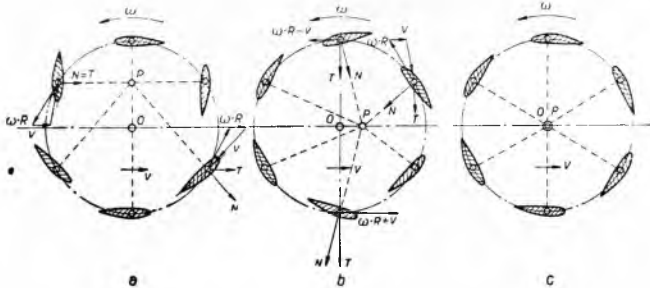
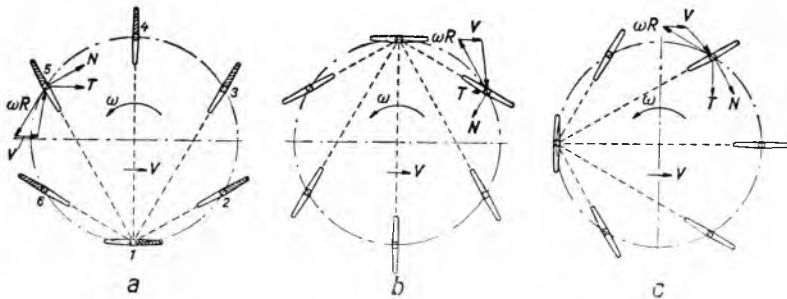


lopatica a time i smjer poriva. Ako je ekscentricitet jednak nuli, prestaje stvaranje poriva (sl. 33). Prednosti su Voith-Schneiderova propelera da on služi ujedno i kao kormilo i da se veličina i smjer poriva mogu mijenjati ne mijenjajući smjer vrtnje i broj okretaja pogonskog stroja. Nedostaci su ovog propelera: komplicirana konstrukcija, visoka nabavna cijena, velika težina i osjetljivost prema oštećenjima. Ipak, za neke tipove brodova i plovni objekata kojima je izvrsna manevarabilnost od primarne važnosti, Voith-Schneiderov propeler je pogodniji od drugih vrsta propelera. Također na vodi ograničene dubine Voith-Schneiderov propeler može imati bolji stepen djelovanja od brodskog vijka, kojemu je promjer ograničen. Danas se Voith-Schneiderov propeler upotrebljava za pogon nekih tipova trajekata, riječnih i jezerskih putničkih brodova, riječnih i lučkih tegljača, vatrogasnih tendera, plovni dizalica s vlastitim pogonom i na velikim morskim brodovima kao pramčani propeler za kormilarenje.



Sl. 33. Princip djelovanja Voith-Schneiderovog propelera. a vožnja pramcem, b zaokretanje broda, c nulti poriv



Sl. 34. Princip djelovanja Kirsten-Boeingovog propelera. a vožnja pramcem, b zaustavljanje i vožnja krmom, c zaokretanje broda

Kirsten-Boeingov propeler ima simetrične lopatice međusobno povezane sistemom poluga i zupčanika; za jedan puni okret horizontalnog kola na kome su smještene, svaka lopatica napravi pola okreta oko vlastite osi. Pomoću posebnog mehanizma može se mijenjati početni položaj lopatica i tako mijenjati i smjer poriva. Iz sl. 34 vidi se način djelovanja ovog propulzora i kako se promjenom početnog položaja lopatica mijenja smjer poriva. Do sada se Kirsten-Boeingov propeler vrlo malo upotrebljavao.

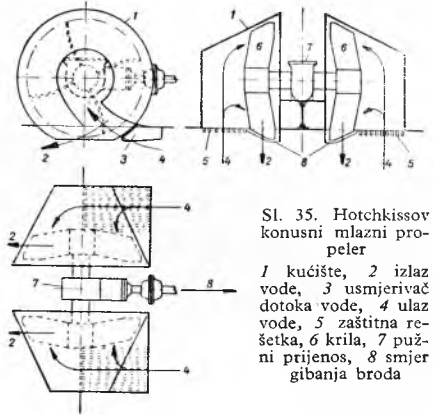
Mlazni propulzori su posebni tipovi impelernih pumpi ugrađenih unutar trupa broda, koje dajući impuls mlazu vode proizvode poriv. Ulazni otvor dovodne cijevi vode je na pramcu ili ispod pumpe, a izlazni otvor vodenog mlaza na krmenom dijelu broda. Otvori cijevi za dovod vode pumpe zaštićeni su rešetkama, a otvori za izlaz vodenog mlaza obično su izvedeni tako da se može mlaz usmjeriti na bilo koju stranu i na taj način upravljati brodom. Poriv nastaje time što pumpa vodu koja pritječe od pramca ubrzava i povećanom brzinom izbacuje van broda. Stepenn djelovanja ovakvog propelera je nizak, jer sama pumpa ima nizak stepen djelovanja, zatim pumpa iskorištava samo mali dio kinetičke energije sadržane u vodi koja pritječe, a gubici trenja u dovodnim i odvodnim cijevima propulzijskog sistema također su dosta veliki.

Hotchkissov konus je poseban tip mlaznog propulzora (sl. 35). Sastoji se od dva šuplja konusa čija os leži poprečno na uzdužnu os broda, a uža krajevi su okrenuti prema bokovima broda. Na drugoj strani užeg kraja konusa nalazi se ulazni otvor vode

a u širem kraju je smješten krilni impeler i izlazni otvor vodenog mlaza. Nakon ulaza u konus voda se uslijed djelovanja impelera, centrifugalne sile i nagiba zidova konusa kreće unutar konusa po spirali izlazeći u mlazu na širem kraju konusa. Pri tome je kutna brzina vode koja rotira konstantna, a obodna brzina raste jer se promjer konusa od ulaza prema izlazu vode povećava. Zato je brzina vode na izlazu veća nego na ulazu, pa kao reakcija izlaznog mlaza vode nastaje poriv. Krilni impeler ne ubrzava vodu već samo održava njeno rotacijsko gibanje, a ubrzanje nastaje uslijed oblika konusa. Hotchkissov konusni propulzor iskorištava svu kinetičku energiju sadržanu u ulaznoj struji vode pa zato ima bolji stepen djelovanja od mlaznog propulzora s centrifugalnom pumpom.

U usporedbi s brodskim vijkom mlazni propulzor ima znatno lošiji stepen djelovanja, kompliciraniju konstrukciju, znatno veću težinu, zauzima koristan prostor u trupu broda i skuplji je. Prednost mlaznih propulzora je što nemaju nikakvih pokretnih dijelova van trupa broda, pa su potpuno zaštićeni od vanjskih udara i oštećenja. Zato, kad se radi o pogonu čamaca i manjih brodova koji plove po vrlo plitkim vodama, kroz razlomljeni led ili po vodama sa plovećim drvljem, mlazni propulzor usprkos svim svojim nedostacima može biti povoljniji od ostalih tipova propulzora.

U najnovije vrijeme mlazni propulzori su dobili jednu sasvim novu namjenu: da služe ne za pogon već za manevaranje



Sl. 35. Hotchkissov konusni mlazni propeler
1 kućište, 2 izlaz vode, 3 usmjerivač dotoka vode, 4 ulaz vode, 5 zaštitna rešetka, 6 krila, 7 pužni prijenos, 8 smjer gibanja broda

brodom. Na velikim preoceanskim brodovima ugrađuju se mlazni propulzori u pramcu a eventualno i u bokovima na krmenom dijelu broda (*mlazna kormila*). Takvo dodatno mlazno kormilo vanredno povećava manevarske sposobnosti broda.

S. Šilović A. Sentić

KORMILARENJE

Kormilarenje je upravljanje brodom pomoću kormila. Obuhvaća kontrolu gibanja površinskih brodova u horizontalnoj ravnini a podmornica u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini. Kormilarenje se može promatrati sa stanovišta sposobnosti broda da naglo mijenja svoj kurs kad su takve promjene kursa poželjne, i sa stanovišta sposobnosti broda da drži svoj kurs kada se ne želi



Sl. 1. Prikaz broda s bočnim kormilom (pečat grada Dunwicha, XIII st.)



Sl. 2. Prikaz broda s kormilom iza krme (pečat grada Ipswicha, XIII st.)

promjena kursa. Dok je u prošlosti bila posvećena veća pažnja prvom stanovištu, danas se objema stanovištima pridaje podjednaka važnost. Za neke vrste brodova, kao što su tegljači, obalni brodovi, trajekti, a isto tako za sve tipove ratnih brodova, od primarnog je značenja pokretljivost, tj. sposobnost naglog mijenjanja kursa. Od prekooceanskih trgovačkih brodova se prvenstveno traži da dobro drže svoj kurs.

Vrlo dugo vrijeme za kormilarenje brodom služila su vesla. Obično je na svakom boku krme broda bilo vezano po jedno veslo i smjer plovidbe broda se je mijenjao zakretanjem tih vesala. Tek početkom XIII st. javlja se plosno drveno kormilo smješteno iza krmene statve. Djelovanje takvog kormila bilo je znatno bolje nego djelovanje vesala, a kormilarenje jednostavnije i lakše, pa su vesla za kormilarenje ubrzo iščezla. Sve do XIX st. usko i visoko plosno kormilo bilo je jedini tip kormila. Prijelazom sa drvene na čeličnu brodsku konstrukciju i uvođenjem parnog pogona na brodove i kormilo se usavršava, nastaju novi efikasniji tipovi kormila i razvijaju se složeni strojevi i uređaji za zakretanje kormila i upravljanje kormilom. U današnje vrijeme zahtijeva se sve bolja upravljivost brodom, pa su osim kormila razvijeni i usavršeni drugi specijalni uređaji za upravljanje brodom.

Kormila

Kormilo je danas daleko najrašireniji uređaj za upravljanje brodom. Ono je redovno smješteno po krmi broda, ali ima specijalnih tipova brodova (trajekti, neki ribarski brodovi, itd.) koji osim kormila na krmi imaju i kormilo na pramcu. Većina brodova ima jedno do tri kormila. Na jednovijčanom brodu kormilo se stavlja iza vijka da bi se iskoristio povoljan utjecaj vijčanog mlaza na djelovanje kormila. Dvovijčani brodovi obično imaju jedno ili dva kormila, što zavisi od tipa broda. Ako dvovijčani brod ima samo jedno kormilo, ono je smješteno u uzdužnoj simetralnoj ravnini broda, pa se povoljan utjecaj vijčanog mlaza očituje samo kad su kutovi otklona kormila veliki. Kada se od dvovijčanog broda traži veća okretljivost, na njega se ugrađuju dva kormila, iza svakog vijka po jedno. Po tri kormila imaju obično trovijčani brzi brodovi.

Prema tome kako su pričvršćena za trup broda, razlikuju se obična i viseća kormila. Obična kormila su vezana s trupom broda preko jednog ili više ležaja na krmenoj statvi i preko osovine kormila. Osovina takvog kormila je uglavnom napregnuta momentima torzije. Viseća kormila vise van trupa broda, a vezana su za trup isključivo preko svoje osovine, te je ova napregnuta momentima torzije i momentima savijanja.

Prema odnosu dijelova površina kormila koji se nalaze ispred i iza osovine razlikuju se nebalansna, polubalansna i balansna kormila. *Nebalansno kormilo* ima cijelu površinu iza osovine kormila, *polubalansno kormilo* ima 10-15% površine ispred osovine, a *balansno kormilo* 20-25% površine.

Prema obliku poprečnog presjeka razlikuju se *plosnata kormila* i *strujna kormila*. Strujna kormila su obično simetričnog presjeka, osim kormila Star Contra.

Na temelju ispitivanja kormila sa jednakim površinama i jednakim omjerima h^2/A_R , gdje je h visina kormila, A_R površina kormila, došlo se do zaključka da oblik središnje ravnine kormila nema gotovo nikakav utjecaj na kormilarenje. Stoga je oblik kormila vrlo jednostavan, najčešće pravokutan ili trappezoidan. Kormila se dimenzioniraju u skladu sa propisima klasifikacionih društava.

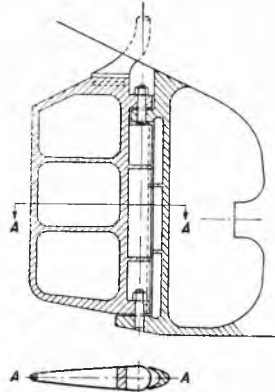
Obično nebalansno plosnato kormilo (sl. 3) nekada se je mnogo primjenjivalo na brodovima, ali su ga danas zamijenila strujna kormila, pa obično plosno kormilo imaju jedino još brodovi bez vlastitog pogona.

Plosnato kormilo ima mnogo veći otpor od strujnog kormila, i to naročito u slučaju kad je smješteno iza krmene statve pravokutnog presjeka i ako između kormila i statve postoji znatniji raspor. Ispitivanja na tankerima američke mornarice pokazala su da se potrebna

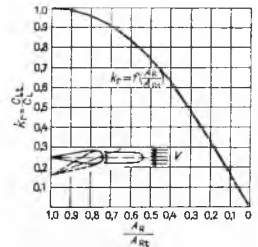
snaga za držanje iste brzine smanjila za 15% kad su plosnata kormila bila zamijenjena strujnim.

Osovina običnog nebalansnog plosnatog kormila vezana je sa strukom kormila pomoću horizontalne spojke. Sa strukom su često vezana rebra na koja se pričvrsti ploča kormila. Na struku kormila, ispred svakog rebra, i na krmenoj statvi nalaze se samice. Samicu na struku kormila i odgovarajuću samicu na statvi povezuje štenac koji kroz njih prolazi. Samica na struku je konična, te u nju ulazi konični dio štenca koji se zategne maticom, tako da je štenac u odnosu na kormilo nepomičan. Samica na statvi služi kao ležaj, pa je dio štenca koji se nalazi u njoj cilindričan. Težinu kormila nosi donji štenac, koji ima oslonac u aksijalnom ležaju u peti krmene statve. Gornji štenac ima ispod samice na statvi glavu koja sprečava da kormilo ispadne iz samice.

Obično nebalansno strujno kormilo (sl. 4) imaju najčešće jednovijčani brodovi. Kormilo je smješteno iza nepomične krmene statve strujnog presjeka koji kontinuirano prelazi u strujni presjek kormila, tako da cijeli sistem slični jednom profilu, pa se može tretirati kao krilo sa zakrilcem.



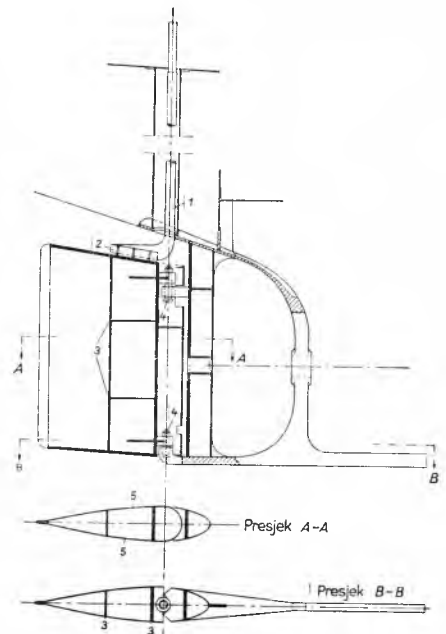
Sl. 4. Obično nebalansno strujno kormilo



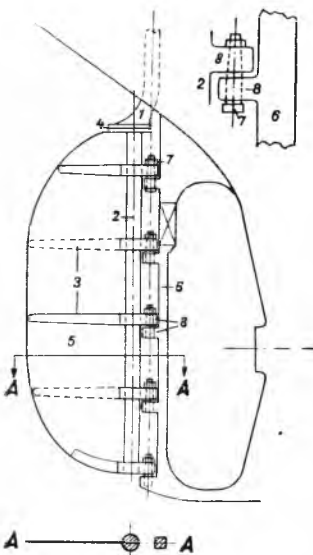
Sl. 5. Koeficijent redukcije koeficijenta uzgona kormila zbog utjecaja statve

Uslijed prisustva nepomične statve efektivni napadni kut je manji od geometrijskog kuta zakretanja kormila, zbog čega dolazi do smanjenja koeficijenta sile uzgona. Na sl. 5 prikazana je ovisnost koeficijenta redukcije [omjera koeficijenta sile uzgona kormila sa statvom (C_{Ls}) i koeficijenta sile uzgona samog kormila (C_L)] o omjeru površine samog kormila (A_R) i površine kormila i statve (A_{Rt}), što se u slučaju jednake visine kormila i statve svodi na omjer dužine kormila samog i dužine kormila i statve. Iz dijagrama se vidi da prisustvo statve čija dužina iznosi 20-25% ukupne dužine kormila i statve nema gotovo nikakvog utjecaja na smanjenje koeficijenta sile uzgona, ali ako je statva veće dužine, dolazi do većeg pada koeficijenta sile uzgona.

Kada se pri okretanju broda javlja i neki kut zanošenja, obično se dešava da je sila uzgona statve suprotnog smjera od sile uzgona na samom kormilu, tako da dugačka statva pogoršava okretljivost broda. S druge pak strane dugačka statva poboljšava stabilnost kursa, jer djeluje poput stabilizatora. Da bi se postigao što veći



Sl. 6. Obično nebalansno kormilo tipa Oertz. 1 osovina, 2 spojka, 3 unutrašnji kostur, 4 štenac, 5 opločenje kormila



Sl. 3. Obično nebalansno plosnato kormilo. 1 osovina, 2 struk, 3 rebro, 4 horizontalna spojka, 5 list kormila, 6 statva kormila, 7 štenac, 8 samica

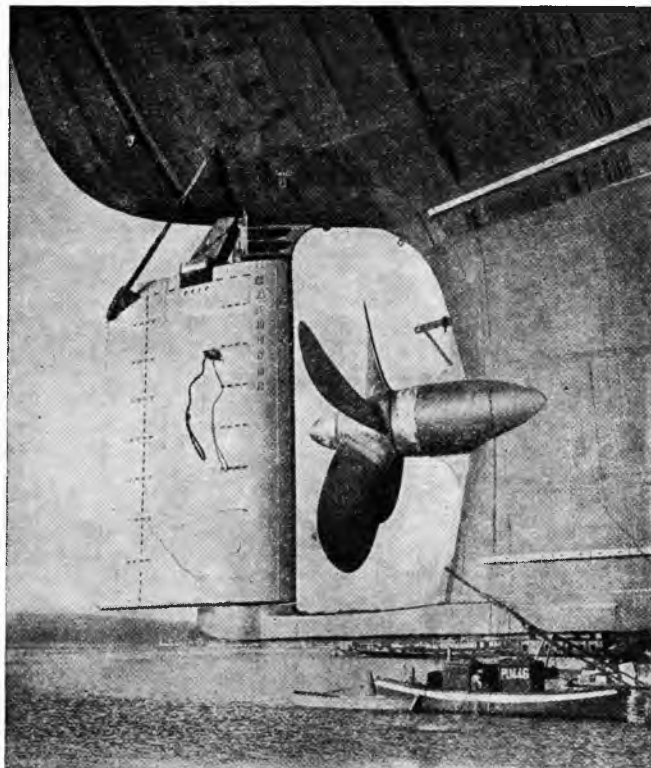
zakretni moment broda, treba da je raspor između statve i kormila što manji.

Obično nebalansno strujno kormilo tipa Oertz je specijalan tip običnog nebalansnog strujnog kormila smještenog iza relativno debele krmene statve strujnog presjeka (sl. 6). Debeli statva omogućava kontinuirani prijelaz strujanja vode sa statve na kormilo i pri velikim kutovima zakreta kormila, pa ne dolazi do odvajanja strujnica ni kad su kutovi zakreta kormila veći od 35° . Osim toga, takvo kormilo ima relativno velik koeficijent uzgona i malen koeficijent momenta kormila.

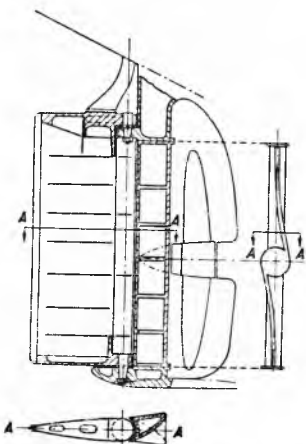
Obično nebalansno strujno kormilo tipa Star Contra.

Voda iza vijka giba se spiralno, i to najintenzivnije u blizini osi vijka. Da bi kormilo bilo što povoljnije u pogledu propulzije, tj. da bi imalo što manji otpor, potrebno je da pritjecanje vode od vijka prema kormilu bude uz što manji gubitak energije. Ako ulazni brid i poprečni presjek kormila nisu prilagođeni strujnicama vijčanog mlaza, dolazi do gubitka energije zbog udarnog djelovanja mlaza. Osim toga u tekućini koja struji duž kormila stvaraju se vrtlozi, što ima za posljedicu daljnji gubitak energije i pogoršanje kormilarskih svojstava broda. Da bi se oblik kormila odnosno statve prilagodio spiralnom strujanju mlaza, potrebno je da kormilo ima promjenljiv poprečni presjek duž cijele visine vijka. Na taj se način došlo do kormila i do statve koji imaju nesimetričan i promjenljiv poprečni presjek duž cijelog područja vijka, a izvan tog područja poprečni presjek prelazi u simetričan profil. Takvo kormilo i statva su poznati pod imenom Star Contra.

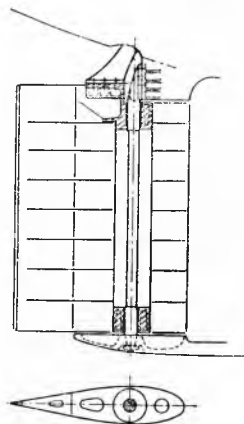
U osnovi postoje dvije izvedbe kormila Star Contra. Prva izvedba je obično strujno nebalansno kormilo konstantnog presjeka koje je smješteno iza statve promjenljivog presjeka prilagođenog



Sl. 9. Smještaj običnog balansnog strujnog kormila na krmi velikog teretnog broda



Sl. 7. Kormilo Star Contra iza kontra-statve



Sl. 8. Obično balansno strujno kormilo tipa Simplex

spiralnom strujanju vijčanog mlaza. Ulazni bridovi statve postepeno se otklanjaju od uzdužne simetralne ravnine i dostižu najveće odklone u području osi vijka (sl. 7). Druga izvedba je obično strujno balansno kormilo čiji je presjek promjenljiv i prilagođen mlazu, a ispred kormila nema statve.

Ispitivanja modela običnih plosnatih kormila, strujnih kormila i kormila Star Contra pokazala su da se primjenom strujnog umjesto plosnatog kormila pri brzini od 15 čvorova postigla ušteda na snazi od $\sim 7,5\%$, a primjenom kormila Star Contra umjesto plosnatog kormila ušteda od $\sim 16\%$.

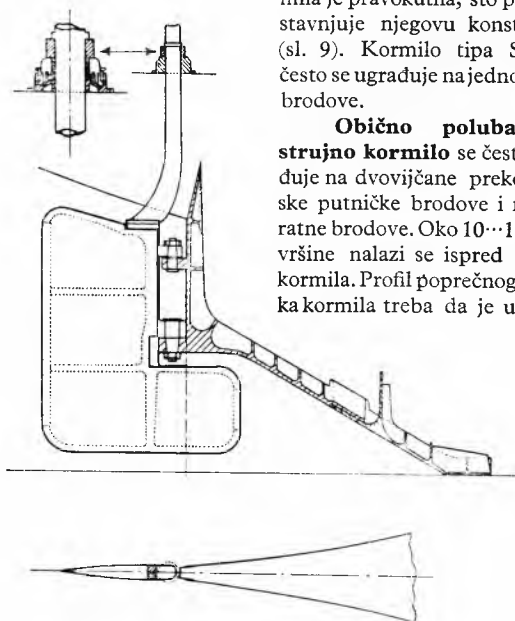
Prednosti kormila Star Contra pri nultom kutu zakreta su nesumnjive. Međutim, ako je kormilo Star Contra izvedeno kao balansno kormilo, njegove prednosti nestaju kad su kutovi zakreta veći. Brodovima čija služba zahtijeva da tokom vožnje često zakreću kormilo za veće kutove ne odgovara kormilo Star Contra. Na brodovima kojim kormilo uglavnom služi za održavanje kursa, tj. kad su kutovi zakretanja kormila mali (npr. preokooceanskim brodovima), primjena kormila Star Contra ima izvjesne prednosti.

Obično balansno strujno kormilo tipa Simplex (sl. 8). Za zakretanje nebalansnih kormila potrebni su veliki momenti, a to znači da kormilarski strojevi moraju imati veliku snagu. Da bi se smanjio moment potreban za zakretanje kormila, projektirana

su balansna i polubalansna kormila, koja imaju izvjestan dio površine ispred osi zakretanja kormila. Moment potreban za zakretanje kormila jednak je produktu normalne sile kormila i udaljenosti između hvatišta te sile i osi zakretanja kormila. Kad bi se hvatište sile kormila podudaralo sa osi zakretanja, kormilo bi bilo potpuno izbalansirano, tj. za zakretanje bio bi dovoljan samo moment potreban da se savlada trenje u ležajima i kormilarskom stroju. U praksi nije moguće postići potpunu izbalansiranost za sve kutove otklona kormila jer se hvatište sile kormila mijenja sa kutom zakreta. Položaj hvatišta sile kormila se relativno manje mijenja kad su profili deblji, pa su oni povoljniji za balansna kormila. Kormila se obično projektiraju tako da budu izbalansirana za kut zakreta od 15° , što se postiže ako se $20\cdots 25\%$ površine ispred osovine kormila.

Kontura plohe ovog tipa kormila je pravokutna, što pojednostavljuje njegovu konstrukciju (sl. 9). Kormilo tipa Simplex često se ugrađuje na jednovijčane brodove.

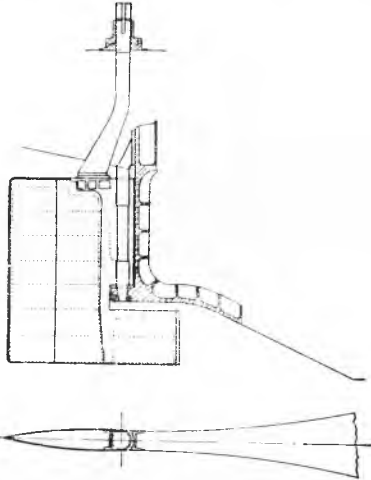
Obično polubalansno strujno kormilo se često ugrađuje na dvovijčane preokooceanske putničke brodove i na neke ratne brodove. Oko $10\cdots 15\%$ površine nalazi se ispred osovine kormila. Profil poprečnog presjeka kormila treba da je u skladu



Sl. 10. Obično polubalansno strujno kormilo

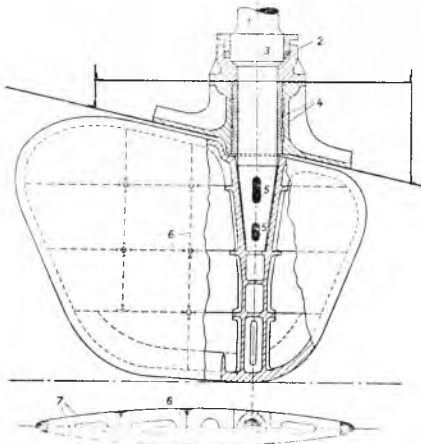
sa vodnim linijama krme, tako da kormilo predstavlja njihov završetak. Sam oblik plohe kormila nema znatnijeg utjecaja na djelovanje kormila, ali raspori između kormila i krme odn. statve treba da budu minimalni, jer se time povećava zakretni moment broda.

Na polubalansnom kormilu uobičajene konstrukcije (sl. 10) često dolazi do pretjeranog trošenja štenaca. Da bi se izbjegao ovaj nedostatak, načinjena je konstrukcija s nepomičnim strukom, slična konstrukciji Simplex-kormila (sl. 11). Zbog povećanih ležaja deblji je i profil kormila, statva je šira, a proširen je i krmeni dio trupa,

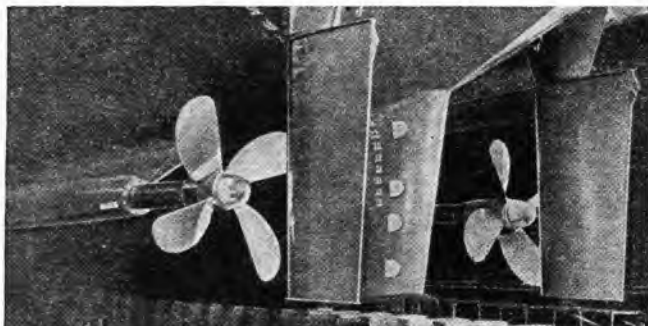


Sl. 11. Polubalansno strujno kormilo s nepomičnim strukom

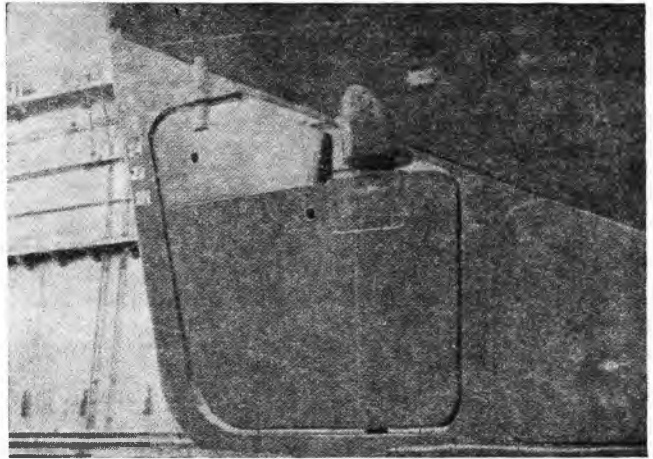
što smanjuje vibracije krme. Oblik horizontalnog presjeka kormila uklapa se inače u vodne linije krme, a raspori između kormila i statve sveden je na minimum. Blazinice u ležajima, a i prsteni koji preuzimaju vertikalno opterećenje, jesu od nerđajućeg čelika.



Sl. 12. Viseće balansno strujno kormilo.
1 osovina, 2 brtvilo, 3 ležaj oslona, 4 ležaj, 5 klinovi, 6 pojačanja, 7 opločenje



Sl. 13. Smještaj visećeg balansnog strujnog kormila na dvovijčanom brodu



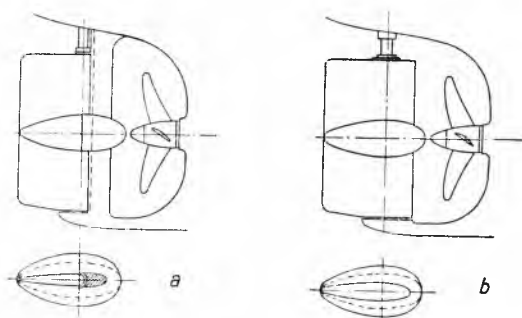
Sl. 14. Pramčano kormilo

Viseće balansno strujno kormilo mogu imati jedno- dvo- i trovijčani brodovi (sl. 12). Osovina visećeg kormila je napregnuta momentima torzije i savijanja pa mora biti vrlo debela. Da bi se što više podiglo hvatište sile kormila i smanjio moment savijanja, viseća kormila imaju trapezoidan oblik. Na viševijčanim brodovima kormila su redovno smještena iza vijka, da bi se iskoristio povoljan utjecaj vijčanog mlaza (sl. 13). Po tri viseća kormila imaju obično brzi trovijčani brodovi.

Kormilo na pramcu često imaju trajekti za automobile ili vlakove, neki tipovi ribarskih brodova i bagera, brodovi za polaganje plutača, brodovi za polaganje kabela itd., dakle specijalni brodovi čija služba zahtijeva da često plove krmom i da pri tome precizno kormilare. Pri vožnji krmom ni krmeno kormilo ni manevriranje vijcima (ako je brod dvovijčan) ne pruža dovoljnu garanciju za sigurnu vožnju, te je dobro ugraditi i kormilo na pramcu broda. Pramčano kormilo se potpuno uklapa u oblik pramca, a redovno je balansno sa strujnim poprečnim presjecima (sl. 14). Pramčano kormilo mora imati sigurnosni zaporni uređaj koji ga drži u nultom položaju kad brod vozi pramcem, jer ako bi se pramčano kormilo zakrenulo za vrijeme vožnje pramcem, nastali bi preveliki momenti i kormilo bi se oštetilo.

Kormilo sa Costa-bulbom. Brodogradbeni inženjer dr Leo Costa patentirao je nekoliko kormila sa kruškolikim odebljanjem (bulbom). Takva kormila su pokazala povoljan utjecaj na propulziju i kormilarenje.

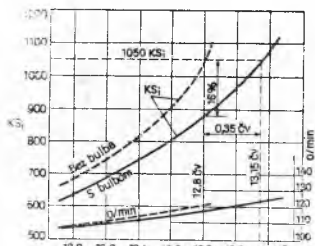
U osnovi postoje dva tipa kormila sa Costa-bulbom. Na kormilu smještenom iza statve kormila (običnom nebalansnom strujnom kormilu, Oertzovu kormilu) bulb je dvodijelan, pa se srednji nepomični dio bulba nalazi na statvi, a stražnji dio bulba se zakreće zajedno s kormilom (sl. 15 a), a na običnom balansnom strujnom kormilu cijeli bulb se zakreće zajedno s kormilom (sl. 15 b). U oba se slučaja os bulba podudara s produžetkom osi vijka, a bulb je smješten što je moguće bliže glavini vijka. U konstruktivnom pogledu to kormilo ima prednost da je ugrađivanje Costa-bulba vrlo jednostavno i jeftino. Kormila sa Costa-bulbom su prvenstveno namijenjena jednovijčanim brodovima, no mogu se upotrijebiti i na dvovijčanim brodovima ako se iza svakog vijka nalazi kormilo.



Sl. 15. Kormilo sa Costa-bulbom

Korisno djelovanje bulba zasniva se na činjenici da bulb ispujava šupljinu iza glavine vijka i time smanjuje vrtložno strujanje u tom prostoru. Ovo ujednačenje strujanja vode daje višestruku korist: povećava stupanj djelovanja vijka, smanjuje vibracije osovine vijka i krmenog dijela broda i poboljšava upravljivost broda.

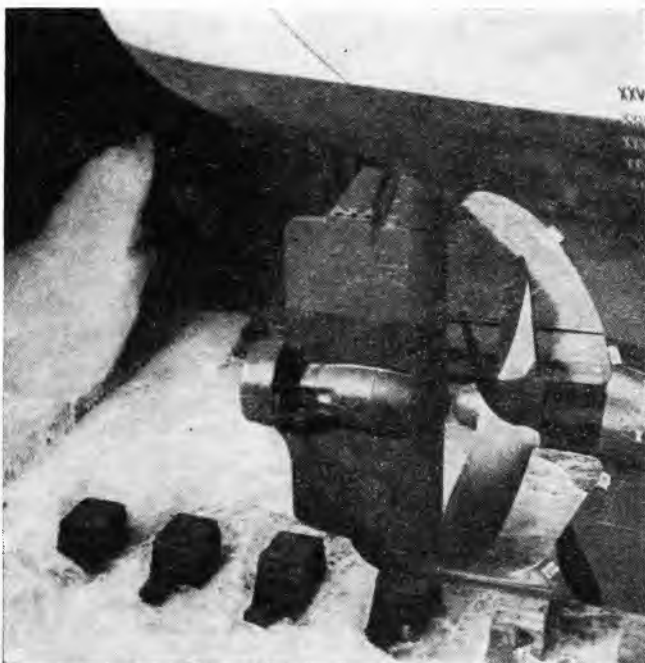
Rezultati pokusnih vožnji sa dva jednaka ribarska broda od kojih je jedan bio opremljen kormilom sa Costa-bulbom a drugi kormilom bez bulba pokazuju da je uz nominalnu snagu od 1050 KS brod sa Costa-bulbom postigao brzinu veću za $\sim 0,35$ čvora,



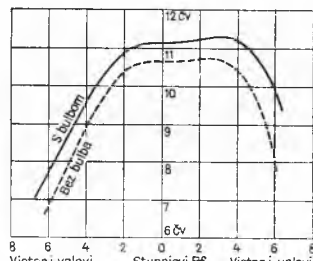
Sl. 16. Povećanje brzine ribarskog broda primjenom kormila s Costa-bulbom

odnosno, da je za brzinu koju postiže brod s običnim kormilom brod sa Costa-bulbom trebao za $\sim 16\%$ manju snagu (sl. 16). Do povećanja ukupnog stepena djelovanja propulzije ne dolazi samo u uvjetima mirnog mora već i pri plovidbi na valovima. Ispitivanja jednog teretnog broda od 13 000 t istisnine, izvršena najprije s običnim kormilom a zatim s istim kormilom pošto je na nj bio ugrađen Costa-bulb, pokazala su da je dobitak na brzini na uzburkanom moru još veći nego u uvjetima potpuno mirnog mora (sl. 17). Ipak, smatra se da prednosti kormila sa Costa-bulbom dolaze do izražaja samo na brodovima manjih brzina.

U pogledu oblika okomitog poprečnog presjeka bulba bilo je nekoliko varijanti. Isprva su ti presjeci bili kružnog oblika, pa budući da je velik dio bulba otpadao na debljinu kormila, samo su mali segmenti stršili van kormila, te nisu mogli u znatnijoj mjeri smanjiti vrtložno strujanje iza glavine vijka. Stoga je pronalazač kasnije predložio da se presjecima dade oblik elipse sa horizontalnom velikom osi i vertikalnom malom osi. Oblik i odnosi dimenzija bulba moraju biti prilagođeni rasporedu strujanja.



Sl. 18. Aktivno kormilo



Sl. 17. Utjecaj kormila s Costa-bulbom na poboljšanje stepena propulzije teretnog broda od 13 000 t istisnine u različitim vremenskim uvjetima

Aktivno kormilo je obično balansno strujno kormilo na kojem je ugrađen manji vijak (sl. 18). Za pogon tog vijka služi elektromotor posebne izvedbe, prilagođen radu pod vodom (motor se hladi i podmazuje vodom). Elektromotor je smješten u kruškolikom odebllanju kormila koje se nalazi neposredno iza glavine glavnog pogonskog vijka broda. Debljina kruškolikog tijela iznosi i do 45% njegove dužine.

Korist od aktivnog kormila je višestruka. Kad rade oba vijka (glavni pogonski vijak broda i vijak aktivnog kormila), uz poprečnu komponentu sile kormila javlja se i projekcija poriva vijka aktivnog kormila u poprečnom smjeru, čime je povećano djelovanje kormila. Smjer okretanja vijka aktivnog kormila je suprotan smjeru okretanja glavnog pogonskog vijka; tako se postiže efekt kontrarotirajućih vijaka, što se povoljno odražava na propulziju broda. Već i samo kruškoliko odebllanje na kormilu (u kojem je smješten elektromotor) ima povoljan utjecaj na stepen djelovanja glavnog pogonskog vijka, jednako kao na kormilu s Costa-bulbom. Kad glavni pogonski stroj miruje, vijak aktivnog kormila omogućava gibanje broda malom brzinom (3-4 čvora) i manevriranje brodom. Veliki brodovi koji imaju aktivno kormilo mogu njime manevrirati u luci i bez pomoći tegljača, čak se mogu okretati gotovo na mjestu.

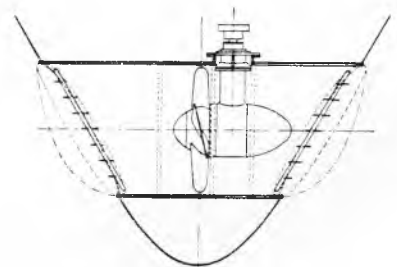
Kad brod manevrira na mjestu ili kad se kreće malom brzinom (3-4 čvora), aktivno se kormilo može zakretati za 90° udesno ili ulijevo. Snaga kormilarskog stroja mora biti dovoljna da se zakretanje kormila iz jednog krajnjeg položaja u drugi, tj. za 180°, izvrši u roku od 20-30 sekundi. Pri plovidbi normalnom brzinom kut zakretanja kormila je ograničen na 35°.

Promjer vijka aktivnog kormila obično iznosi 20-25% promjera glavnog pogonskog vijka, a elektromotor koji pokreće vijak aktivnog kormila obično ima snagu koja je jednaka 8-10% snage glavnog pogonskog stroja.

Elektromotor i vijak aktivnog kormila dimenzionirani su tako da samo aktivno kormilo pokreće brod brzinom 3-4 čvora. Radi povećanja poriva pri tim niskim brzinama, vijak se stavlja u kratku sapnicu čija dužina obično iznosi $\sim 45\%$ njenog promjera.

Uređaji za upravljanje brodom bez kormila

Pramčani mlazni uređaj upravlja brodom pomoću sile reakcije vodenog mlaza. Ta sila djeluje na pramcu okomito na središnju uzdužnu ravninu broda, stvarajući moment zakretanja broda.

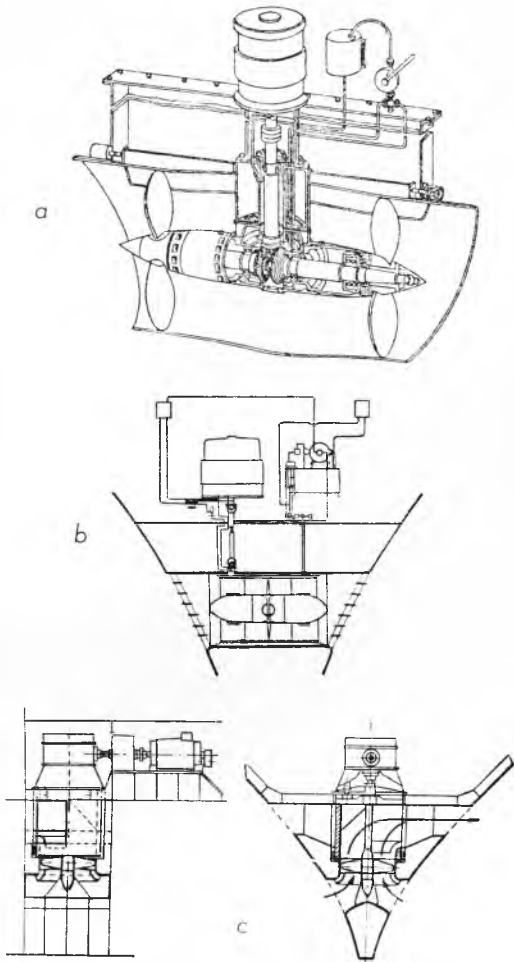


Sl. 19. Pramčano mlazno kormilo tipa Pleuger

Uređaj se sastoji od vijka smještenog u poprečnom tunelu na pramcu broda. Uređaj je određen za upravljanje brodom pri malim brzinama (1-2 čvora) i njegova se djelotvornost osjetno smanjuje pri većim brzinama plovidbe. U novije vrijeme pramčani mlazni uređaj se sve više upotrebljava na trajektima za prijevoz automobila i vlakova, kao i na ostalim brodovima koji često manevriraju pri malim brzinama.

Tunel na pramcu povećava otpor broda, ali uz dobro oblikovane otvore tunela porast otpora ne prelazi 2%. Pritjecanje vode vijku u poprečnom tunelu obično je vrlo neravnomjerno, ali se može djelomično poboljšati ako se na otvore tunela stave rešetke (sl. 19). Zbog specifičnih uvjeta rada vijak gotovo redovito kavitira. Pojava kavitacije može se spriječiti ili bar smanjiti pravilnim izborom promjera i uspona vijka, presjeka krila i rasporeda njihove površine. Posebnu pažnju treba posvetiti zvučnoj izolaciji tunela, da se intenzivni šum i buka izazvani radom vijka ne prenose na ostale dijelove broda.

Snaga elektromotora pramčanog mlaznog uređaja obično je 300...800 KS. Kao vrlo grubo pravilo može se uzeti da svakih 100 KS snage elektromotora daje ~ 1 Mp poprečne sile na pramac.

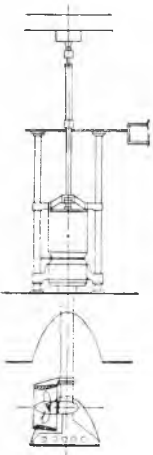


Sl. 20. Tipovi pramčanih mlaznih kormila. a sistem Jastram, b sistem KaMeWa, c sistem Gutsche

Postoji niz različitih sistema pramčanih mlaznih uređaja. Sistem Pleuger (sl. 19) ima vijak sa fiksnim krilima pokretan pomoću elektromotora koji je, kao i vijak, smješten u tunelu. Sistem Jastram ima dva kontrarotirajuća vijaka sa fiksnim krilima, koji su pokretani preko stožastog prijenosa tako da je pogonski elektromotor izvan vode (sl. 20 a). Pomoću spomenutih sistema promjena se smjera poprečne sile postiže promjenom smjera vrtnje vijaka. Sistem KaMeWa ima vijak sa prekretnim krilima, koja se zakreću pomoću hidrauličkog uređaja (sl. 20 b). Gutscheov sistem je s vijkom na vertikalnoj osovini koja rotira uvijek u istom smjeru, a smjer poprečne sile se mijenja pomoću cilindričnog zasuna koji usmjeruje istjecanje mlaza na lijevi ili na desni bok pramca (sl. 20 c).

Pramčani propeler. Radi bolje okretljivosti pojedini brodovi imaju umjesto mlaznog uređaja ugrađen na pramac Voith-Schneiderov propeler ili obični brodski vijak. Takvi uređaji stvaraju poprečnu silu na pramacu povodom propelera.

Pramčani Voith-Schneiderov propeler smješten je u komori u donjem dijelu pramčane konstrukcije. Na bokovima komore su klizni poklopci koji se otvaraju samo kad propeler radi, a za vrijeme normalne plovidbe su zatvoreni. Poprečna sila na pramac nastaje radom propelera, a njen smjer i veličina mogu se mijenjati promjenom ekscentriciteta krila propelera.

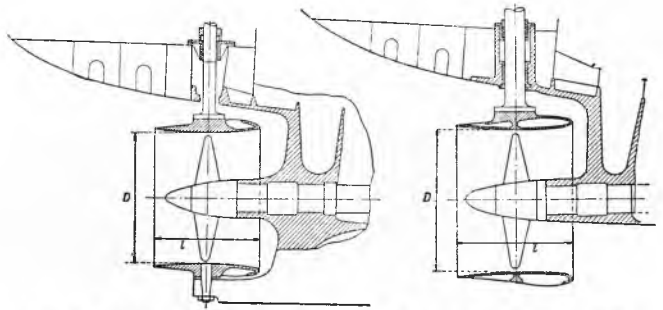


Sl. 21. Pramčani uređaj s vijkom na vertikalnoj osovini koja se može spuštati i zakretati

Pramčani uređaj s običnim vijkom sastoji se od vertikalne osovine na čijem je donjem kraju horizontalno strujno tijelo s vijkom. Za vrijeme plovidbe vertikalna osovina je podignuta i vijak je uvučen u komoru koja se nalazi na samom dnu pramca; pri manevriranju osovina sa strujnim tijelom i vijkom se spusti toliko da vijak strši van trupa broda. Smjer sile poriva vijka, a time i smjer poprečne sile na pramac, podešava se zakretanjem vertikalne osovine koja nosi strujno tijelo i vijak (sl. 21).

Okretljiva sapnica. Sapnica stavljena oko teško opterećenog vijka može znatno povećati stepen propulzije broda. Npr. na tegljaču sapnica povećava stepen propulzije za 30...40% u uvjetima koji su bliski vuči na stupu a za 15...25% ako tegljač gura neki sastav. Međutim, sapnica smanjuje okretljivost broda, i to naročito pri vožnji krmom. U novije vrijeme na tegljačima se mnogo primjenjuju okretljive sapnice, koje, pored toga što povećavaju stepen propulzije, znatno poboljšavaju i svojstvo okretljivosti.

Prema tome kako je okretljiva sapnica smještena i pričvršćena na trup broda razlikuje se obična okretljiva sapnica (sl. 22) i viseća okretljiva sapnica (sl. 23). Zakretanjem sapnice nastaje poprečna sila koja zakreće brod. Ova sila nastaje jednim dijelom zbog zakrenutog mlaza (reakcija mlaza tekućine djeluje pod nekim kutom prema uzdužnoj osi broda i izaziva bočni poriv), a drugim dijelom zbog toga što zakrenuta sapnica u stvari predstavlja prstenasto krilo. Poprečna sila raste s porastom opterećenja vijka, pa

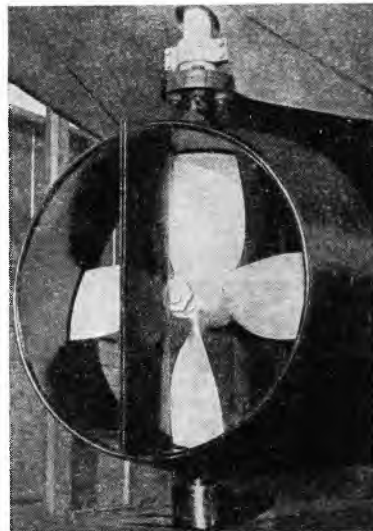


Sl. 22. Obična okretljiva sapnica

Sl. 23. Viseća okretljiva sapnica

je okretljiva sapnica pri vožnji pramcem u pogledu okretljivosti jednako efikasna kao i kormilo u struji vijčanog mlaza, a pri vožnji krmom sapnica je daleko efikasnija od kormila.

Da bi se sapnica mogla zakretati a da pri tom krila vijka o nju ne zapnu, moraju vršci krila vijka i simetrala osovine sapnice ležati u istoj vertikalnoj ravnini. Budući da je vijak uvijek smješten na mjestu najmanjeg promjera sapnice, to od položaja simetrale osovine sapnice zavisi i oblik sapnice. S druge strane, od položaja simetrale osovine sapnice zavisi i veličina momenta na osovini sapnice. Najmanja vrijednost momenta potrebnog za zakretanje



Sl. 24. Okretljiva sapnica s vertikalnim stabilizatorom

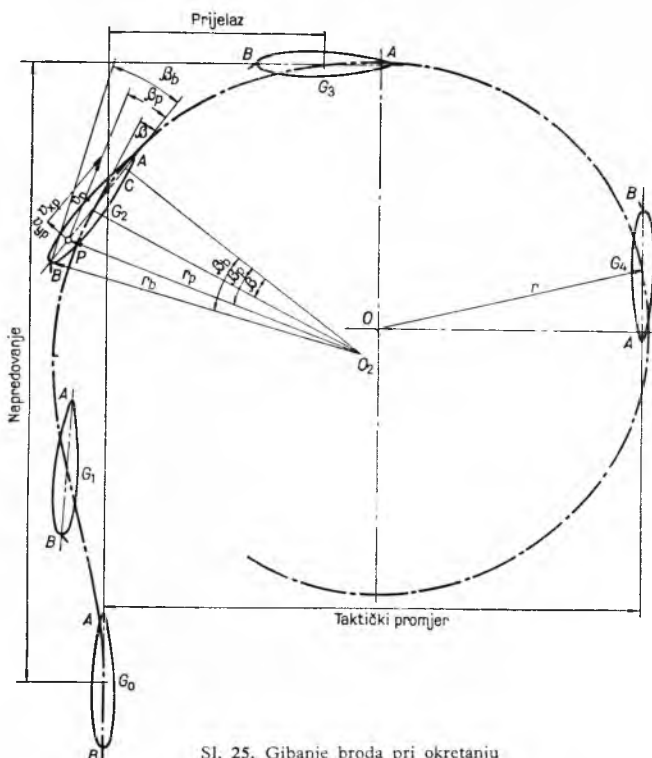
sapnice pri vožnji pramcem dobiva se ako je simetrala osovine smještena na 25...30% od ulaznog brida sapnice, ali uz taj smještaj moment je velik pri vožnji krmom. Stoga se obično simetrala osovine sapnice stavlja po sredini dužine sapnice, a u stražnji dio sapnice ugrađuje se vertikalni stabilizator strujnog presjeka koji smanjuje moment pri vožnji pramcem (sl. 24). Širina stabilizatora obično iznosi 30...40% dužine sapnice. Najveći je kut zakretanja sapnice 30...35°.

Propulzori kojima se i upravlja brodom. Od svih takvih uređaja danas se u praksi najviše upotrebljava Voith-Schneiderov propeler. Taj propeler omogućuje zakretanje sile poriva u bilo kojem smjeru i to u cijelom području brzina, pa stoga brodovi oprerljeni tim propelerom imaju izvanrednu okretljivost. Posebna kormila nisu potrebna ni brodovima s mlaznim propelerom ako je izlazna cijev za mlaz izvedena okretljivo. Zakretanjem izlazne cijevi mlaz se po volji usmjeruje i tako se kormilari brodom. Ovakvo rješenje ima većina čamaca s mlaznim propulzorom. O propulzorima koji ujedno služe i za upravljanje brodom v. i poglavlje Propulzija broda u ovom članku.

Okretanje broda

Djelovanje kormila na okretanje broda. Ako se brod giba u ravnom kursu s kormilom u središnjem položaju, strujanje vode oko broda je simetrično s obzirom na uzdužnu ravninu simetrije. Uslijed simetrije se poprečne komponente pritiska međusobno poništavaju te na brod djeluju jedino sile poriva T i sile otpora R , za koje se pretpostavlja da leže u ravnini simetrije. Kad se kormilo zakrene iz središnjeg položaja za neki kut α , naruši se simetrija strujanja, a prema tome i simetrična raspodjela pritiska, uslijed čega se javlja sila kormila F_R . Radi jednostavnosti pretpostavlja se da ova sila djeluje okomito na središnju ravninu kormila i da joj hvatište leži u simetrali osovine kormila (obje te pretpostavke nisu sasvim tačne). U općem slučaju sila F_R će imati translacijsko djelovanje u smjeru triju glavnih osi broda i rotacijsko djelovanje oko tih triju osi. Od tih djelovanja najvažnija su: rotacijsko oko vertikalne i uzdužne osi (okretanje i nagibanje broda) i translacijsko u smjeru poprečne osi (zanošenje broda). Skretanjem kormila želi se postići samo okretanje broda; sva su ostala djelovanja nepoželjna, ali neizbježna.

Gibanje broda pri okretanju. Ako se brodu pri gibanju u ravnom kursu zakrene kormilo, dolazi do složenog gibanja. Težište broda se giba po krivulji koja u svom početnom dijelu



Sl. 25. Gibanje broda pri okretanju

nalikuje slovu S, zatim prelazi u spiralu i konačno postaje kružnicom (sl. 25). Osim toga za vrijeme okretanja brod i rotira oko svojeg težišta. Pri okretanju se pramac broda nalazi unutar krivulje koju opisuje težište broda, a krma izvan nje, tako da simetrala broda AB zatvara s tangentom krivulje kut zanošenja β . Pojedine veličine krivulje nose razna imena i služe kao mjerilo pokretljivosti broda. Radijus kružnog dijela krivulje naziva se *radijusom kruga okretanja* r . Udaljenost koju prevali težište broda u smjeru početnog kursa od časa kada je kormilo skrenuto pa do časa kada se početni kurs promijenio za 90° zove se *napredovanje*. Odgovarajuća udaljenost mjerena pod pravim kutom na početni kurs zove se *prijelaz*. Udaljenost između početnog kursa i položaja težišta broda kada se početni kurs promijenio za 180° zove se *taktički promjer kruga okretanja*.

Kad je brod u nekoj određenoj tački krivulje, npr. G_2 , trenutna je linearna brzina V_P neke njegove tačke P usmjerena tangencijalno na kružnicu polumjera r_P . Ta se brzina može rastaviti u dvije komponente V_{xP} i V_{yP} u smjeru simetrale broda AB i okomito na tu simetralu:

$$V_{xP} = V_P \cos \beta_P = V_P \frac{O_2C}{r_P} = \omega \cdot \overline{O_2C},$$

$$V_{yP} = V_P \sin \beta_P = V_P \frac{PC}{r_P} = \omega \cdot \overline{PC}.$$

(Tačka C je dobivena spuštanjem okomice iz tačke O_2 na simetralu broda AB). Slično je i za neku drugu tačku B broda:

$$V_{xB} = V_B \cos \beta_B = V_B \frac{O_2C}{r_B} = \omega \cdot \overline{O_2C},$$

$$V_{yB} = V_B \sin \beta_B = V_B \frac{BC}{r_B} = \omega \cdot \overline{BC}.$$

Komponente brzine V_x su međusobno jednake, a komponente V_y proporcionalne su udaljenosti od tačke C . Zbog toga se promatraču na brodu čini da se brod okreće oko tačke C , koja se zove *okretište*. Na većini brodova ta se tačka nalazi udaljena za $\frac{1}{6}$ do $\frac{1}{5}$ dužine broda od pramca.

Za vrijeme okretanja mijenja se linearna brzina V_G težišta broda. U početku okretanja brzina pada naglo, a zatim sve sporije (ovaj se pad brzine odvija za vrijeme tzv. prve i druge faze okretanja). Od onog trenutka kada krivulja po kojoj se giba težište broda postane kružnicom, brzina više ne pada, već ostaje konstantna (to je tzv. treća faza okretanja). Analizirajući mjerenja kruga okretanja dvovijčnih ratnih brodova sa skokovima, Schoenherr je izveo empirijsku formulu za odnos između brzine broda pri okretanju po kružnici i brzine broda u ravnom kursu prije skretanja kormila:

$$\frac{V_G}{V} = 1 - \frac{\alpha A_R}{K_S A_S}$$

gdje je V_G konstantna brzina pri okretanju broda, V brzina broda prije okretanja, α kut kormila u stupnjevima, A_R površina kormila, A_S površina uronjene središnje ravnine broda, K_S koeficijent ovisan o omjeru $V/A_S L$, gdje je V volumen uronjenog dijela broda, L dužina broda na vodnoj liniji:

$V/A_S L$	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,15
K_S	4,25	3,33	2,68	2,27	2,02	1,88	1,83

Formula vrijedi za navedeni tip broda, a njena tačnost je unutar $\pm 10\%$.

Djelovanje sila pri okretanju broda. Ako se izvrši analiza sila koje djeluju na brod za vrijeme okretanja, mogu se jasno uočiti tri različite faze koje postepeno prelaze jedna u drugu.

Prva faza. Kad se brodu koji se giba u ravnome kursu zakrene kormilo za kut α , na brod osim poriva T i otpora R djeluje i sila



Sl. 26. Djelovanje sila za vrijeme prve faze okretanja

kormila F_R (sl. 26). Komponenta sile kormila u smjeru simetrale broda AB , $F_{R_x} = F_R \sin \alpha$, povećava otpor broda, a komponenta okomita na simetralu broda, $F_{R_y} = F_R \cos \alpha$, izaziva gibanje broda u smjeru poprečne osi i okretanje broda oko vertikalne osi kroz težište G . Da bi došlo do okretanja broda, mora moment $F_R \cos \alpha \cdot \overline{BG}$ savladati moment tromosti mase broda zajedno s momentom tromosti mase izvjesne količine vode oko broda (tzv. povučene vode). Prva faza okretanja traje dok još nije savladan moment tromosti mase broda i povučene vode, dakle dok još nije došlo do okretanja broda oko vertikalne osi. Za vrijeme prve faze dolazi do izražaja djelovanje komponente F_{R_y} , koja uzrokuje samo bočno gibanje broda.

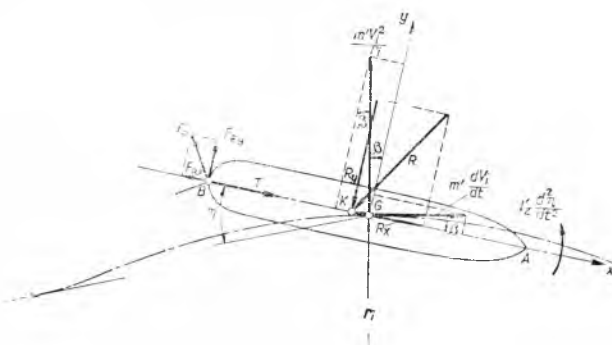
Druga faza nastupa čim počne okretanje broda oko vertikalne osi (sl. 27). Uslijed bočnog pomicanja i okretanja mijenja se raspodjela pritiska oko trupa broda tako da otpor broda R ne djeluje više u smjeru simetrale broda AB , već je pod stanovitim kutom. Komponenta otpora broda R_y zaustavlja bočno gibanje broda iz prve faze. Hvatište K sile otpora leži u početku okretanja između težišta broda i pramca, uslijed čega se povećava kutna brzina okretanja broda oko vertikalne osi, a brod se giba usporeno po krivulji čiji radijus zakrivljenosti pada. U daljnjem toku okretanja hvatište otpora K se pomiče prema krmi te se na koncu druge faze nalazi između težišta broda i krme. Gibanje broda može se izraziti pomoću jednadžbi sila na temelju d'Alembertovog stavka (sile koje djeluju na tijelo moraju biti u ravnoteži s reakcijama uslijed inercije tijela). Za ovaj slučaj u nekom određenom trenutku na brod djeluju sila poriva T , otpor R i sila kormila F_R . Reakcije uslijed inercije tijela jesu: sila koja djeluje u smjeru tangente na putanju težišta u tački G i koja se suprotstavlja linearnoj retardaciji broda, zatim centrifugalna sila koja djeluje u smjeru trenutnog radijusa zakrivljenosti r_1 i koja se suprotstavlja centripetalnoj akceleraciji, i konačno moment koji se suprotstavlja kutnoj akceleraciji broda oko njegova težišta. Jednadžbe sila u smjeru simetrale broda AB , zatim u smjeru okomitom na simetralu, i momentna jednadžba s obzirom na os kroz težište broda glase:

$$m' \frac{dV_1}{dt} \cos \beta = \frac{m' V_1^2}{r_1} \sin \beta + R_x + F_{R_x} - T,$$

$$m' \frac{dV_1}{dt} \sin \beta = - \frac{m' V_1^2}{r_1} \cos \beta + R_y - F_{R_y},$$

$$I_z' \frac{d^2 \eta}{dt^2} = F_R \cdot p - R \cdot q \pm N,$$

gdje je m' stvarna masa, tj. masa broda uvećana za masu povučene vode; V_1 trenutna linearna brzina težišta broda G ; β kut zanošenja;



Sl. 27. Djelovanje sila za vrijeme druge faze okretanja

r_1 trenutni radijus zakrivljenosti; R_x, R_y komponente sile otpora R u smjeru simetrale broda i okomito na nju; F_{R_x}, F_{R_y} komponente sile kormila F_R u smjeru simetrale i okomito na nju; T poriv broda; I_z' polarni moment tromosti mase broda i povučene vode s obzirom na vertikalnu os kroz G ; η kut između početnog kursa prije okretanja i trenutnog kursa; p, q krakovi sila F_R i R s obzirom na težište G ; N moment uslijed eventualne nejednakosti poriva desnog i lijevog vijka dvovijčanih brodova.

Treća faza. Za vrijeme prve i druge faze okretanja neprestano se mijenjaju sile i gibanja. Pri koncu druge faze sistem sila dolazi u novo stanje ravnoteže. Prestaju i kutno ubrzanje i retardacija

koja je djelovala u smjeru suprotnom smjeru linearne brzine V_1 , te gibanje postaje jednoliko. Radijus zakrivljenosti putanje postaje konstantan pa težište broda za vrijeme treće faze okretanja opisuje kružnicu polumjera r . Jednolikost gibanja se matematički odražava tako da lijeve strane jednadžbi sila postaju jednake nuli. Tako pojednostavnjene jednadžbe mogu se riješiti uz neke prikladne pretpostavke. Označi li se sa V_G jednolika linearna brzina težišta G , sa r polumjer kružnice a sa a udaljenost \overline{GK} , glase jednadžbe sila:

$$\frac{m' V_G^2}{r} \cdot \sin \beta + R_x + F_R \sin \alpha - T = 0,$$

$$- \frac{m' V_G^2}{r} \cdot \cos \beta + R_y - F_R \cos \alpha = 0,$$

$$F_R \cdot p - R_y \cdot a \pm N = 0.$$

Za jednoliko okretanje broda posljednje su dvije jednadžbe od neposrednog značenja. One ukupno sadrže deset varijabli: šest varijabli (m', V_G, F_R, α, p i N) su poznate veličine, a preostale četiri (r, β, R_y i a) su nepoznanice. Da bi te dvije jednadžbe bile rješive, potrebno je izraziti dvije nepoznate varijable s pomoću preostalih dviju nepoznanica ili s pomoću poznatih veličina. Kako se teorijskim putem nije moglo doći do takvih relacija, one su pronađene eksperimentalno. Na temelju ispitivanja kruga okretanja većeg broja dvovijčanih ratnih jedinica svih tipova opremljenih skokovima, Hovgaard i Schoenherr su došli do takvih relacija, koje vrijede za te tipove brodova. Ako se iz posljednjih dviju jednadžbi eliminiira R_y i jednadžbe riješe po r , dobiva se jednadžba za polumjer kruga okretanja:

$$r = \frac{m' V_G^2 \cos \beta}{F_R \cos \alpha \left(\frac{p \pm N/F_R}{a \cos \alpha} - 1 \right)}$$

Transformacija ove jednadžbe jasnije će pokazati o kojim veličinama ovisi polumjer kruga okretanja. Vrijednost izraza N/F_R obično je malena i može se zanemariti. Stavi li se za silu kormila $F_R = C \cdot \gamma / 2g \cdot A_R \cdot V_G^2 \cdot k'$, gdje je k' faktor korekcije (detajnije o tome vidi dalje Projektiranje kormila u ovom članku), za masu $m' = V' \cdot \gamma / g$ gdje je V' volumen uronjenog dijela broda i povučene vode, a za omjer $p/\cos \alpha = \overline{GB} = e$, dobiva se novi oblik jednadžbe:

$$r = \frac{2 V' \cos \beta}{C \cos \alpha A_R \left(\frac{e}{a} - 1 \right) k'}$$

Diskusijom te jednadžbe može se doći do ovih zaključaka: Polumjer kruga okretanja ne ovisi o brzini broda. (U stvari to je tačno samo kad se radi o malim brzinama; kod većih je brzina opaženo znatno povećanje polumjera. Uzrok je tome što se i C i a mijenjaju s brzinom broda.) Polumjeri krugova okretanja sličnih brodova pri jednakim kutovima kormila direktno su proporcionalni linearnim dimenzijama. Polumjer kruga okretanja pada s porastom površine kormila i sa smanjenjem kraka a , tj. kad se hvatište K rezultante pritiska (koje se inače za vrijeme jednolikog okretanja nalazi iza težišta G) pomiče prema težištu G . Položaj hvatišta K rezultante pritiska ovisi, između ostalog, i o rasporedu lateralne površine uronjenog dijela broda, tj. on se mijenja u istom smjeru kao i težište lateralne površine. Polumjer kruga okretanja može se smanjiti smanjenjem lateralne površine krmenog dijela broda ili povećanjem gaza na pramcu (pretegom). I obratno, polumjer kruga okretanja može se povećati povećanjem lateralne površine krmenog dijela broda ili povećanjem gaza na krmi (zategom), što u stanovitoj mjeri pridonosi i sposobnosti držanja kursa.

Schoenherr je pojednostavnio naprijed navedenu jednadžbu uzimajući da V' (volumen istisnine broda i povučene vode) i V (volumen istisnine broda) stoje u konstantnom omjeru, da vrijednost $\cos \beta$ iznosi $0,97 \dots 0,98$ i da se utjecaj karakteristika broda na r izražen izrazom $\left(\frac{e}{a} - 1 \right) k'$ može zamijeniti jednim koeficijentom, koji vrijedi za brodove stanovitog tipa i za neko područje maksimalnih kutova kormila. Tako pojednostavnjena jednadžba prima oblik:

$$r = K_3 \frac{V}{C_a \cdot \cos \alpha \cdot A_R}$$

gdje je r polumjer kruga okretanja, V volumen istisnine broda, C_n koeficijent normalne sile izračunat s pomoću Joesellove jednadžbe: $C_n = \frac{0,811 \sin \alpha}{0,195 + 0,305 \sin \alpha}$ (vidi dalje Projektiranje kormila u ovom članku), α kut kormila, A_R površina kormila, K_s koeficijent ovisan o omjeru $V/A_s L$ (A_s je površina uronjene središnje ravnine broda, L dužina broda na vodnoj liniji).

Vrijednosti koeficijenata K_s Schoenherr je odredio na temelju rezultata ispitivanja kruga okretanja dvovijčanih ratnih brodova opremljenih skrokovima, pri čemu je vrijednosti C_n izračunao s pomoću Joesellove jednadžbe. Pri ispitivanju tih brodova primjenjivani su maksimalni kutovi kormila ($20 \dots 37^\circ$). Srednje vrijednosti koeficijenata K_s u ovisnosti o omjeru $V/A_s L$ jesu:

$V/A_s L$	0,05	0,06	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15
K_s	1,410	1,100	0,845	0,550	0,400	0,355	0,340

Vidi se da K_s (dakle i r) naglo raste sa smanjenjem omjera $V/A_s L$, a to znači sa smanjenjem omjera B/L (gdje je B širina broda). Schoenherrrova jednadžba daje dobre rezultate za dvovijčane brodove sa skrokovima (ratne i trgovačke) u području maksimalnih kutova kormila. Ona daje premale vrijednosti za dvovijčane brodove s nogavicama, a prevelike za jednovijčane brodove.

Za slične brodove i uz jednake kutove kormila omjer je polumjera kruga okretanja (odnosno taktičkog promjera kruga okretanja) i dužine broda stalna vrijednost, ili vrijednost koja se kreće u uskim granicama. Vrijednosti su toga omjera za neke tipove brodova:

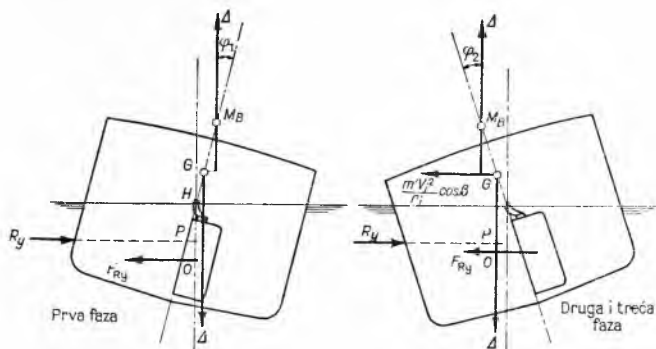
Jednovijčani tankeri

Kut kormila $\alpha = 33 \dots 35^\circ$	3,44
Kut kormila $\alpha = 25^\circ$	3,86

Ratni brodovi

Bojni brodovi	3,0...4,0
Teške krstarice (bez peraje na krmu)	3,0...4,0
Teške krstarice (s perajama na krmu)	3,5...4,5
Krstarice za izvidanje	4,0...5,0
Razarači (kod malih brzina)	5,0...6,0
Razarači (kod velikih brzina)	6,0...7,5

Nagibanje broda oko uzdužne osi pri okretanju je pojava do koje neizbježno dolazi uslijed djelovanja poprečnih sila koje ne leže u istoj horizontalnoj ravnini. Nagib broda se mijenja za vrijeme okretanja jer se mijenjaju i poprečne sile.



Sl. 28. Nagibanje broda oko uzdužne osi pri okretanju

Za vrijeme prve faze okretanja (sl. 28) poprečna komponenta sile kormila F_{Ry} naginje brod oko osi koja leži približno u sjecištu H vodne linije i uzdužne ravnine simetrije. Osim toga sila F_{Ry} izaziva gibanje broda u smjeru poprečne osi, uslijed čega se javlja poprečna komponenta otpora broda R_y , koja je u početku malena a kasnije postepeno raste i postaje jednaka sili F_{Ry} . Kao hvatište sile F_{Ry} može se uzeti težište površine kormila, a kao hvatište sile R_y težište uronjenog dijela središnje ravnine broda (ove pretpostavke su samo približno tačne, no za potrebe prakse posve zadovoljavaju). Hvatište sile F_{Ry} leži u većini slučajeva ispod hvatišta sile R_y . Neposredno nakon zakretanja kormila sila F_{Ry} nagne brod na onu stranu na koju je zakrenuto kormilo, dakle na desni bok ako je kormilo zakrenuto udesno, na lijevi ako je

zakrenuto ulijevo. Pojavom sile R_y (koja postepeno raste) smanjuje se nagib broda. U slučaju jednovijčanog broda javlja se još i moment koji djeluje u smjeru suprotnom smjeru okretanja vijka, a po intenzitetu je jednak momentu što ga stroj predaje vijku. Taj je moment u usporedbi s ostalim momentima malen i može se zanemariti. Algebarska suma tih triju momenata koji naginju brod mora biti jednaka statičkom momentu poprečnog stabiliteta broda:

$$\Delta \cdot \overline{MG} \sin \varphi_1 = F_{Ry} \cdot \overline{OH} - R_y \cdot \overline{PH} \pm Q_p,$$

gdje je Δ istisnina broda, \overline{MG} poprečna metacentarska visina, φ_1 kut nagiba broda za vrijeme prve faze okretanja, $F_{Ry} \cdot \overline{OH}$ moment poprečne komponente sile kormila s obzirom na tačku H , $R_y \cdot \overline{PH}$ moment poprečne komponente sile otpora s obzirom na tačku H , Q_p reaktivni moment vijka.

Čim započne druga faza okretanja, javlja se centrifugalna sila, koja ima hvatište u težištu broda. Poprečna komponenta ove sile $m' V_1^2 / r_1 \cdot \cos \beta$ nagne brod na suprotan bok, tj. na lijevi bok ako je kormilo skrenuto udesno (i obratno). Jednadžba momenata sada glasi:

$$\Delta \cdot \overline{MG} \sin \varphi_2 = m' V_1^2 / r_1 \cdot \cos \beta \cdot \overline{GP} - F_{Ry} \cdot \overline{OP} \pm Q_p,$$

gdje je φ_2 kut nagiba broda za vrijeme druge i treće faze okretanja, $m' V_1^2 / r_1 \cdot \cos \beta \cdot \overline{GP}$ moment poprečne komponente centrifugalne sile s obzirom na tačku O ; $F_{Ry} \cdot \overline{OP}$ moment poprečne komponente sile kormila s obzirom na tačku O . Kut φ_2 poprima najveću vrijednost neposredno nakon promjene nagiba s jednog boka na drugi. Uslijed tromosti mase brod se naginje i preko položaja statičke ravnoteže, tako da maksimalne vrijednosti kuta φ_2 mogu znatno premašiti vrijednosti iz posljednje jednadžbe.

Za vrijeme treće faze okretanja brod ostaje nagnut na istom boku kao i za vrijeme druge faze. Nagib broda se smanjuje i poprima stalnu vrijednost. Do smanjenja nagiba dolazi uslijed toga što se smanjuje brzina broda a time i centrifugalna sila.

Diskusija jednadžbe pokazuje da do velikog nagiba broda može doći uslijed velike brzine, uslijed visokog položaja težišta, uslijed male poprečne metacentarske visine i uslijed malog polumjera kruga okretanja. Također je opasno u trenutku najvećeg nagiba (tj. kada nagib prelazi s jednog boka na drugi) zakrenuti kormilo u središnji položaj, jer tada nestaje moment $F_{Ry} \cdot \overline{OP}$ koji smanjuje nagib. Poznato je nekoliko slučajeva da je uslijed velikog nagiba došlo do prevrtanja broda. Osjetno smanjenje nagiba može se postići zaustavljanjem strojeva, tj. naglim smanjenjem brzine.

Nagibanje broda oko poprečne osi pri okretanju. U većini slučajeva komponenta sile kormila u smjeru simetrale broda F_{Rx} ne povećava samo otpor broda nego i naginje brod oko poprečne osi koja prolazi težištem vodene linije. Označi li se sa z krak sile F_{Rx} s obzirom na poprečnu os, može se kut pretege izračunati na temelju jednadžbe:

$$\Delta \cdot \overline{M_L G} \sin \psi = F_{Rx} z,$$

gdje je $\overline{M_L G}$ uzdužna metacentarska visina. Za velike brodove su veličine Δ i $\overline{M_L G}$ znatno veće od veličina F_{Rx} i z , te je veličina kuta pretege ψ beznačajno malena. Osovina kormila sportskih jedinica obično je kosa, tako da komponenta sile kormila koja djeluje u središnjoj ravnini broda ne stvara moment s obzirom na poprečnu os, jer se linija djelovanja te komponente i poprečna os sijeku.

Držanje kursa

U plovidbi između dviju određenih tačaka poželjno je da brod što manje skreće s ravnog kursa, bilo da vladaju idealne vremenske prilike bilo da ima vjetra i valova. Gibanje broda u ravnom kursu može se shvatiti kao specijalan slučaj okretanja broda sa krugom okretanja neizmjereno velikog radijusa.

Kada se brod pokretan vijkom giba jednoliko i translatorsno a njegova simetrala zatvara sa smjerom gibanja neki kut, ne može postojati statička ravnoteža između sile poriva, sile otpora i sile kormila, a prema tome ni statička stabilnost kursa. Međutim, u tom slučaju može doći do dinamičke stabilnosti kursa, koja u znatnoj mjeri neutralizira negativnu statičku stabilnost kursa.

Pri gibanju u ravnome kursu brod obično skreće (vijuga) oko tog kursa, čas na jednu, čas na drugu stranu. I u tome slučaju mogu se primijeniti jednadžbe sila pri okretanju broda. Pri tom se uzima da su kutovi skretanja maleni, tako da se mogu zanemariti promjene u brzini i da je radijus zakrivljenosti putanje beskonačno velik. Uz te pretpostavke iz jednadžbi sila nestaju članovi koji sadrže $\frac{dV_1}{dt}$ i $\frac{m'V_1^2}{r_1}$. Dok prve dvije jednadžbe ne daju nikakve određene rezultate u pogledu držanja kursa, treća, tj. momentna jednadžba, omogućuje izvođenje važnih zaključaka. Ta jednadžba glasi:

$$I_z' \frac{d^2\eta}{dt^2} + Rq - F_R p = 0.$$

Spreg sila Rq može se rastaviti na dva komponentna sprega: prvi nastaje zbog rotacije broda oko težišta te je proporcionalan kutnoj brzini $d\eta/dt$, drugi nastaje zbog translacije težišta te je proporcionalan kutu skretanja η . Momentna jednadžba sada glasi:

$$I_z' \frac{d^2\eta}{dt^2} + B \frac{d\eta}{dt} \pm C\eta \pm F_R p = 0,$$

gdje su B i C faktori proporcionalnosti. Članovi $C\eta$ i $F_R p$ napisani su sa dvostrukim predznakom: oni su pozitivni kad nastoje smanjiti kut skretanja η , a negativni kad nastoje povećati taj kut. Ako se kormilo nalazi u središnjem položaju, spreg $F_R \cdot p$ postaje jednak nuli, a momentna jednadžba poprima oblik diferencijalne jednadžbe prigušenog titranja. Opće rješenje te jednadžbe glasi:

$$\eta = A_1 e^{c_1 t} + A_2 e^{c_2 t},$$

gdje su A_1 i A_2 konstante ovisne o početnom stanju, dok je

$$c_1 = -\frac{B}{2I_z'} + \sqrt{\frac{B^2}{4I_z'^2} \mp \frac{C}{I_z'}},$$

$$c_2 = -\frac{B}{2I_z'} - \sqrt{\frac{B^2}{4I_z'^2} \mp \frac{C}{I_z'}}.$$

Karakter gibanja ovisi o vrijednosti korijena. Kada je u momentnoj jednadžbi spreg $C \cdot \eta$ negativan, c_1 je pozitivno, c_2 negativno, pa se kut skretanja η povećava s vremenom. Takvo gibanje je nestabilno, tj. brod nije postojan u držanju kursa. Kada je spreg $C \cdot \eta$ pozitivan, mogu nastupiti dva slučaja. U prvom slučaju, kada je $B^2 \geq 4 I_z' C$, c_1 i c_2 su negativni, pa se početni kut skretanja smanjuje s vremenom, tj. brod asimptotski poprima novi kurs koji se vrlo malo razlikuje od početnog kursa. U drugom slučaju, $B^2 < 4 I_z' C$, c_1 i c_2 su konjugirano kompleksni brojevi, pa brod oscilira oko kursa po prigušenoj sinusoidi. U oba slučaja gibanje je stabilno, tj. brod je postojan u držanju kursa.

U praksi se brod koji je postojan u kursu giba po krivulji koja je slična prigušenoj sinusoidi. Omjer dvaju uzastopnih maksimuma (ili minimuma) prigušene sinusoida naziva se konstantom prigušenja, a vrijednost eksponenta konstante prigušenja logaritamskim dekrementom:

$$\delta = \frac{B T}{2 I_z'},$$

gdje je T period osciliranja. Analizom logaritamskog dekrementa mogu se stvoriti važni zaključci u pogledu držanja kursa. Kada se brod koji je postojan u držanju smjera otkloni od kursa, oscilacije će brzo iščeznuti ako je faktor prigušenja B velik a polarni moment tromosti I_z' malen. To znači da će na uzburkanom moru brod koji ima veliku lateralnu površinu krmenog dijela (veliki faktor prigušenja B) i na kojem su velike težine koncentrirane u sredini (mali polarni moment tromosti I_z') manje skretati oko kursa nego brod sa suprotnim karakteristikama. S druge strane, brod koji ima veliki polarni moment tromosti bit će manje osjetljiv prema malenim smetnjama te će bolje držati kurs na umjerenom nemirnom moru.

Kada u momentnoj jednadžbi spreg $F_R \cdot p$ nije jednak nuli, ona postaje bazom za automatsko kormilarenje brodova. Automatsko kormilarenje se obično vrši s pomoću giro-kompasa i sistema električnih kontakata i releja koji upravljaju kormilarskim strojem tako da je kut kormila α u funkcijskoj vezi sa kutem skretanja η . Kada vanjske poremećajne sile djeluju samo povremeno, dovoljno je da kut kormila bude direktno proporcionalan kutu skretanja.

Kada vanjske poremećajne sile stalno djeluju na brod, potrebno je da i kut skretanja i kutna brzina skretanja budu u funkcijskoj vezi s kutnom brzinom kormila (v. *Regulacija, automatska* i *Automatski pilot* u članku *Avion*).

Projektiranje kormila

Projekt kormila ovisi o kormilarskim svojstvima koja se traže od određenog tipa broda. Veličina sile F_R koja nastaje zakretanjem kormila ovisi o nizu faktora. Medusobna ovisnost svih tih faktora danas još nije matematički definirana, pa ne postoji ni egzaktna matematička metoda za proračun sile F_R . Jedini sigurni oslonac projektantu su rezultati dobiveni ispitivanjem modela u bazenima. Ta ispitivanja se vrše i s modelom samog kormila i s modelom broda na kojem se nalazi model kormila.

Sile i momenti na kormilu. Giba li se potpuno uronjeno kormilo kao posebno tijelo (tj. odvojeno od broda) kroz vodu pod nekim kutom α , dolazi do strujanja za koje se može uzeti da je sastavljeno od translacijskog i cirkulacijskog. Ova dva sistema strujanja izazivaju na gornjoj strani kormila (sl. 29) porast a na donjoj pad brzine strujanja. Kako je prema Bernoullijevom zakonu porast brzine strujanja praćen smanjenjem pritiska a pad brzine strujanja porastom pritiska, to na gornjoj strani kormila dolazi do pada a na donjoj do porasta pritiska. Rezultanta razlike pritiskaka je sila kormila F_R . Rastavljanjem sile kormila F_R na komponente u smjeru središnje horizontalnog presjeka kormila i okomito na tu središnjicu dobivaju se tangencijalna sila (sila trenja) F_t i normalna sila F_n . Sila kormila F_R može se rastaviti i na druge dvije komponente: jednu koja je okomita na smjer gibanja i zove se sila uzgona F_L , i drugu koja je u smjeru gibanja i zove se sila otpora F_D . Sila kormila ovisi o površini kormila, kutu kormila, obliku kormila, brzini gibanja kroz tekućinu, o gustoći i viskozitetu tekućine. Promatra li se kormilo određenog oblika pod određenim kutom i zanemari li se viskozitet tekućine, može se sila kormila izraziti jednadžbom

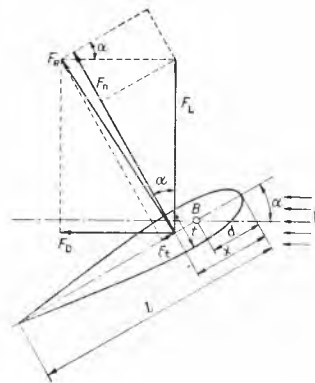
$$F_R = C' \cdot f(A_R, V, \varrho),$$

gdje je C' bezdimenzijski koeficijent sile kormila koji ovisi o kutu kormila α i obliku kormila, A_R površina kormila, V brzina gibanja kormila, ϱ gustoća tekućine. Da bi se jednadžbom osim matematičke jednakosti izrazila i fizička jednakost, potrebno je da funkcija $f(A_R, V, \varrho)$ ima dimenziju sile. Taj je uvjet ispunjen jedino ako jednadžba glasi: $F_R = C' A_R V^2 \varrho$.

Pretpostavljena konstantnost omjera sila $F_R/A_R V^2 \varrho = C'$ uvjet je za dinamičku sličnost kormila istog oblika a različitih veličina, uz određeni kut kormila. Prema tome koeficijent C' ne ovisi o apsolutnoj veličini kormila, već samo o obliku i kutu kormila, te se može odrediti ispitivanjem modela kormila. U tu svrhu izveden je velik broj ispitivanja različitih profila u hidrodinamičkim i aerodinamičkim institutima.

Uobičajene oznake za dimenzije kormila jesu: dužina kormila l , mjerena na središnjici horizontalnog presjeka, visina kormila h , maksimalna debljina t , mjerena okomito na središnjicu horizontalnog presjeka. Ako kormilo nije pravokutno i ako se stanjuje od vrha prema dolje, kao dimenzije se uzimaju srednja dužina, srednja visina i srednja debljina. Kao površina kormila uzima se površina njegove središnje ravnine samo s jedne strane. Udaljenost od hvatišta sile kormila do prednjeg ruba kormila označena je sa x , a udaljenost od osovine kormila do prednjeg ruba sa d . Moment normalne sile s obzirom na prednji rub kormila $Q_r = F_n \cdot x$, a moment normalne sile s obzirom na osovinu kormila $Q_s = F_n(x - d)$.

Da bi se rezultati mjerenja sila i momenta na modelu kormila mogli primijeniti na slična kormila u naravnoj veličini i da bi se



Sl. 29. Sila kormila

moгли usporediti rezultati mjerenja na dva različita kormila, izražavaju se sile i moment u obliku bezdimenzijskih koeficijenata:

$$\text{Koeficijent sile kormila: } C = \frac{F_R}{\frac{1}{2} \rho A_R V^2},$$

$$\text{koeficijent normalne sile: } C_n = \frac{F_n}{\frac{1}{2} \rho A_R V^2},$$

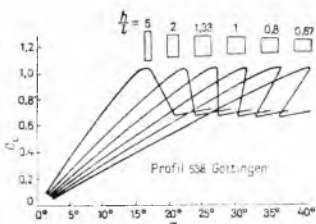
$$\text{koeficijent tangencijalne sile: } C_t = \frac{F_t}{\frac{1}{2} \rho A_R V^2},$$

$$\text{koeficijent sile uzgona: } C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho A_R V^2},$$

$$\text{koeficijent sile otpora: } C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho A_R V^2},$$

$$\text{koeficijent momenta: } C_{Qr} = \frac{Q_r}{\frac{1}{2} \rho A_R V^2 l} = C_n \frac{x}{l}.$$

Rezultati ispitivanja modela kormila u slobodnoj vožnji. Pod ispitivanjem modela kormila u slobodnoj vožnji podrazumijevaju se ispitivanja modela samog kormila bez modela broda. Ovim ispitivanjem dobiva se uvid u to kako pojedine dimenzije kormila utječu na sile i moment kormila. Pri tom su od velike pomoći brodograditeljima podaci iz aerodinamike.



Sl. 30. Utjecaj omjera h/l na C_L

ispitivanja kormila koje je imalo oblik pravokutne ploče, duljine 40 cm a visine 30 cm. Joessel je izveo dvije formule, jednu za moment kormila a drugu za položaj hvatišta sile kormila:

$$Q_r = 41,36 A_R V^2 \sin \alpha l,$$

$$x = (0,195 + 0,305 \sin \alpha) l,$$

gdje je Q_r moment normalne sile s obzirom na prednji rub kormila u kpm, x udaljenost hvatišta sile kormila od prednjeg ruba u m, A površina kormila u m^2 , V brzina broda u m/sek. Uzme li se da je gustoća slatke vode $\rho = 102 \text{ kp sek}^2/m^4$, može se s pomoću tih dviju formula odrediti vrijednost koeficijenta normalne sile:

$$C_n = \frac{0,811 \sin \alpha}{0,195 + 0,305 \sin \alpha}$$

Nedostatak je ove formule što ona C_n prikazuje samo kao funkciju kuta kormila, a ne pokazuje da C_n ovisi i o odnosu dimenzija kormila.

Velik utjecaj na veličinu sile kormila ima omjer h/l (ako kormilo nije pravokutno, treba umjesto omjera h/l uzeti omjer h/A_R). Preko gornjeg i donjeg ruba zaronjenog kormila dolazi do strujanja sa strane većeg pritiska prema strani manjeg pritiska, uslijed čega se smanjuje sila kormila. Kormilo koje ima neku određenu površinu A_R može se izvesti sa raznim omjerima h/l . Što je manja visina kormila to veći je utjecaj strujanja preko rubova, pa je i sila kormila razmjerno manja (to vrijedi za područja kutova kormila gdje još nema otkidanja strujnica). U Fischerovom dijagramu (sl. 30) prikazani su koeficijenti sile uzgona C_L kao funkcije kuta kormila za razne vrijednosti omjera h/l . Vrijednosti C_L dobivene su na temelju ispitivanja jedino za omjer $h/l = 5$, dok su za ostale omjere h/l vrijednosti C_L izračunate s pomoću Prandtlovihih formula. Ako se, naime, koeficijenti sile uzgona i otpora za kormilo određenog presjeka i stanovitog omjera h/l (odnosno h^2/A_R) žele primijeniti na kormila jednakog presjeka ali različitog omjera h/l (h^2/A_R), potrebno je izvršiti korekciju s pomoću Prandtlovihih formula. Da bi se u oba slučaja

dobio jednaki koeficijent sile uzgona C_L , treba izračunati nove vrijednosti za kut kormila α i koeficijent sile otpora C_D s pomoću slijedećih formula:

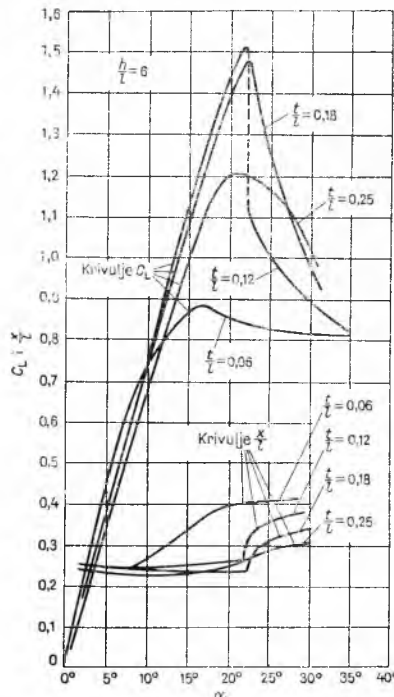
$$\alpha_2 = \alpha_1 + 57,3 \frac{C_L}{\pi} \left(\frac{A_{R2}}{h_2^2} - \frac{A_{R1}}{h_1^2} \right),$$

$$C_{D2} = C_{D1} + \frac{C_L^2}{\pi} \left(\frac{A_{R2}}{h_2^2} - \frac{A_{R1}}{h_1^2} \right),$$

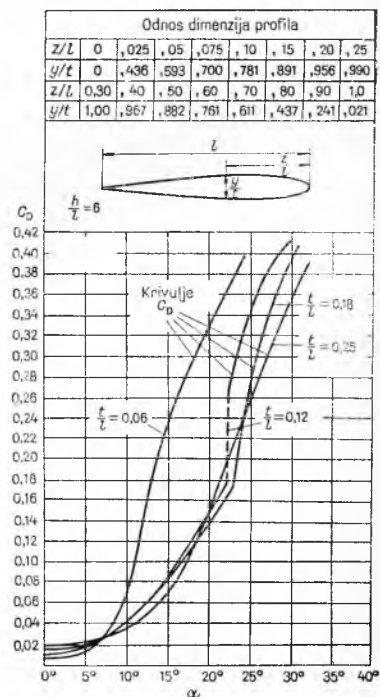
gdje se indeksi 1 i 2 odnose na kormila koja se uspoređuju. Uz stanoviti kut kormila, tzv. kritični kut, dolazi na strani manjeg pritiska do otkidanja strujnica, uslijed čega se smanjuje sila kormila. Što je veći omjer h/l to je manji kritični kut. Ova pojava znatno umanjuje vrijednost visokog omjera h/l , jer se od kormila traži da bude najdjelotvornije kad je kut α od 30° do 35° .

Danas se gotovo isključivo upotrebljavaju kormila strujnog presjeka, koja imaju manji otpor i povoljnije djelovanje na propulziju od kormila koja imaju oblik ploče. U aerodinamici su izvršena mnogobrojna ispitivanja različitih profila. Od posebnog su interesa rezultati ispitivanja simetričnih profila (sl. 31 i 32) jer se oni mogu iskoristiti pri projektiranju kormila. Na sl. 31 prikazani su koeficijenti C_L i omjeri x/l kao funkcije kuta α za razne vrijednosti omjera t/l . Na sl. 32 prikazani su koeficijenti C_D kao funkcije kuta α za razne vrijednosti omjera t/l . Na istoj slici prikazan je i odnos dimenzija profila. Vrijednosti C_L , C_D i x/l iz tih slika mogu se direktno upotrijebiti za kormila čiji je omjer $h/l = 6$, dok za druge vrijednosti omjera h/l treba izvršiti korekciju s pomoću Prandtlovihih formula. Iz slika se vidi da deblji profili ($t/l = 0,12, 0,18, 0,25$) imaju veći uzgon (tj. stvaraju veći moment zakretanja broda) a manji otpor od tankih profila ($t/l = 0,06$) za cijelo područje kutova kormila iznad 8° . Kad osovina kormila prolazi kroz hvatište sile kormila, kormilo je potpuno izbalansirano. Iz toka krivulja x/l se vidi da nije moguće postići izbalansiranost kormila za sve kutove. Pri tom su povoljniji deblji profili, jer je za njih tok krivulje x/l u većem području kutova gotovo konstantan. Obično se kormila projektiraju tako da budu izbalansirana kad im je kut 15° , pa je stoga potrebno da se $\sim 20 \dots 25\%$ površine kormila nalazi ispred osovine kormila.

Uspoređivanjem kormila koja su imala različit oblik središnje ravnine ali jednaku površinu, jednaki omjer h^2/A_R i jednaki odnos dimenzija profila, došlo se do zaključka da oblik središnje ravnine nema gotovo nikakav utjecaj na veličinu uzgona i vrlo mali utjecaj na položaj hvatišta sile kormila.



Sl. 31. Vrijednosti C_L i x/l za simetrične profile



Sl. 32. Vrijednosti C_D za simetrične profile

Rezultati ispitivanja modela broda s kormilom. Sila kormila koje se nalazi u svome stvarnom položaju, tj. po krmi modela broda, razlikuje se od sile kormila u slobodnoj vožnji. Uslijed sustrujanja smanjuje se brzina strujanja vode u odnosu na kormilo, pa se i sila kormila smanjuje. Vijčani mlaz ima suprotan utjecaj, on povećava brzinu strujanja, dakle i silu kormila. O odnosu ovih utjecaja ovisi da li će sila kormila po krmi modela broda biti veća ili manja od sile kormila u slobodnoj vožnji. Osim toga, zbog oblika stražnjeg dijela broda, kut pod kojim voda struji prema kormilu nije identičan s kutom kormila. Svi ovi utjecaji mogu se obuhvatiti s pomoću koeficijenta.

Postoji nekoliko načina ispitivanja modela broda s kormilom. Najjednostavniji i najrasprostranjeniji je način da se model broda s vlastitim pogonom prisilno drži u pravcu dok je kormilo zakrenuto za izvjestan kut. Ovom vrstom ispitivanja određuju se tzv. početna svojstva kormilarenja, tj. sila i moment kormila broda i moment zakretanja broda u trenutku neposredno nakon zakretanja kormila. Na temelju ispitivanja početnih svojstava kormilarenja sa jednovijčanim i dvovijčanim modelima brodova stvoreni su ovi zaključci:

Kormilo *jednovijčanih brodova* izloženo je u punoj mjeri djelovanju sustrujanja i vijčanog mlaza. Međutim, koliko se zbog utjecaja sustrujanja sila kormila umanjuje toliko se zbog utjecaja mlaza povećava, tako da se ova dva utjecaja međusobno poništavaju.

Sam oblik središnje ravnine kormila (nezavisno od površine kormila i omjera h^2/A_R) ima relativno malen utjecaj na veličinu sile kormila, osim u slučaju kad se gornji rub kormila prilagodi obliku krstaške krme i time povećava silu kormila. Radi jednostavnije izvedbe moderna strujna kormila imaju obično pravokutan oblik.

Oblik horizontalnog presjeka strujnih kormila ne igra gotovo nikakvu ulogu u pogledu veličine zakretnog momenta broda. Čak i kormila u obliku ploče nisu u tom pogledu mnogo gora od strujnih. Međutim, prednost strujnih kormila pred kormilima u obliku ploče je očita u pogledu otpora i propulzije. Oblik horizontalnog presjeka strujnih kormila ima utjecaj na propulzijski stepen djelovanja i na moment kormila s obzirom na njegovu osovinu. Balansno kormilo ima znatno manji moment s obzirom na osovinu nego kormilo sa fiksnom statvom, pa je za zakretanje balansnog kormila potrebna i manja sila.

Oblik krme ima znatan utjecaj na veličinu zakretnog momenta broda. Zakretni je moment broda koji ima normalnu krstašku krmu za 25% veći od zakretnog momenta broda s elipsastom krmom. Da bi se postigao što veći zakretni moment broda, treba što više smanjiti otvore na krmi (raspor između statve i kormila, otvor za vijak).

Promjena punoće forme (prizmatičkog koeficijenta) nema nekog znatnijeg utjecaja na veličinu sile kormila, dakle ni na veličinu zakretnog momenta broda. Izgleda da je u svakom slučaju utjecaj sustrujanja kompenziran utjecajem vijčanog mlaza.

Utjecaj vijčanog mlaza *dvovijčanih brodova s jednim kormilom* ne može poništiti nepovoljan utjecaj sustrujanja. Kormilo je tih brodova u većem dijelu područja kutova van domašaja vijčanog mlaza, zbog čega su (uz ostale jednake uvjete) ti brodovi u pogledu kormilarenja lošiji od jednovijčanih brodova ili dvovijčanih brodova sa dva kormila. Tako su npr. ispitivanja provedena na jednom modelu broda pokazala da se koeficijent normalne sile zbog utjecaja sustrujanja smanjuje za 20%, a uslijed djelovanja vijčanog mlaza povećava za 10%, tako da je koeficijent normalne sile kormila smještenog na modelu broda s dva vijka za oko 10% manji od koeficijenta normalne sile kormila u slobodnoj vožnji.

Oblik središnje ravnine kormila općenito je od male važnosti jer vijčani mlaz djeluje na kormilo tek kad je kut kormila velik. U pogledu oblika horizontalnih presjeka kormila poželjno je da forma kormila čini nastavak vodenih linija krme broda. Otvori između kormila i krme broda imaju nepovoljan utjecaj na veličinu zakretnog momenta broda. Punoća forme ima izvjestan utjecaj na veličinu zaokretnog momenta. Kad je forma vitkija, zakretni moment je manji jer voda pritječe kormilu pod manjim kutom.

Položaj vijaka po dužini broda također utječe na veličinu zakretnog momenta. Preporuča se da vijci budu udaljeni bar za $0,75 D \dots 1,00 D$ (D je promjer vijka) ispred prednjeg ruba kormila. Pri tom središta osovinu vijaka ne smiju biti suviše udaljena od

središnje ravnine broda, jer se time smanjuje djelovanje vijčanog mlaza uz veće kutove kormila.

Sila i moment kormila dvovijčanog broda i zakretni moment takvog broda veći su kad se vijci okreću prema unutra nego kad se okreću prema vani. Sa stanovišta propulzije okretanju vijaka prema unutra također nema zamjerke. U pogledu kormilarenja za vrijeme plovidbe nema razlike između vijaka koji se okreću prema unutra i vijaka koji se okreću prema vani, ali sa stanovišta manevriranja na mjestu, brodovi kojima se vijci okreću prema unutra pokazuju očite nedostatke, pa se stoga vijci dvovijčanih brodova okreću prema van.

U slučaju kad je zakretni moment dvovijčanog broda s jednim kormilom premalen, tj. kad takav brod nema zadovoljavajuću pokretljivost, postavlja se iza svakog vijka po jedno kormilo, čime se u punoj mjeri iskorištava djelovanje vijčanog mlaza i znatno povećava zakretni moment broda. Tako se dobivaju *dvovijčani brodovi s dva kormila*. Jedini prigovor upotrebi dvaju kormila u tom slučaju jest opasnost od otkidanja strujanja već kod malih kutova kormila (25°). Pojava otkidanja može se izbjeći ako se kormila smjeste simetrično s obzirom na površinu vijčanog kruga ili ako se kormila smjeste iza fiksnih statvi.

Neki podaci za projektiranje kormila. Na temelju ispitivanja modela brodova, pokusnih vožnji i iskustva došlo se do stanovitih podataka koji se primjenjuju pri projektiranju kormila.

Veličina površine kormila ovisi o tipu i namjeni broda. Remorkeri, riječni brodovi, ledolomci i peljarski brodovi imaju veća kormila a često i veći maksimalni kut zakreta kormila nego normalni morskog trgovački brodovi. Ratni brodovi imaju veća kormila od trgovačkih.

I tip kormila ovisi o tipu broda. Brodovi koji mnogo manevriraju i često voze krmom moraju imati i u takvoj vožnji dobra kormilarska svojstva. Obično plosno kormilo djeluje relativno slabo u vožnji krmom. Strujno kormilo je povoljnije, a najbolje djelovanje se postiže strujnim kormilom s krilcem. U specijalnim slučajevima kormilarska svojstva broda se poboljšavaju i posebnim rješenjima kormilarskog uređaja. Tako npr. ledolomci često imaju i pramčano kormilo. U novije vrijeme na velike morske brodove od kojih se zahtijeva naročita manevrabilnost ugrađuje se u pramcu posebni mlazni ili cikloidni propeler. Taj propeler služi kao kormilo i znatno poboljšava kormilarska svojstva broda. Na riječnim brodovima i tegljačima sve se češće primjenjuje Kortova sapnica-kormilo, jer je za kormilarenje znatno efikasnija nego sistem sa fiksnom sapnicom i odvojenim kormilom. Kormila jednovijčanih brodova su obično strujna, balansna ili iza fiksne statve. Oblik kormila je većinom pravokutan. Visina kormila je određena gazom, a poželjno je da se kormilo proteže bar preko promjera vijka. U tablici 1 navedeni su prosječni omjeri glavnih dimenzija strujnih kormila jednovijčanih brodova. Površina kormila A_R uzima se obično kao stanoviti postotak produkta dužine broda L i gaza T .

Tablica 1
PROSJEČNI OMJERI GLAVNIH DIMENZIJA STRUJNIH KORMILA
JEDNOVIJČANIH BRODOVA

Tip broda	A_R % od $L \cdot T$	$\frac{h}{l}$	$\frac{l}{t}$	d % od l
Teretni i putnički brodovi	1,74	1,82	5,7	25
Obalni brodovi (balansna kormila)	2,30	1,16	6,0	21
Obalni brodovi (kormila sa fiksnom statvom strujnog oblika)	3,00	1,04	5,7	27,5
Tegljači i pilotski brodovi	3,30	1,79	5,4	26

Na temelju ispitivanja modela brodova Baker i Bottomley daju formulu za normalnu silu kormila koja se može pisati:

$$F_n = k A_R V^2 \varrho,$$

gdje je k koeficijent ovisan o tipu i kutu kormila; A_R površina kormila; V brzina broda. U tablici 2 dane su vrijednosti koeficijenta

Tablica 2
VRIJEDNOSTI k I $\frac{x}{l}$ ZA JEDNOVIJČANI BROD SA STRUJNIM
KORMILOM IZA STATVE

Kut kormila u stupnjevima	10	20	30	35
$k \cdot 10^4$	23,6	50,4	74,0	80,9
x/l	0,26	0,27	0,35	0,39

ta k i omjera x/l za različite kutove kormila jednovijčanih brodova sa strujnim kormilom iza statve.

Kormila dvovijčanih brodova su obično nebalansna ili polubalansna. Otvore ispred kormila treba svesti na najmanju moguću mjeru. Debljina i oblik horizontalnog presjeka kormila moraju biti u skladu sa vodnim linijama krme, tako da kormilo predstavlja zapravo njihov završetak. Kad su potrebne velike sile kormila, uzimaju se dva kormila. U tablici 3 navedeni su prosječni omjeri glavnih dimenzija strujnih kormila dvovijčanih brodova.

Tablica 3

PROSJEČNI OMJERI GLAVNIH DIMENZIJA STRUJNIH KORMILA DVOVIJČANIH BRODOVA

Tip kormila	A % od $L \cdot T$	$\frac{h}{l}$	$\frac{l}{t}$
Nebalansno kormilo uz statvu	1,7	1,52	6,2
Polubalansno kormilo	1,7	1,11	10,8
Uredaji s dva kormila	2,1	2,22	4,9

Sila kormila može se također izračunati s pomoću Baker-Bot-temleyeve formule. Koeficijenti k za dvovijčane brodove dani su u tablici 4.

Tablica 4

VRIJEDNOSTI k ZA DVOVIJČANE BRODOVE

Kut kormila u stupnjevima $k \cdot 10^3$	10	15	20	30	35
	8,4	13,6	19,4	31,5	36,2

Za proračun normalne sile kormila jednovijčanih i dvovijčanih brodova mogu se upotrijebiti i rezultati ispitivanja kormila u slobodnoj vožnji (sl. 7 i 8). Te rezultate treba korigirati za omjer h/l i za utjecaj sustrujanja i vijčanog mlaza.

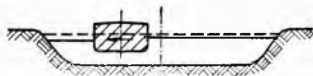
Kad je kormilo jednovijčanih brodova sa desnovojnim propelerom u središnjem položaju, postoji tendencija da brod skreće pramacem ulijevo. Da bi se brod održao u ravnom kursu, treba zakrenuti kormilo za $2 \dots 3^\circ$ udesno. (Za brod sa lijevovojnim propelerom vrijedi obratno.) Do ove pojave dolazi uslijed toga što na gornjem dijelu lijeve strane kormila voda struji pod većim kutom prema kormilu nego na donjem dijelu desne strane kormila.

Dvovijčani brodovi nemaju te tendencije jer je jedan vijak desnovojan a drugi lijevojojan.

Upravljanje brodom u ograničenim vodama

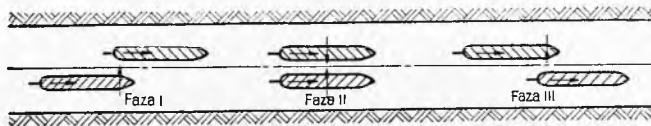
Pri plovidbi u vodama ograničene dubine i širine (kanalima, rijekama, prolazima) potreban je naročit oprez u pogledu upravljanja brodom. Uslijed različitog povećanja brzine strujanja vode koja prolazi između obala, dna i broda, dolazi do različite raspodjele pritiska na uronjenoj površini broda. Zbog različite raspodjele pritiska stvaraju se sile koje djeluju na brod i otežavaju kormilarenje. Do većih promjena pritiska dolazi kod brodova koji imaju nagli prijelaz linija pramca i krme u paralelni srednjak. Da bi se dobila dobra kormilarska svojstva brodova koji saobraćaju u ograničenim vodama, poželjno je da njihove vertikale budu punije na pramcu i krmi i da imaju postepeni prijelaz u paralelni srednjak.

Kada brod plovi izvan sredine kanala, dolazi do većeg povećanja brzine strujanja vode s one strane broda koja je bliže obali nego sa suprotne strane. Budući da je povećanje brzine praćeno smanjenjem pritiska i padom razine vode, pad razine vode veći je na onoj strani broda koja je bliža obali nego na suprotnoj strani, uslijed čega na brod djeluje sila koja ga gura prema bližoj obali (sl. 33). Ako se želi vratiti brod u sredinu kanala, ne smije se to učiniti primjenom velikog kuta kormila. Naime, na skretanje kormila brod najprije reagira pomicanjem krme prema bližoj obali, pa bi preveliki kutovi kormila izazvali preveliko pomicanje krme prema bližoj obali, uslijed čega bi se još više povećala sila koja gura brod prema toj obali. Uspješno vraćanje broda u sredinu kanala može se postići smanjenjem brzine i primjenom umjerenih kutova kormila.



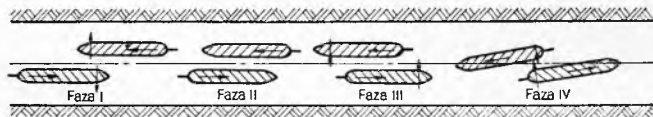
Sl. 33. Plovidba izvan sredine kanala

Slično nesimetrično opstrujavanje broda nastaje i na plitkoj vodi kosog dna. Skošeno dno i malena dubina vode kompliciraju raspodjelu pritiska duž broskog trupa i kormila, pa za svaki brod postoje neki određeni uvjeti u kojima brod uopće ne sluša kormilo. To kritično stanje obično nastaje u slučaju kad je voda relativno vrlo plitka, kosina dna veća od 20° , a brzina broda niska.



Sl. 34. Preticanje brodova u kanalu

Kad se pretječu brodovi u kanalu, nailaze pramčani val i podignuta razina vode na pramcu broda koji vrši pretjecanje na nižu razinu vode po krmi pretjecanog broda, uslijed čega dolazi do privlačenja brodova (sl. 34, faza I). Kada se pri pretjecanju brodovi nalaze jedan pokraj drugoga, razina vode između brodova osjetno padne, uslijed čega se brodovi privlače i naginju jedan prema drugome (faza II). Kad krma broda koji vrši pretjecanje prolazi pokraj pramca pretjecanog broda, brodovi se i dalje privlače, iako u manjoj mjeri (faza III).



Sl. 35. Mimoilaženje brodova u kanalu

Kad se brodovi u kanalu mimoilaze, najprije se susreću njihovi pramci. Između pramaca dolazi do superpozicije pramčanih valova koji razmiču pramce (sl. 35, faza I). Nešto prije nego se brodovi nalaze jedan uz drugoga padovi razine vode se izjednače i nema opasnosti od sudara (faza II). Kad su se brodovi djelomično mimoišli, pramci im se gibaju prema sredini kanala jer podignuta razina na pramcu jednog broda nailazi na pad razine po krmi drugog broda (faza III). Pri mimoilaženju krma dolazi do superpozicije padova razine, uslijed čega se krme privlače. U tom trenutku je opasnost od sudara najveća (faza IV).

Neugodne pojave koje se javljaju pri plovidbi u kanalima mogu se osjetno smanjiti smanjenjem brzine brodova.

M. Molnar

PONAŠANJE BRODA NA VALOVIMA

Kad pomorac kaže da brod ima dobra maritimna (pomorska) svojstva, on time obuhvaća čitav kompleks predodžbi, kao npr. da brod ima dovoljan stabilitet, da su njegova oscilatorna gibanja na uzburkanom moru umjerena, da se pri plovidbi na valovima more ne prelijeva preko njegove palube, da se njime dobro kormilari, da mu se brzina na uzburkanom moru znatnije ne smanjuje itd. Proračunom ponašanja broda na valovima treba odrediti kriterij dobrih pomorskih svojstava, tj. neke granične veličine koje se ne smiju prekoračiti a da brod ne dođe u opasnost, a to su: kut nagiba uz koji se brod prevrće ili uz koji se teret počinje pomicati, gibanja broda uz koja ili dolazi do prelijevanja mora preko palube, ili akceleracije postaju prevelike, ili brod izranja iz mora i udara o valove, ili propeler izranja iz vode itd. Stabilitet, otpor, kormilarska svojstva i opterećenja kojima je izvrnuta brodska konstrukcija mijenjaju se na uzburkanom moru, pa zbog toga proračuni vršeni za brod na mirnoj vodi ne mogu dati stvarnu sliku njegova ponašanja u eksploataciji, nego samo podlogu za uspoređivanje. Opće je poznata činjenica da se ne samo povećava otpor broda na valovima nego i oscilatorna gibanja broda mogu na uzburkanom moru postati tako čestoka da je neophodno smanjiti brzinu broda kako bi se izbjegle pretjerane akceleracije, uronjavanje pramca u valove i lupanje broda o valove, što bi sve imalo za posljedicu neugodan ili čak nemoguć boravak na brodu i oštećenja brodske konstrukcije i opreme. Ovakvo samo djelomično iskorištavanje raspoložive pune snage stroja dolazi naročito do izražaja danas, kad su brzine brodova velike i kad atomski pogon pruža mogućnost daljeg povećanja brzine,