

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik 3 (1975/1976)

Številka 4

Strani 178-185

Zvonko Trontelj:

VETER, VODA, JADRANJE IN MALO FIZIKE

Ključne besede: fizika.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/3/3-4-Trontelj.pdf>

© 1976 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

© 2009 DMFA - založništvo

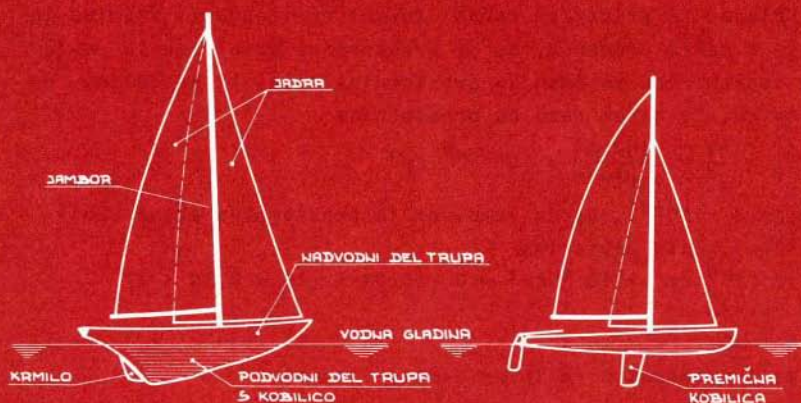
Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.

VETER, VODA, JADRANJE IN MALO FIZIKE

Kdo izmed nas še ni postal ob bregu jezera ali morja in se zazrl za jadrnico, ki se vozi sem in tja, zdaj skoraj proti vetru, pa spet z vetrom, ali še kako drugače. Kadar gladina ni zelo nemirna, se nam zdi, da se jadrnica giblje s tako lahkoto kot galebi nad njo. Morda smo se že kdaj vprašali, kako je sploh mogoče, da se jadrnica giblje skoraj v vseh smereh, veter pa piha ves čas v isti smeri? Kako to, da se kar precej nagne, prevrne pa se le redko, pa še to le tedaj, če je majhna? In kako to, da vozi domala proti vetru?

Skušajmo odgovoriti na ta vprašanja in poletiti, če bo nanesa prilika, se popeljimo z jadrnico in se spomnimo teh odgovorov.

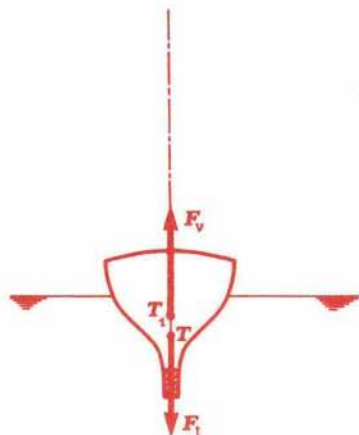
Najprej si na hitro oglejmo bistvene dele jadrnice. Pomagala nam bo slika 1. Težje jadrnice imajo podvodni del trupa podaljšan v *kobilico* (sl. 1a), manjše, lažje jadrnice pa imajo vgrajeno *premično kobilico*, t.j. posebno železno ploščo, ki jo lahko dvigamo ali spuščamo (sl. 1b). Na palubi in trupu je pritrjen *jambor*, ki nosi *jadra*. Največkrat imajo jadrnice eno ali dve jadra: večje - *glavno jadro* in manjše - *prečko*. Če omenimo še *krmilo*, smo tako spoznali vse bistvene dele jadrnice.



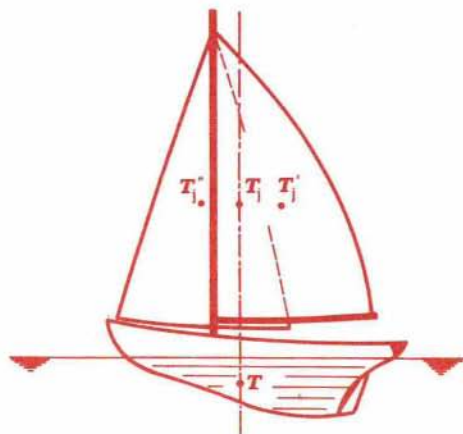
Sl. 1 Bistveni deli jadrnice: a) jadrnica s pritrjeno kobilico
b) jadrnica s pomično kobilico

Postavimo jadrnico v vodo in se pozanimajmo za njeno ravnovesje in stabilnost. Najprej pogledjmo mirujočo jadrnico z nerazpetimi jadri. Če naj jadrnica miruje, mora biti vsota vseh zunanjih sil in navorov enaka nič. Na sliki 2 sta označeni zunanji sili, ki delujeta na mirujočo jadrnico. To sta teža F_t s prijemališčem v težišču jadrnice T in vzgon F_v s prijemališčem v težišču izpodrinjene vode T_1 . Sili ležita na isti premici in sta nasprotno enaki. Tako je tudi njun skupni navor enak nič.

Razpnimo jadra in "uravnovesimo" jadrnico! Jadra naj bodo v takem položaju, da bosta med vožnjo prijemališči sile vetra T_j in težišče podvodnega dela trupa T na isti navpični ravnini, pravokotni na vzdolžno os (sl. 3). Če bi bilo prijemališče sile vetra T_j za težiščem podvodnega dela, bi jadrnica med vožnjo počasi zavijala v veter, če bi krmar spustil krmilo. Do tega pride zaradi navora tiste komponente sile vetra, ki je pravokotna na jadra.



Sl. 2 Prečni presek trupa mirujoče jadrnice in sile, ki delujejo na trup.



Sl. 3 Vzdolžni presek jadrnice in lega težišča jader ter težišča podvodnega dela trupa.

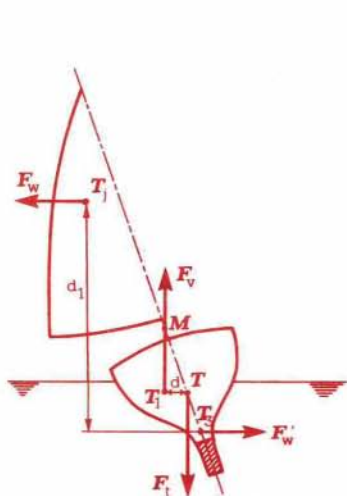
V primeru, da bi bilo prijemališče sile vetra T_j pred težiščem podvodnega dela, pa bi jadrnica zavijala v smer od vetra stran, če bi krmar spustil krmilo.

Poglejmo sedaj „uravnovešeno“ jadrnico med enakomerno vožnjo. Ponavadi je jadrnica nagnjena; zasukana je okrog vzdolžne osi, ki gre skozi težišče jadrnice. Sl. 4 kaže presek jadrnice z ravnino, ki je pravokotna na vzdolžno os skozi težišče. V tej ravnini naj bodo prijemališča vseh sil. Za prečno ravnovesje jadrnice so pomembne sile ali komponente sil, ki so v ravnini preseka. V ravnovesju sta komponenta sile vetra F_w s prijemališčem v T_j (ta komponenta povzroči tudi uhajanje iz smeri pri „neuravnovešeni“ jadrnici), in sila vode F'_w s prijemališčem v točki T_3 . Sila vode F'_w se pojavi med vožnjo pri nagnjeni jadrnici na podoben način kot prečna sila pri gibajočem se letalskem krilu.

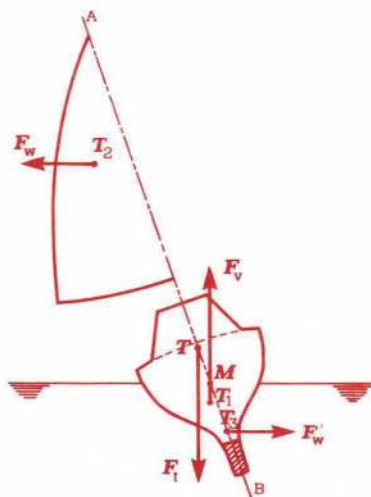
Iz slike 4 vidimo, da se pri nagnjeni jadrnici premakne težišče izpodrinjene vode. Navor dvojice sil F_v in F_t uravnoveša navor dvojice F_w in F'_w , zato velja:

$$F_w d_1 = F_t d$$

Ko se spreminja hitrost vetra, se spreminjata sili F_w in F'_w ter lega težišča izpodrinjene vode, pa tudi razdalji d in d_1 .



Sl. 4 Prečni presek jadrnice v vožnji in sile, ki leže v prečni ravnini. Težišče jadrnice je pod metacentrom.



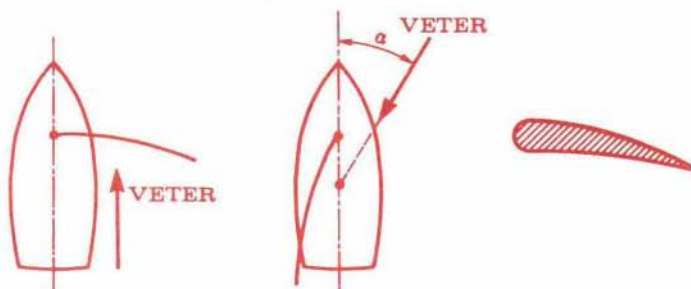
Sl. 5 Prečni presek jadrnice v vožnji in sile, ki leže v prečni ravnini. Težišče jadrnice je nad metacentrom.

Zato je nagib jadrnice različen pri različni hitrosti in smeri vetra. Vprašamo se: Ali se bo jadrnica z nagibanjem vselej ustavila v ravnovesni legi? Vzemimo primer, da je težišče jadrnice T v taki legi, da seka premica, na kateri leži sila vzgona, simetralo \overline{AB} pod težiščem (sl. 5). Presečišču M pravimo *metacenter*. Iz slike 5 vidimo, da tedaj obe dvojici sil sučeta jadrnico tako, da se veča njen nagib. Jadrnica se prevrne! Jadrnica je stabilna le takrat, kadar je metacenter nad težiščem jadrnice. Kadar je težišče pod metacentrom, je ravnovesje jadrnice labilno in jadrnica se lahko prevrne, kadar se dovolj nagne.

Doslej smo govorili le o jadrnici s pritrjeno kobilico. Do enakih zaključkov pridemo tudi pri jadrnici s premično kobilico, le da pri njej ne smemo pozabiti na posadko. Te jadrnice so namreč tako lahke, da ni vseeno, na katerem delu jadrnice se nahaja posadka.

Jadro na jadrnici je tisto, kar je motor za motorni čoln in vemo, da je za mnoge motor najzanimivejši del motornega čolna. Tale naš "motor" je na moč preprost in človek bi rekel, da o njem res ni vredno izgubljeni besed. Res je v nekaterih legah delovanje jadra samo po sebi razumljivo. Tako je, kadar piha veter v jadro od zadaj in potiska jadrnico pred seboj (sl. 6). Veliko zanimivejši je primer, ko se giblje jadrnica ostro proti vetru (sl. 7).

Zaradi boljšega pregleda obravnavajmo jadrnico, ki ima samo glavno jadro. Iz slike 9 vidimo, da spominja presek jadra z vo-



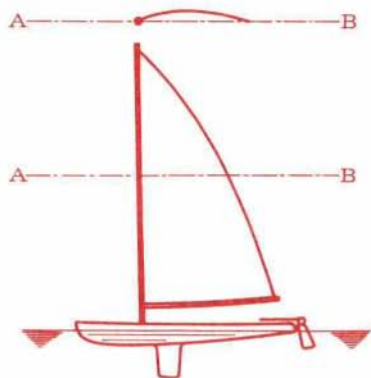
Sl. 6 Lega jadra pri jadrnici, ki vozi z vetrom v krmo.

Sl. 7 Lega jadra pri jadrnici, ki vozi ostro proti vetru.

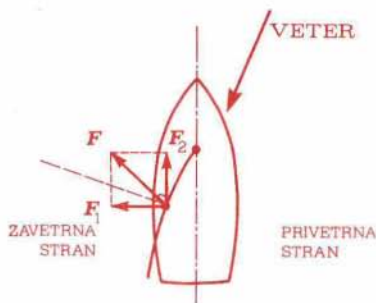
Sl. 8 Presek letalskega krila

doravno ravnino na presek letalskega krila (sl. 9). Gibanje zraka okoli krila je takšno, da je hitrost ob zgornji ploskvi krila večja kot ob spodnji ploskvi. Zato je tlak zraka ob spodnji ploskvi krila večji kot ob zgornji ploskvi. Hitrost in tlak vzdolž tokovnic v vodoravnem toku plina ali tekočine povezuje Bernoullijeva enačba:

$$p + (\rho v^2)/2 = \text{konst.}$$



Sl. 9 Presek jadra z vodoravno ravnino na mestu AB.



Sl. 10 Rezultirajoča sila F na jadro jadrnice, ki vozi ostro proti vetru. V sili F je upoštevana tako sila zaradi tlaka vetra na jadro v privetrni strani, kot tudi sila, ki se pojavi v zavetrni strani zaradi gibanja zraka okrog jadra. Narisani sta tudi komponenti sile F , ki prispevata k gibanju jadrnice naprej (F_2) in k bočnemu zanašanju jadrnice (F_1).

V enačbi je p tlak, v je hitrost zraka in ρ gostota zraka. Ob krilu se tok zraka razdeli. Če je ob zgornji ploskvi hitrost v_1 in tlak p_1 , ob spodnji ploskvi pa hitrost v_2 ter tlak p_2 , velja:

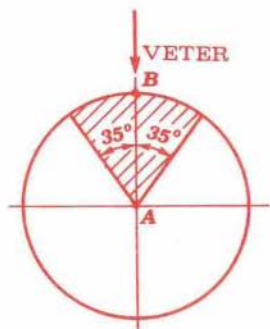
$$p_1 + (\rho v_1^2)/2 = p_2 + (\rho v_2^2)/2,$$

ker je $v_1 > v_2$, je $p_2 > p_1$. Razlika tlakov povzroča silo, ki ji v letalstvu pravijo dinamični vzgon, in uravnoveša težo letala med letom. Tudi ob zavetrni strani jadra pri jadrnici, ki vozi proti vetru, je hitrost zraka večja kot ob privetrni strani in zato je tudi tlak na obeh straneh različen.

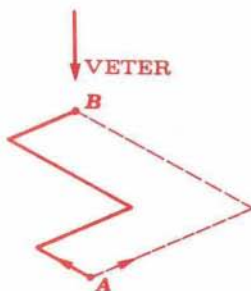
Slika 10 nam kaže silo vetra F na jadro jadrnice, ki vozi ostro v veter. Ni težko ugotoviti, da vleče jadrnico naprej sa-

mo komponenta F_2 , medtem ko povzroča komponenta F_1 bočno zanašanje jadrnice.

Jadrnica lahko vozi proti vetru, dokler je kot med smerjo vetra in vzdolžnico jadrnice (označen z α na sliki 7) večji od okoli 35° . Če je ta kot manjši, začne jadro trepetati in jadrnica kmalu obstane. Vzemimo, da smo z jadrnico v središču kroga na sliki 11. Tedaj lahko dosežemo točke v črtkanem območju le s križarjenjem, vse ostale točke pa so dosegljive z vožnjo naravnost. Križarjenje proti vetru je tisti način jadranja, ki je



Sl. 11 Lega točk na horizontu, ki jih dosežemo brez križarjenja in lega tistih, ki so dosegljive le s križarjenjem (črtkano področje).



Sl. 12 Dva izmed mnogih možnih načinov križarjenja.

gotovo najbolj zahteven. Tedaj pride do izraza vsa izkušnost in spretnost krmarja, saj ima na voljo poljubno število kombinacij za pot med izbranimi točkama (sl. 12). Na tekmovanju je treba izbrati tisto kombinacijo, ki pripelje jadrnico na cilj v najkrajšem času.

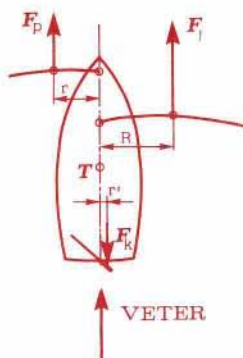
Pomudimo se še pri jadranju z vetrom v krmo. Poglejmo razmere pri jadrnici, ki ima glavno jadro in prečko (sl. 13). Sili vetra na jadro in na prečko sta F_j in F_p . Ti sili povzročata navore $M_j = F_j R$ in $M_p = F_p r$ okrog navpične osi skozi težišče jadrnice. Ker je navor sile F_j večji od navora sile F_p , bo jadrnica silila v veter, kot pravijo jadranci; na sliki 13 je to naznačeno s puščico ob premcu. Če hoče krmar obdržati jadrnico v smeri vetra, mora zasukati krmilo (sl. 13) tako, da bo navor

vode $M_k = F_k r'$, ki tišči na krmilo, uravnovesil razliko navorov:

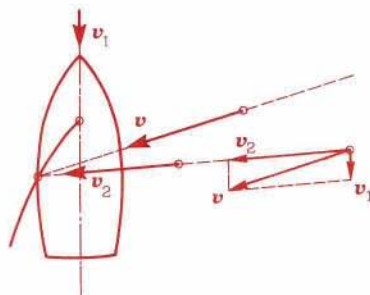
$$M_k = M_j - M_p,$$

zato je tudi vožnja počasnejša. Velikokrat zamenjajo prečko z večjim jadrom polkroglaste oblike, ki mu pravimo *spinaker*. Ker je spinaker veliko večji od prečke, je potisna sila vetra večja in s tem tudi hitrost jadrnice. Hkrati je navor sile vetra na spinaker dovolj velik, da uravnovesi M_j . Zato je lahko obremenitev krmila veliko manjša.

Ker leži pri jadranju z vetrom v krmo sila vetra v smeri



Sl. 13 Sile, ki delujejo na jadra in na krmilo pri vožnji z vetrom v krmo.



Sl. 14 Hitrost navideznega vetra je sestavljena iz hitrosti pravega vetra in nasprotne hitrosti jadrnice glede na obalo.

vožnje, ni bočnega zanašanja jadrnice. Zato lahko jadrnice, ki imajo premično kobilico, le-to dvignejo in tako zmanjšajo upor trupa v vodi. Jadrnica je sedaj manj stabilna za bočna gibanja in se mora posadka zato zelo skrbno premikati po jadrnici.

Kadar piha veter z boka nekako pod kotom 90° na vzdolžnico jadrnice, je jadranje najbolj prijetno, saj je tedaj le malo presenečenj, ki lahko dolete jadralce. Dolgočasno pa jadranje tudi pri tej smeri vetra ni. Pri lahki jadrnici kake novejšje konstrukcije s premično kobilico (n.pr. "leteči Holandec -

F. D.", "470" ali kaj podobnega) se trup jadrnice zaradi večje hitrosti precej dvigne iz vode in se zdi, kot da jadrnica drsi (planira) po vodni gladini. Drsenje je možno ne samo pri bočnem vetru, ampak pri vsakem vetru, ki piha iz krmnega kvadranta, če je le hitrost jadrnice dovolj velika in niso valovi previsoki.

Velikokrat mora biti krmar spreten, da pripravi jadrnico do drsenja in da jo zadrži v tem stanju čim dalj časa. Hitrost, ki jo doseže jadrnica med drsenjem, je znatno večja od hitrosti pri običajni vožnji. Zato je razumljivo, da velikokrat zmaga na tekmovanjih tisti krmar, ki izkoristi več priložnosti za drsenje.

Morda se je že kdo vprašal, v katerem sistemu obravnavamo hitrost in smer vetra. Smer in hitrost vetra sta različna za opazovalca na gibajoči se jadrnici in za onega na kopnem. Pri tistem, ki je na jadrnici, je treba upoštevati tudi veter, ki nastane zaradi gibanja jadrnice. Rezultirajočo hitrost in smer vetra dobimo, če vektorsko seštejemo hitrosti obeh vetrov (sl. 14). Tako dobljeni veter smo imeli ves čas v mislih. Včasih mu rečejo tudi "navidezni" veter. Iz slike 14 vidimo, da piha navidezni veter proti vzdolžnici jadrnice pod manjšim kotom kot pravi veter, kadar vozi jadrnica proti vetru. Hitrost navideznega vetra je lahko večja, pa tudi manjša od hitrosti pravega vetra. Dober krmar bo upošteval spremembe, ki nastanejo v navideznem vetru, ko se spreminja hitrost in smer gibanja jadrnice.

Končajmo tole kramljanje z željo, da bi nas čimveč lahko poleti preverilo na jadrnici nekatere od teh ugotovitev.

Zvonko Trontelj
