenta napredovanja J (od 0,4 do 1,0) Wageningenskih vijaka serija WB.3.35, WB.5.70 i WB.7.90

Figure 5 Graphical representation of differently defined efficiencies on power loading coefficient C_p . On the top is η_{TJ} and below it is a bundle of curves corresponding to open water efficiencies η_o for different advance coefficients J of Wageningen propeller series WB.3.35, WB.5.70 and WB.7.90

Zaključak

Izrazi dobiveni pomoću osnovnih i najopćenitijih fizičkih zakona, ne samo što omogućuju shvaćanje i razumijevanje, moglo bi se reći dobivanje osjećaja za procese koji se odvijaju pri radu reaktivnih propulzora, već daju i praksi korisne upute za svrsishodno projektiranje brodskih vijaka, kao i procjenu njihovog očekivanog stupnja korisnosti.

Literatura

- [1] ARTJUŠKOV, L. S., AČKINADZE, A. Š., RUSECKIJ, A. A.: "Sudovye dvižiteli", Sudostroenie, Leningrad, 1988.
- [2] BASIN, A. M., MINIOVIĆ, I. JA.: "Teorija i rasčēt grebnyh vintov", Sudostroenie, Leningrad, 1963. BI 13 252
- [3] FANCEV, M.: "Mehanika fluida", posebni otisak iz Tehničke enciklopedije JLZ, Zagreb, 1982.
- [4] FEDJAEVSKIJ, K.K., VOJTKUNSKIJ, JA.I., FADDEEV, JU.I.: "Gidromehanika", Sudostroenie, Leningrad, 1968. BI 2 205
- [5] LAMMEREN, W. P. A. van, TROOST, L., KONING, J. G.: "Resistance, Propulsion and Steering of Ships", Haarlem, Holland, 1948.
- [6] SAMBOLEK, M.: "O stupnju djelovanja propulzora", Zbornik radova III. simpozija "Teorija i praksa brodogradnje" održanog u Zagrebu 1978.
- [7] SAMBOLEK, M.: "Noviji razvoj brodskih propulzora", Zbornik radova IX. simpozija "Teorija i praksa brodogradnje" održanog u Dubrovniku 1990.
- [8] SAMBOLEK, M.: "On Jet Propulsion Efficiency", Brodogradnja 45 (1997) 2, p. 133-135
- [9] ŠAŠIN, V. M.: "Gidromehanika", Vysšaja škola, Moskva, 1990.

Popis uporabljenih simbola

| | | |
|---------------|---|-------------------|
| A_{∞} | površina presjeka unutarnje struje beskonačno daleko ispred propulzora | m^2 |
| A_o | površina presjeka aktivnog dijela RP; površina unutarnje struje na prolazu kroz propulzor | m^2 |
| A_z | površina presjeka unutarnje struje beskonačno daleko iza propulzora | m^2 |
| C_p | koeficijent opterećenja snagom | 1 |
| C_{pz} | koeficijent opterećenja snagom definiran pomoću površine mlaza A_z | |
| C_{Tn} | koeficijent opterećenja porivom | 1 |
| C_{Tz} | koeficijent opterećenja porivom definiran pomoću površine mlaza A_z | |
| M | protok mase | kg/s |
| p_{∞} | tlak u neporemećenoj beskonačno rasprostrtoj tekućini | Pa |
| P_{AL} | snaga gubitaka kinetičke energije zbog aksijalne brzine (translacije) mlaza | W |
| P_D | propulzoru predana mehanička snaga | kW |
| P_{Dl} | snaga gubitaka zbog disipacije mehaničke energije mlaza | W |
| P_H | snaga gubitaka | W |
| P_J | snaga mlaza | W |
| P_{rl} | snaga gubitaka kinetičke energije rotacije mlaza | W |
| P_r | korisna snaga poriva | kW |
| P_{Tl} | snaga gubitaka zbog turbulentnoga gibanja tekućine/vode u mlazu | W |
| T | ukupni poriv reaktivnoga propulzora | N |
| T_A | suma poriva aktivnih dijelova RP | N |
| T_P | suma poriva pasivnih dijelova RP | N |
| U_{A0} | aksijalna sastavnica na aktivnom dijelu RP inducirane brzine | m/s |
| $U_{A\infty}$ | aksijalna sastavnica beskonačno daleko u mlazu inducirane brzine | m/s |
| V_A | brzina pritjecanja vode propulzoru | m/s |
| β | omjer konačnoga prirasta brzine u mlazu i brzine pritjecanja | 1 |
| ΔP | prirast energije u KV u jedinici vremena (izgubljena snaga) | W |
| η_{TP} | hidraulički stupanj korisnosti propulzora | 1 |
| η_o | stupanj korisnosti izoliranoga propulzora | 1 |
| η_o | stupanj korisnosti izoliranoga propulzora | 1 |
| η_{TJ} | stupanj korisnosti mlaza | 1 |
| ρ | gustoća vode (općenito fluida) | kg/m ³ |