

Utjecaj brodske forme i rasporeda težina na gibanje broda na valovima. Veličina amplituda gibanja broda ovisi o faktoru uveličanja i o silama uzbude. Prema sl. 16 faktor uveličanja poprima maksimalne vrijednosti u slučaju rezonancije, kad se perioda T_s vlastitog gibanja broda poklapa s relativnom periodom $T_E = 2\pi/\omega_E$. Da bi se odredio uvjet rezonancije za pojedina gibanja ($T_s = T_E$), treba osim relativne periode vala

$$T_E = \frac{2\pi}{\omega \left(1 - \frac{V}{c} \cos \alpha\right)}$$

izračunati i periodu vlastitog titranja broda za to gibanje. Kako je

$$T_s = 2\sqrt{\frac{m_s}{B_s}},$$

dobivaju se vlastite periode pojedinih gibanja ako se uvrste odgovarajući izrazi za m_s (masu broda + dodatnu masu okolne vode) i B_s (koeficijent povratne sile). Za ljujanje proizlazi:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_\varphi + m_\varphi}{\Delta \cdot M_0 G}} = \frac{2i\pi}{\sqrt{g M_0 G}},$$

gdje je i radijus tromosti tzv. virtualne mase u koju se uključuje i dodatna masa. U približnim proračunima uzima se $i = k B$, gdje koeficijent k ima vrijednosti od 0,38 do 0,43.

Za posrtanje:

$$T_\varphi = 2\pi \sqrt{\frac{I_\varphi + m_\varphi}{\Delta \cdot M_L G}},$$

za poniranje:

$$T_z = 2\pi \sqrt{\frac{\Delta/g + m_z}{A_w \gamma}} \approx 2\pi \sqrt{\frac{1,8 \delta \cdot T}{g \alpha}}.$$

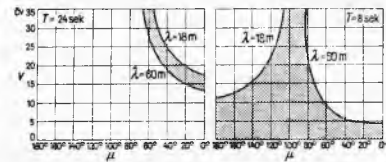
Kako je perioda ljujanja obično veća od periode valova, brod se nalazi u natkritičnom području dijagrama na sl. 16. Brod će biti to udaljeniji od područja rezonancije i to manje će biti amplitude ljujanja što je veće T_φ , odnosno što je manja početna metacentarska visina $M_0 G$ i što je veći moment tromosti mase broda, a to se postiže smještajem težina prema bokovima broda i velikim odnosom L/B . Za ljujanje broda naročito su opasni valovi koji dolaze koso sa krme, jer je njihova relativna perioda duža za približava brod kritičnom području. U slučaju rezonancije, koja se ne može uvijek izbjeći na nepravilnom moru, važno je prigušivanje gibanja. S većim prigušivanjem znatno padaju faktori uveličanja i amplitude gibanja (v. sl. 16), što ukazuje na važnost ljujnih kobilica.

Prividne periode poniranja i posrtanja broda redovno su manje od periode valova (potkritično područje dijagrama na sl. 16), pa će se brod nalaziti to dalje od područja rezonancije što su manje vlastite periode tih gibanja. To se postiže velikom uzdužnom metacentarskom visinom $M_L G$, malim uzdužnim momentom tromosti mase broda (težine smjestiti što više prema glavnom rebru), velikim koeficijentom plovnosti linije, niskim koeficijentom istisnine δ i malim odnosom T/L . Za posrtanje i poniranje naročito su neugodni valovi koji nadolaze u pramac, jer se njihova prividna perioda skraćuje pa približavaju brod području rezonancije. Kako se pri tom još i prigušivanje gibanja smanjuje (prigušivanje posrtanja i poniranja pada s porastom frekvencije oscilatornog gibanja), često nastupaju tako žestoka gibanja broda da se mora smanjiti brzina broda (na taj način se opet produžava prividna perioda valova) ili promijeniti njegov kurs.

U slučaju velikih brzina, preko 60 čv, koje se danas još ne mogu postići deplasmanskim brodovima, brod bi prešao u natkritično područje, pa bi se s većim brzinama, tj. s većim frekvencijama ω_E , amplitude posrtanja i poniranja smanjivale.

Kad su amplitude poniranja i posrtanja broda velike, dolazi do naročito neugodne pojave koja se zove lupanje (engl. slamming). Pod tim izrazom podrazumijeva se naglo udaranje pojedinih dijelova broda, a naročito pramca, o vodene mase. Na taj način ne samo da je oplata prednjeg dijela broda izvrgnuta kratkotrajnom ali velikom hidrodinamičkom pritisku, koji može prouzrokovati oštećenje oplata dna, nego se ti žestoki udarci prenose na cijelu

brodsku konstrukciju, uzrokujući vibracije i dodatna naprezanja. S fizičkog stanovišta udaranje broda je identično s hidrodinamičkim udarom, tj. naglim djelovanjem hidrodinamičkih sila na brod, a teorijski se je nastojalo buhvatiti određivanjem akceleracije gibanja i promjene dodatne mase kao funkcije vremena. Mjerenjem se je ustanovilo da pri lupanju dolazi do nagle promjene akceleracije gibanja, dok se brzine i amplitude mnogo ne mijenjaju. Za lupanje su mjerodavni: izronjavanje pramčanog dijela broda iz mora, pomak faze između gibanja broda i gibanja valova, relativna brzina gibanja broda u odnosu na gibanje valova. Što su ti faktori veći, lupanje je snažnije. Lupanje je to manje što je finija forma broda (veći odnos L/B , V-forma pramčanih rebara)



Sl. 20. Područje rezonancije za dva broda

i što je veći gaz. Pomoću uslova za rezonanciju $T_s = T_E$ i navedenih formula mogu se konstruirati dijagrami koji daju područje rezonancije za pojedina gibanja broda u ovisnosti o dužini vala, o brzini broda i o njegovom kursu. Na sl. 20 prikazana su dva takva dijagrama za ljujanje broda. Prvi vrijedi za brod s velikom periodom vlastitog titranja, $T = 24$ sek.: područje rezonancije je maleno, brod će rijetko doći u njega i lako će ga izbjeći manjim promjenama brzine ili kursa. Drugi dijagram vrijedi za brod s kratkom periodom titranja, $T = 8$ sek. Takav brod će, kako prikazuje dijagram, jedva moći izbjeći rezonanciji, pa će amplitude njegovog ljujanja biti znatno veće nego broda s većom periodom ljujanja.

Amplitude gibanja broda ne ovise samo o faktoru uveličanja nego i o omjeru maksimalne vrijednosti sile uzbude i koeficijenta povratne sile F_{sm}/B . Obje te vrijednosti ovise o formi broda, a sile uzbude još i o dimenzijama valova. Za valjanje broda neugodni su valovi s velikim odnosom h_w/λ zbog svoje velike strmine. Za poniranje i posrtanje sila uzbude ovisi o omjeru dužine vala naprama dužini broda λ/L i postiže maksimalne vrijednosti za odnos $\lambda/L = 1 \dots 2$. Promjena glavnih dimenzija i forme broda ne utječe samo na veličinu rezonantne frekvencije nego i na povratne sile, sile prigušivanja i sile uzbude, dakle na sve faktore koji utječu na njegovo gibanje. Teško je dati neke općenite zaključke o tome kako određena promjena u dimenzijama ili formi broda utječe na njegovo ponašanje na valovima, jer još uvijek nema zato dovoljno podataka.

STABILIZIRANJE BRODA

Pod stabiliziranjem broda razumijeva se prigušivanje ljujanja, a eventualno i posrtanja broda pomoću posebnih naprava, tzv. stabilizatora. Pomoću stabilizatora djeluje se na brod samo jednim zakretnim momentom, pa se ne mogu spriječiti linearna gibanja, niti orbitalno gibanje broda po kružnim putanjama koje on izvodi na valovima kao i čestice vode koja ga okružuje. Kako zaošijanje broda kontrolira automatski giropilot, ostaje samo da se utječe na ostala dva rotacijska gibanja: ljujanje i posrtanje. Svi do danas izvedeni uređaji za stabiliziranje sprečavaju samo ljujanje broda. Uslijed dugoljaste brodske forme, ljujanje dolazi više do izražaja nego posrtanje, i za prigušivanje ljujanja potrebne su manje sile nego za prigušivanje posrtanja, pa su prema tome i odgovarajući uređaji mnogo lakši i zapremaju manje prostora, a sile koje razvija stabilizator može preuzeti brodska konstrukcija bez znatnijih pojačanja. Međutim, i samo stabiliziranje ljujanja donosi velike prednosti, smanjuje morskbu bolest putnika i posade, sprečava prebacivanje tereta i ugrožavanje stabiliteta, poboljšava održavanje kursa, omogućava držanje palube u horizontalnom položaju, što na ratnim brodovima olakšava posluživanje oružja i spuštanje aviona.

Problem stabiliziranja postao je aktuelan u brodogradnji kad je uveden parni stroj za pogon brodova, jer je nestankom jedara nestala i jedna velika stabilizirajuća površina. Logički je bilo da se gubitak tih površina nadoknadi nadogradnjom analognih manjih površina ispod vode. Tako su nastale ljujne

kobilice. Njihovu efikasnost i najpovoljniji položaj na podvodnom dijelu brodskog trupa ispitivao je 1870 na brodovima i modelima W. Froude i na osnovu toga razvio teoriju njihova djelovanja. Ljuljne kobilice samo povećavaju otpor koji brodska forma pruža nagibanju; efikasnije stabiliziranje nastojalo se oko 1874 postići vodnim komorama koje proizvode zakretne momente suprotne prekretnim momentima od valova. Problem vodnih komora obradio je teorijski i eksperimentalno na modelima I. G. Bubnov. Vodne komore se nisu održale ni na ratnim ni na trgovačkim brodovima jer njihovo djelovanje nije bilo dovoljno da se opravda brodski prostor koji su zauzimale. Oko 1910 H. Frahm je modificirao vodne komore tako da im je dao oblik U-cijevi sa vertikalnim krakovima širim od horizontalnog. S tim tipom vodnih komora postignut je stanovit uspjeh u praksi.

O. Schlick je 1904 izvršio pionirski rad na stabilizaciji pomoću periodski djelujućih momenata proizvedenih od zvrka ili giroskopa koji je montiran na brod tako da mu je omogućeno precesijsko gibanje. Usprkos nekoliko uspješnih izvedbi na brodovima njemačke ratne i trgovačke mornarice, giroskop nije mogao konkurirati protuljulnim tankovima zbog svoje veće težine (1,5% deplasmama), velike cijene i velike snage potrebne za pogon. Ubrzo se je uvidjelo da tipovi stabilizatora kao što su Frahmov tank i Schlickov giroskop u stanovitim slučajevima čak i povećavaju nagibe broda umjesto da ih smanjuju. Zbog toga je napušten pasivni tip stabilizatora i uvedeni su za vrijeme Prvoga svjetskog rata i između ratova aktivirani stabilizatori, čijim se gibanjem upravlja pomoću vanjskog izvora energije u skladu s impulsima dobivenim od gibanja broda: Siemensov protuljulni tank u kojemu se razina vode pomiče pomoću puhalu i Sperryjev giroskop kojemu se okvir pomiče pomoću elektromotora.

Kad se na talijanskom transatlantiku «Conte di Savoia» pokazalo da učinak uređaja sa tri giroskopa ne opravdava njegovu veliku težinu, glomaznost i velike pogonske snage, taj je tip stabilizatora zamijenjen suvremenijim stabilizatorom sa prekretnim perajicama. U principu su taj uređaj za stabiliziranje patentirali već 1898 Wilson i Stirling, ali prve brodove koji su se služili aktiviranim perajicama sagradio je u Japanu Motora 1925. Premda ispravno zamišljeni, oni nisu ipak imali uspjeha zbog nesavršene regulacije. 1936 W. Wallace je patentirao današnju izvedbu, koja se osniva na ideji Wilsona i konstrukciji Motore, samo što je iskoristio modernu giroregulaciju s elektrohidrauličkim mehanizmom za prekratanje i uvlačenje perajica. Taj projekt su usavršili brodograditelji W. Denny i strojarski inženjer Brown. Usprkos velikom radu povećanom perajičnim stabilizatorima, oni su se vrlo teško probili do današnjeg uspjeha. Poboљšanom konstrukcijom uspjelo je ukloniti početne nedostatke, pa perajični stabilizatori predstavljaju danas najčešći tip stabilizatora na velikim putničkim brodovima.

Osnovi stabiliziranja. Uslijed orbitalnog gibanja broda na valovima na njega stalno djeluje centrifugalna sila. Rezultantne sile teže i centrifugalne sile daje smjer tzv. prividne okomice rotirajućeg sistema, koja je smjer prostog pada svih tijela u tom sistemu. To se može pokazati pomoću tri jednostavna modela na pravilnim valovima (sl. 1). Na cilindar je učvršćena posuda s vodom. Za vrijeme prolaza vala dno posude ostaje horizontalno, ali se voda ipak prolje, jer se njena razina postavlja okomito na prividnu okomicu, tj. uvijek paralelno s momentanom razinom vala. Ako je posuda na maloj splavi, onda su na valu splav, dno posude i razina vode u posudi stalno paralelni s kosinom vala, pa se voda neće proliti. U trećem slučaju posuda je montirana na štap koji je tako otežan da pluta uspravno. Na valu se štap postavlja u smjer slojeva tekućine pa se naginje na istu stranu kao i razina vode u posudi, što još više olakšava njeno prelijevanje nego u slučaju cilindra. Ako se izostavi ovaj treći slučaj kao potpuno nepodesan, može se nastojati pomoću stabilizatora postići da brod na valovima plovi ili kao cilindar, tj. da mu je paluba uvijek horizontalna, ili kao splav, tj. da mu je paluba uvijek paralelna s kosinom vala. Prvi slučaj je zvan *horizontaliziranje*. Horizontalnost palube je prednost, ali na sve predmete takvog sistema djeluju poprečne sile i oni moraju biti učvršćeni, inače se pomiču. Drugi slučaj, koji se zove *stabiliziranje*, postavlja brod uvijek u momentanu prividnu okomicu sistema, paluba stalno mijenja svoj nagib prema horizontali, ali na takav sistem ne djeluju poprečne sile, svi predmeti u njemu ostaju na svojem mjestu, makar bili i neučvršćeni.

Svako tijelo koje plovi na valovima nalazi se pod utjecajem sila triju sistema. Prvi sistem, S I, okarakteriziran cilindrom, sistem je statičke ravnoteže, drugi sistem, S II, okarakteriziran malom splavi, sistem je dinamičke ravnoteže, a treći sistem, S III, koji je predstavljen štapom što vertikalno pliva, sistem je

supstancije. Uslijed inercije nastoji brod ostati u sistemu S I, njegov moment statičkog stabiliteta sili ga da se kreće sa sistemom S II jer ga postavlja uvijek u smjer nagiba vala, a otpor vode povlači ga u sistem S III. Brod s neizmjerljivo velikim momentom tromosti mase kretao bi se pod utjecajem valova uvijek u sistemu S I, a brod s neizmjerljivo velikom metacentarskom visinom kretao bi se uvijek u sistemu S II. Na tijela koja plivaju na površini tekućine djelovanje sila sistema S III je neznatno u poređenju s djelovanjem sila sistema S I i S II, ali to djelovanje postaje mjerodavno kad su tijela potpuno uronjena, kao što su to podmornice ili visoke i tanke ribe, koje plivaju u slojevima supstancije (sistema S III).

Tijelo čija je metacentarska visina jednaka nuli kretat će se uvijek u sistemu S I (ako se zanemare sile otpora vode kao malene spram sila inercije) jer ne postoje sile koje bi ga vracale u sistem S II. Analogno će se tijelo koje ima moment tromosti mase jednak nuli kretati u sistemu S II, jer ne postoje sile inercije koje bi ga silile u sistem S I. Prema tome je karakteristika broda koji se kreće u sistemu S I (horizontaliziranje):

$$\frac{M_0 G}{I_\varphi} = 0,$$

a karakteristika broda koji se kreće u sistemu S II (stabiliziranje):

$$\frac{I_\varphi}{M_0 G} = 0.$$

Kao karakteristična jednadžba ljuľanja broda na valovima može se napisati:

$$M_1 + M_2 + M_3 = 0,$$

gdje M_1 predstavlja momente sila sistema S I (silā inercije), M_2 momente sila sistema S II (povratnih silā i silā uzbude), a M_3 momente sila sistema S III (silā otpora). Ako se u tu jednadžbu uvrste odgovarajuće vrijednosti za njene pojedine članove, dobiva se diferencijalna jednadžba ljuľanja broda na valovima. Da bi se stabilizirao brod, na njega se djeluje još jednim momentom M_4 , koji proizvodi stabilizator, pa jednadžba gibanja broda sa stabilizatorom glasi:

$$M_1 + M_2 + M_3 + M_4 = 0.$$

U slučaju horizontaliziranja mora stabilizator djelovati tako da uvijek bude $M_2 + M_3 = -M_4$. Kao jednadžba gibanja broda preostaje onda $M_1 = 0$. Kako je $M_1 = I_\varphi \cdot \varphi_1$, to znači da je kut nagiba broda prema horizontali u svakom trenutku $\varphi_1 = 0$, dakle brod ostaje u sistemu S I. U slučaju stabiliziranja mora stabilizator proizvesti momente $M_4 = -(M_1 + M_3)$, tako da bude $M_2 = 0$. Kako je: $M_2 = \Delta \cdot M_0 G \cdot \widehat{\varphi}_2$, kut nagiba broda prema kosini vala je $\varphi_2 = 0$, tj. brod se kreće u sistemu S II. Budući da se momenti M_1 , M_2 i M_3 mijenjaju u ovisnosti o vremenu, treba ih pomoću posebnih instrumenata stalno mjeriti i na osnovu toga automatski upravljati stabilizatorom.

Da li će se stabilizator podesiti na horizontaliziranje ili stabiliziranje, ovisi o konkretnom slučaju. Horizontaliziranje će se primijeniti kad se zahtijeva horizontalna paluba, kao npr. na ratnim brodovima, na teretnim brodovima pri prekrcavanju tereta na otvorenom moru, na putničkim brodovima kad se želi promatrati okolina. Stabiliziranje će se dati prednost na teretnim brodovima za vrijeme plovidbe, da ne dođe do presipavanja te-

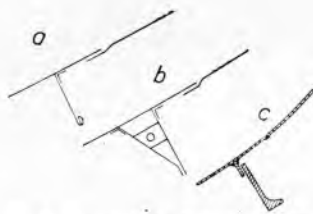
Tablica 1
PREGLED LOGIČKI MOGUĆIH NAČINA STABILIZIRANJA

Oznaka	Način rada	Mogućnost praktične realizacije
111	Akceleracija unutarnje čvrste mase	Zamašnjak ili giroskop
112	Akceleracija unutarnje tekuće mase	Zatvoreni tank s tekućinom
121	Akceleracija vanjske čvrste mase	Praktična realizacija teška
122	Akceleracija vanjske tekuće mase	Ljuljne kobilice, perajice, pro-pelari
211	Pomaci unutarnje čvrste mase	Težina čija putanja prolazi kroz centar rotacije
212	Pomaci unutarnje tekuće mase	U-cijevni tankovi određenog oblika
221	Pomaci vanjske čvrste mase	Praktična realizacija teška
222	Pomaci vanjske tekuće mase	Praktična realizacija teška

reta, i na putničkim brodovima noću i za vrijeme obroka, da se može spavati i jesti kao na kopnu. Općenito će se stabiliziranje primijeniti kad su valovi dugi i pravilni (mrtvo more), a horizontaliziranje kad su nepravilni i ukrižani (uzburkano more).

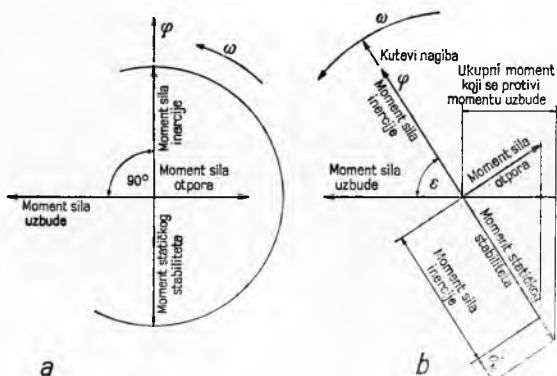
Prekretni momenti M_4 kojima stabilizator djeluje na brod mogu se proizvesti pokretanjem masa. Već prema tome da li se prekretni momenti dobivaju ubrzanjem ili pomakom masa i da li je ta masa tekuća ili čvrsta, odnosno da li je smještena unutar ili izvan broda, logički je moguće zamisliti osam načina elementarnog stabiliziranja, kao što je to predočeno u tablici 1. Osim elementarnog načina moguć je i složeni način stabiliziranja, sastavljen od više elementarnih.

Ljuljne kobilice. Da bi se smanjilo ljuljanje broda na valovima, najjednostavnije je, premda ne i najefikasnije, da se povećava otpor koji pruža forma broda njegovom nakretanju. To se postiže fiksnim perajicama ugrađenim na uzvoju broda (sl. 2). Visina perajice je 25...90 cm (visina je ograničena, jer perajica ne smije sezati izvan broda, logički je moguće zamisliti osam načina elementarnog stabiliziranja, kao što je to predočeno u tablici 1. Osim elementarnog načina moguć je i složeni način stabiliziranja, sastavljen od više elementarnih.



Sl. 2. Konstrukcija ljuljnih kobilica

Djelovanje ljuljnih kobilica može se najbolje uočiti ako se momenti koji djeluju na brod predoče vektorski, prema sl. 3.



Sl. 3. Djelovanje ljuljnih kobilica

Svaki moment predočen je vektorom čija je dužina proporcionalna maksimalnoj vrijednosti dotičnog momenta. Taj vektor rotira s konstantnom kutnom brzinom (kružnom frekvencijom) ω u naznačenom smislu. Vrijednost momenta u svakom trenutku dobiva se kao horizontalna projekcija njegova vektora na os apscisa (harmoničko titranje). Moment sila inercije M_1 djeluje u smjeru nagibanja broda φ . Moment statičkog stabiliteta M_2 djeluje uvijek nasuprot nagibanju broda, pa zbog toga njegov vektor zaostaje za 180° za vektorom sila inercije. Vektor sila otpora (moment sila otpora je proporcionalan kutnoj brzini) prethodi vektoru povratnih sila za 90° , a vektor sila uzbude prethodi nagibima broda za kut ϵ faznog pomaka. Na sl. 3b vidi se da moment otpora vode, koji se povećava ugradnjom ljuljnih kobilica, daje samo jednu od komponenata koje se protive vanjskim momentima uzbude od strane valova. Drugu komponentu daje razlika momenta statičkog stabiliteta i sila inercije. Što je veća komponenta od momenta otpora vode spram te druge komponente, to će i utjecaj ljuljnih kobilica na svladavanje nagiba biti veći. Budući da je u slučaju rezonancije fazi pomak $\epsilon = 90^\circ$, moment sila inercije jednak je momentu statičkog stabiliteta, a moment otpora vode djeluje cijelom svojom veličinom upravo suprotno vanjskim mo-

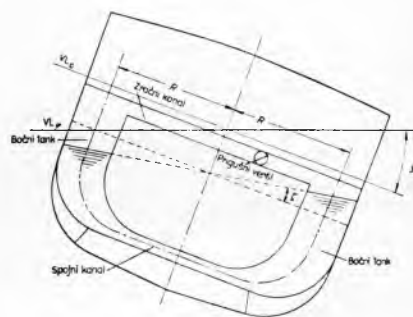
mentima uzbude (sl. 3a), pa je u slučaju rezonancije i djelovanje ljuljnih kobilica najveće.

Djelovanje ljuljnih kobilica je prema tome najbolje kad uslijed rezonancije valnog gibanja mora i ljuljanja broda kutovi nagiba broda postignu velike vrijednosti, a opada što su kutovi nagiba broda manji. Ono dakle ovisi o omjeru frekvencija ω_E/ω_B , tj. o prividnoj frekvenciji valova, a prema tome i o brzini i kursu broda. To je nepovoljno jer brod treba stabilizirati bez obzira na njegov kurs, njegovu brzinu i stanje mora. Osim toga ljuljne kobilice ne mogu potpuno stabilizirati brod, tj. sasvim poništiti ljuljanje broda, jer se otpor vode ne može toliko povećati da bi gibanje broda bilo potpuno prigušeno.

Otpor koji pružaju ljuljne kobilice nagibanju broda može se znatno povećati ako se umjesto kontinuirane površine ljuljnih kobilica upotrijebi perajična rešetka, sastavljena od perajica veće visine postavljenih jedna za drugom u određenim razmacima. Dok su ljuljne kobilice povoljne u slučaju horizontaliziranja, jer znatno povećavaju momente supstancije M_3 , koji se protive momentima statičkog stabiliteta M_2 i tako potpomažu momente sila inercije M_1 , koji nastoje zadržati brod u sistemu S I, one su potpuno neefikasne za stabiliziranje, jer je tada potreban veliki moment M_2 da bi se održavao brod u sistemu S II.

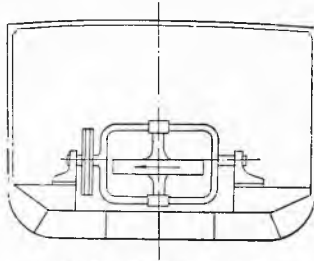
Danas se ljuljne kobilice vrlo mnogo upotrebljavaju, jer je njihova konstrukcija jednostavna i jeftina, težina im je vrlo malena, praktički nema troškova održavanja, a njihov utjecaj na brzinu broda je neznatan. Osim toga se danas brodovi još uvijek mahom nastoje horizontalizirati, a ne stabilizirati.

Periodični tipovi stabilizatora. Da se stvore zakretni momenti koji bi na brod djelovali nasuprot vanjskim momentima od valova, u brod se postavlja jedna pokretna masa koja svojim oscilacijama proizvodi željene protumomente. Ako je ta masa tekuća, praktična izvedba takvog stabilizatora sastoji se od U-cijevnog tanka naročitog oblika koji je poznat pod imenom *Frahmov tank* (sl. 4). Teorijska i praktična ispitivanja pokazala su da je za uspješno djelovanje tanka potrebno da perioda gibanja vode u tanku bude jednaka vlastitoj periodi ljuljanja broda. Jednostavan račun pokazuje da nije moguće ispuniti taj uvjet jednom U-cijevi konstantnog presjeka, a takvih dimenzija da stane u brod. Zbog toga se Frahmov tank sastoji od širih bočnih dijelova među sobom spojenih kanalom manjeg presjeka. Uslijed ljuljanja broda na valovima nastaje i gibanje tekućine u tanku. Matematički se može dokazati da je djelovanje tanka najefikasnije u slučaju rezonancije između gibanja broda i valova, tj. kada kutovi nagiba broda postanu maksimalni. Kako je u tom slučaju pomak faze između djelovanja valova i gibanja broda 90° , to treba i gibanje vode u tanku udesiti tako da bude pomaknuto u fazi prema gibanju broda za 90° . Na taj način nastaje između momenta uzbude i protumomenata koje proizvodi stabilizator pomak faze od 180° , pa oni djeluju jedan suprotno drugome. Tako se energija valova troši na gibanje tekućine u tanku umjesto na ljuljanje broda. Da se priguši to gibanje tekućine, Frahm je spojio oba bočna dijela protuljuljnog tanka jednim zračnim vodom s ugrađenim prigušnim ventilom koji regulira prolaz zraka iz jednog dijela tanka u drugi. Zbog jednostavnosti i ekonomičnosti konstrukcije i upotrebe, a dobre efikasnosti u slučaju rezonancije, protuljuljni tankovi tog tipa našli su široku primjenu uglavnom u njemačkoj trgovačkoj mornarici prije Prvog svjetskog rata. Jedna je modifikacija te konstrukcije da se tankovi ne spoje kanalom unutar broda, nego ostave otvoreni u spoju s morem, pa na taj način nastaje oscilatorno gibanje i vodenih masa izvan broda.



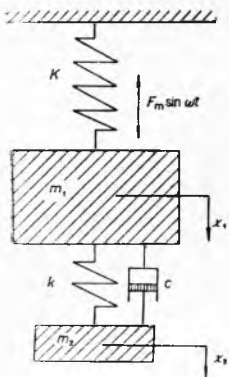
Sl. 4. Frahmov protuljuljni tank

Svojstvo zvrka da nastoji održati položaj svoje osi u prostoru dovelo je do njegove mnogostruke upotrebe u tehnici, pa i u svrhu stabiliziranja broda. Ideju da se reaktivni momenti koje proizvodi giroskop (zvrk) pri prisilnom gibanju njegove osi u prostoru upotrijebe za stabiliziranje broda prvi je praktički ostvario O. Schlick 1904 (sl. 5). Osovina giroskopa postavljena je okomito, kako uslijed djelovanja giroskopskih momenta ne bi došlo do promjene kursa. Zamašnjak giroskopa okreće se u ležajevima učvršćenim u okvir. Da se omogući precesijsko gibanje giroskopa, taj se okvir može zakretati oko horizontalne osi. Težište okvira sa zvrkom nalazi se ispod objesa i zbog toga stabilizator djeluje kao njihalo, jer se nakon svakog otklona, uslijed precesijskog gibanja, nastoji vratiti u srednji uspravni položaj. Gibanje okvira giroskopa treba udesiti tako da se on nalazi u svom srednjem položaju kad je brod postigao maksimalni bočni nagib. Perioda gibanja okvira zvrka treba da je dakle jednaka vlastitoj periodi gibanja broda, a njegov pomak faze mora iznositi 90° prema gibanju broda, što u slučaju rezonancije znači 180° prema djelovanju valova. Dakle, djelovanje girostabilizatora na brod je potpuno analogno djelovanju Frahmova protuljuljnog tanka, premda je fizičko porijeklo sila koje oni razvijaju sasvim različito. Radi ispravnog udešavanja faze za razne režime valova, precesijsko gibanje okvira zvrka može se regulirati kočnicom (analognom prigušnom ventilu na Frahmovu tanku).



Sl. 5. Schlickov giroskop

Frahmov protuljuljni tank i Schlickov giroskop djeluju na brod periodičnim momentima koji se pokoravaju harmoničkom zakonu, pa se prema tome sistem brod-tank, odnosno brod-giroskop, može u fizičkom smislu smatrati titrajnim sistemom sa dva stepena slobode kojemu je položaj u prostoru definiran dvjema koordinatama. Svaki titrajni sistem sa dva stepena slobode može se predočiti dvjema masama, koje titraju pod utjecajem sila u oprugama i vanjske sile uzbude (sl. 6). Velika masa m_1 predočuje brod, a mala m_2 stabilizator. Masa m_1 giba se pod djelovanjem periodične sile $F_m \sin \omega t$, koja predočuje u navedenoj shemi djelovanje valova. Opruga s konstantom K (opruga se rastege za jedinicu dužine pri opterećenju sa K jedinica sile), koja vraća masu m_1 uvijek prema ravnotežnom položaju, analogna je momentu statičkog stabilizatora broda. Opruga s konstantom k



Sl. 6. Shema titrajnog sistema sa dva stepena slobode

predočuje utjecaj koji stabilizator vrši na brod i obratno, i mjerodavna je za povezanost sistema. Prigušivanje gibanja mase m_1 u odnosu na masu m_2 predočeno je u shemi cilindrom napunjenim uljem u kojem se kreće stap. Prigušivanje je proporcionalno relativnoj brzini gibanja mase m_1 u odnosu na masu m_2 . Faktor proporcionalnosti je c . U slučaju Frahmova tanka prigušivanje nastaje uslijed trenja tekućine o zidove tanka, a može se umjetnim putem povećati pomoću prigušnog ventila. Prigušivanje gibanja okvira Schlickova giroskopa nastaje uslijed trenja osovine okvira o ležajevne, a može se umjetnim putem povećati pomoću kočnice smještene na okviru giroskopa.

Diferencijalne jednadžbe gibanja masa m_1 i m_2 dobivaju se izjednačivši umnožak mase i akceleracije sa sumom svih sila koje djeluju na dotičnu masu. Dakle, ako je pomak mase m_1 jednak x_1 , a pomak mase m_2 jednak x_2 , vrijedi:

$$m_1 \ddot{x}_1 = -K x_1 - k(x_1 - x_2) - c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + F_m \sin \omega t,$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = k(x_1 - x_2) + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2),$$

gdje su \dot{x} i \ddot{x} prva i druga derivacija pomaka x po vremenu t . Sredjenjem dobiva se sistem linearnih diferencijalnih jednadžbi s konstantnim koeficijentima:

$$m_1 \ddot{x}_1 + K(x_1 - x_2) + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = F_m \sin \omega t,$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + k(x_2 - x_1) + c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = 0.$$

Pretpostavivši kao rješenja gornjih jednadžbi:

$$x_1 = a_1 \sin \omega t \quad i \quad x_2 = a_2 \sin \omega t,$$

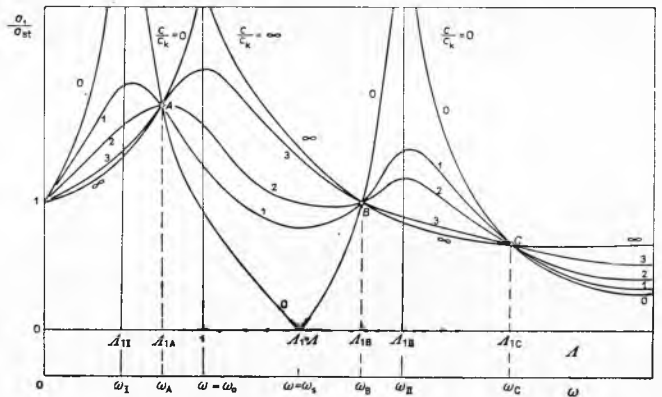
dobiva se da je odnos između kvadrata amplitude gibanja broda a_1^2 i kvadrata amplitude sile uzbude F_m^2 :

$$\frac{a_1^2}{F_m^2} = \frac{(k - m_2 \omega^2)^2 + \omega^2 c^2}{[(-m_1 \omega^2 + K)(-m_2 \omega^2 + k) - m^2 \omega^2 k]^2 + \omega^2 c^2 (-m_1 \omega^2 + K - m_2 \omega^2)^2}$$

Pomoću ove jednadžbe može se izračunati amplituda gibanja mase m_1 u ovisnosti o sedam varijabli $F_m, \omega, c, K, k, m_1$ i m_2 . Ona se obično piše u bezdimenzijskom obliku pomoću ovih oznaka: $\mu = m_2/m_1$, odnos masa (stabilizatora i broda); $\omega_s^2 = k/m_2$, kvadrat frekvencije vlastitog titranja stabilizatora; $\omega_b^2 = K/m_1$, kvadrat frekvencije vlastitog titranja broda; $\Lambda = \omega_s/\omega_b$, omjer vlastitih frekvencija; $A_1 = \omega/\omega_b$, omjer prisilne frekvencije valova i vlastite frekvencije broda; $a_{st} = F_m/K$ pomak mase m_1 za statičko djelovanje sile F_m ; $c_k = 2m\omega_b$ kritični faktor prigušivanja. S tim oznakama gornja jednadžba prelazi u ovu:

$$\left(\frac{a_1}{a_{st}}\right)^2 = \frac{\left(2 \frac{c}{c_k} A_1\right)^2 + (A_1^2 - \Lambda^2)^2}{\left(2 \frac{c}{c_k} A_1\right)^2 (A_1^2 - 1 + \mu A_1^2)^2 + [\mu \Lambda^2 A_1^2 - (A_1^2 - 1)(A_1^2 - \Lambda^2)]^2}$$

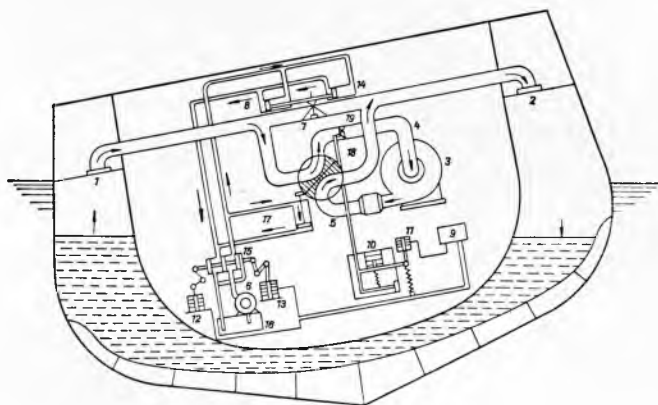
a_1/a_{st} je faktor uveličanja gibanja broda. On je predočen u dijagramu na sl. 7 kao funkcija omjera frekvencija A_1 za razne vrijednosti omjera prigušivanja c/c_k . Iz tog dijagrama može se razabrati sljedeće. Najmanji nagibi broda dobivaju se ako je $\Lambda = A_1$, odnosno $\omega_s = \omega$, tj. ako je vlastita frekvencija stabilizatora jednaka frekvenciji valova. U slučaju kad ne bi bilo prigušivanja ($c/c_k = 0$) postiglo bi se čak potpuno stabiliziranje jer bi kutovi nagiba broda a_1 bili jednaki nula. Međutim, kako se frekvencija valova ω stalno mijenja, a frekvencija stabilizatora je uglavnom određena njegovim oblikom i dimenzijama pa se može vrlo malo mijenjati, to se nastoji da taj uvjet bude ispunjen onda kada je frekvencija valova najopasnija za brod, dakle u slučaju rezonancije, kada je $\omega = \omega_b$. Zbog toga su i Frahmov protuljuljni tank i Schlickov giroskop imali vlastitu frekvenciju titranja ω_s jednaku vlastitoj frekvenciji ljuljanja broda ω_b . U slučaju da nema prigušivanja, faktor uveličanja a_1/a_{st} a time i nagib broda, postizava za dvije vrijednosti omjera frekvencija A_1 (A_{1I} i A_{1II}) neizmjereno velike vrijednosti. Kad omjer prigušivanja c/c_k nije jednak nuli, nagibi broda doduše nisu neizmjereno veliki, ali poprimaju svakako velike vrijednosti, veće nego kad brod ne bi imao stabilizatora.



Sl. 7. Kvalitativni dijagram faktora uveličanja $\frac{a_1}{a_{st}}$ u ovisnosti o omjeru frekvencija $A_1 = \frac{\omega}{\omega_b}$ koji pokazuje upliv prigušivanja gibanja stabilizatora spram gibanja broda

Prema tome primjenom stabilizatora ovog tipa ne postiže se mnogo. Dok za brod bez stabilizatora postoji rezonancija u jednom slučaju, kad je $\omega = \omega_{II}$, za brod sa stabilizatorom postoji rezonancija u dva slučaja, kad je $\omega = \omega_I$ i kad je $\omega = \omega_{II}$. To je tzv. pojava dvostruke rezonancije, koja je ozbiljan nedostatak stabilizatora periodskog tipa. Da se izbjegnu visoke vrijednosti nagiba broda kod sekundarnih rezonancija, treba povećati prigušivanje gibanja stabilizatora. Kako se vidi iz dijagrama na sl. 7, što je veće prigušivanje to su manje vrijednosti nagiba broda kod sekundarnih rezonancija, ali to je veći nagib kod primarne rezonancije. Zbog toga treba stalno mijenjati prigušivanje (prigušni ventil na Frahmovu tanku i kočnicu na Schlickovu giroskopu). Ako je prigušivanje neizmjereno veliko, nema uopće pomaka stabilizatora, brod se ljulja kao da nema stabilizatora.

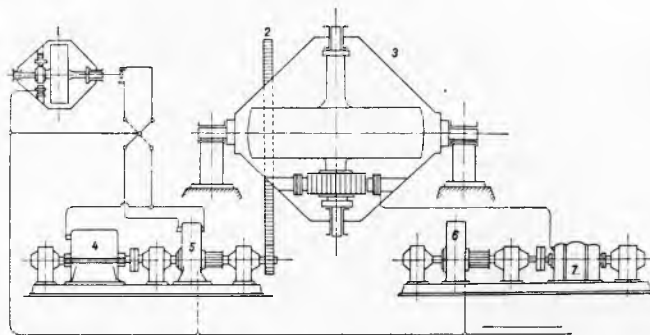
Aktiviranje stabilizatora je primijenjeno da se izbjegne dvostruka rezonancija, glavni nedostatak periodskih tipova stabilizatora. Gibanje mase tekućine, odnosno okvira giroskopa, nije više prepušteno samom sebi, nego se njime upravlja pomoću vanjskog izvora energije. Tako su nastali aktivirani protu-



Sl. 8. Siemensov aktivirani protuljuljni tank. Zrak se tiska puhalom 3...5 u tank 1 ili 2 prema položaju ventila 7 i 18 upravljanih sistemom 6, 8, 12...17, a regulira se prigušnim ventilom 19, kojim upravlja sistem 9...11

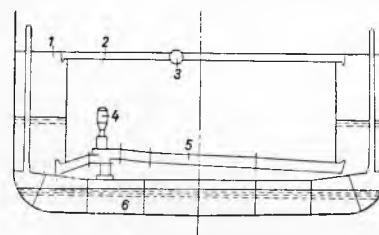
ljuljni tankovi firme Siemens (visina tekućine u tanku se podešava reguliranjem pritiska zraka iznad razine tekućine, sl. 8) i aktivirani Sperryjev giroskop (precesija okvira giroskopa prisilno se izvodi pomoću elektromotora, sl. 9). Na taj način pokušalo se je postići da frekvencija gibanja stabilizatora ω_s bude uvijek jednaka frekvenciji valova ω , kako zahtijeva teorija za potpuno stabiliziranje. Tu se javljaju problemi regulacije, tj., prvo, kako odrediti uzbudnu frekvenciju ω , zatim, na koji način regulirati stabilizator da bi njegova frekvencija bila zaista jednaka frekven-

ciji valova. Osim toga treba postaviti i ispravni pomak faze, tako da stabilizator djeluje stalno nasuprot momentima od valova.



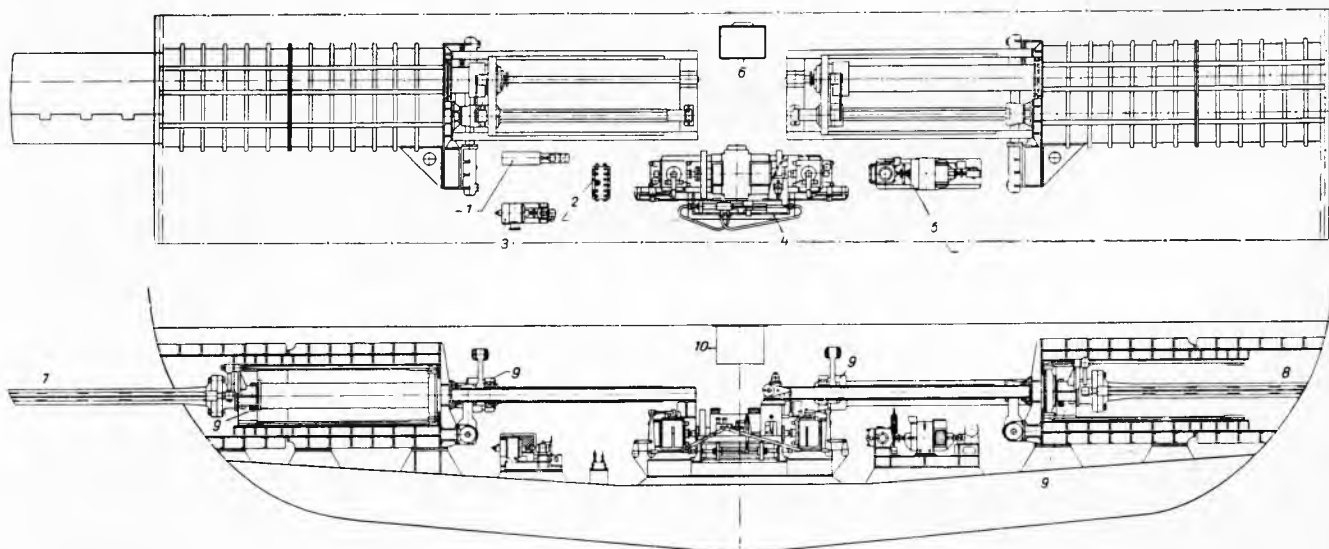
Sl. 9. Sperryjev girostabilizator. 1 giropilot, 2 zupčani kvadrant, 3 giroskop, 4 kočnica, 5 precesioni elektromotor, 6 elektromotor istosmjerne struje, 7 trofazni generator

Aperiodski tipovi stabilizatora. Na valovima će paluba broda zadržati horizontalan položaj jedino ako brod ima ili neizmjereno veliki moment tromosti ili metacentarsku visinu jednaku nuli. Dok se veliki moment tromosti dobiva gradnjom dvostrukog trupa (brodovi tipa katamaran), za brodove normalnog oblika dolazi u obzir samo mala metacentarska visina, koja se može najlakše postići slobodnim površinama tekućine u brodu. Prema prijedlogu Horna izvedeni su na putničkim brodovima u tu svrhu



Sl. 10. Hornov labilettni tank. 1 bočni tank, 2 zračni kanal, 3 zaklopka, 4 Kaplan-turbina, 5 spojni kanal, 6 plosni tank u dvodnu

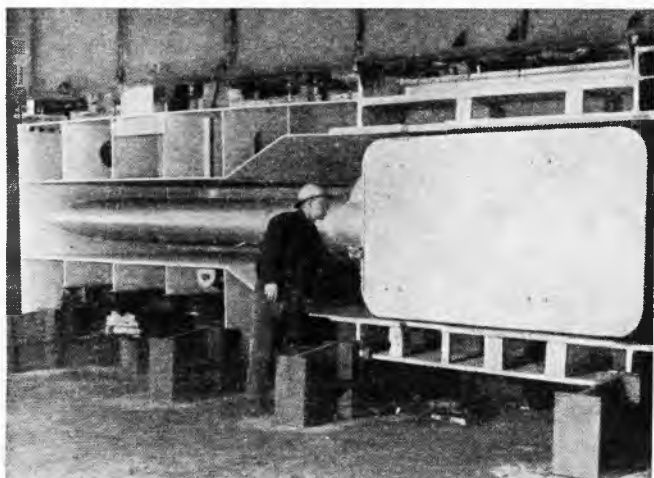
plosni ili labilettni tankovi u dvodnu (sl. 10). Velike slobodne površine vode u tankovima znatno smanjuju metacentarsku visinu, što pruža dvostruku korist: zbog male metacentarske visine malen je i moment uzbude kojim valovi djeluju na brod, a osim toga perioda ljuljanja broda postizava tako velike vrijednosti da je isključena mogućnost rezonancije. Da se spriječe preveliki nagibi, koji bi uz malu metacentarsku visinu mogli



Sl. 11. Denny-Brownov stabilizator. 1 komandni ventil za uvlačenje i izvlačenje perajice, upravlja se električki s mosta, 2 zaporni ventil, 3 rezervni energetski izvor, 4 glavni energetski izvor, 5 servo-jedinica, 6 giroskop, 7 izvučena perajica, 8 uvučena perajica, 9 klizna križna glava, 10 uljni tank

nastati uslijed prelaza putnika na jednu stranu broda ili djelovanja vjetera, postoje osim tankova u dvodnu i bočni tankovi, u koje se prema potrebi pumpom tiska voda i tako izravna nastali nagib. Specijalnom konstrukcijom pokrova tanka područje malog stabiliteta ograničeno je na $\pm 3^\circ$. U tom području perioda valjanja broda iznosi oko 40 sek. Ako je kut nagiba broda veći od 3° , djeluje nesmanjeni moment statičkog stabiliteta, jer slobodna površina vode u tanku prilagne uz pokrov dvodna pa nije više djelotvorna.

Drugi izraziti predstavnik aperijskih tipova stabilizatora je Denny-Brownov stabilizator s aktivnim perajicama, smještenim na oba boka broda (sl. 11). Zbog strujanja tekućine oko broda javljaju se na perajicama sile koje, analogno silama na kormilu, vrše zakretne momente na brod, a veličina i smjer momenta mogu se mijenjati odgovarajućim prekratanjem perajica pomoću hidrauličkog uređaja. Perajice se zakreću oko poprečne osi, pa djeluju na brod zakretnim momentima koji sprečavaju ljuljanje. Radi zgodnijeg upravljanja mora dužina perajica biti znatno manja nego dužina ljuljnih kobilica; zato aktivne perajice imaju veću visinu i strše daleko izvan maksimalne širine broda, pa se moraju uvlačiti kad nisu u upotrebi (sl. 12). Velika prednost perajičnog stabilizatora jest upravo to što je aperijski. Perajični stabilizator se može pomoću regulacijskog uređaja brzo i lako prilada-

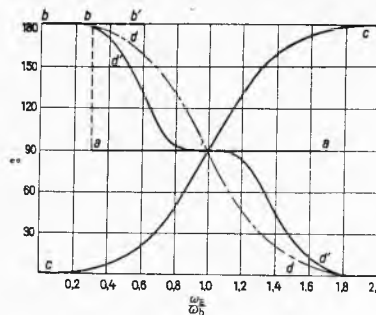


Sl. 12. Perajica girofin-stabilizatora uvučena u kućište

gđiti bilo kakvim vanjskim momentima, zaprema malo prostora na brodu, male je težine (oko 1% deplasmana) i relativno niske cijene. Ipak, i on ima stanovite mane, kao npr. da se mora uvlačiti pa postoji mogućnost oštećenja (zato se noviji tipovi izvode s preklopnim perajicama), da njegovo djelovanje ovisi o brzini broda (kada brod ne plovi nema djelovanja) i da povećava otpor broda. Zbog toga se i dalje radi na razvijanju novih tipova stabilizatora, kao npr. stabilizatora s pomičnim težinama, s propele- rima itd.

Upravljanje stabilizatorom. Da bi moment stabilizatora djelovao stalno suprotno momentu od valova i tako ga najdjelotvornije smanjivao, pomak faze među njima treba da je 180° . Između momenata uzbude i gibanja broda postoji pomak faze ϵ , ovisan o omjeru frekvencija ω_E/ω_b , pa između gibanja broda i stabilizatora treba da postoji uvijek pomak faze od $180 - \epsilon$. Krivulja $c-c$ na sl. 13 prikazuje pomak faze između gibanja broda i valova (v. str. 231 sl. 17). Idealno upravljanje stabilizatorom trebalo bi da uspostavi pomak faze od 180° između gibanja stabilizatora i vanjskih momenata uzbude bez obzira na to koliki je omjer frekvencija, dakle prema krivulji $d-d$. Zbroj ordinata krivulja $c-c$ i $d-d$ uvijek je 180° , bez obzira na to koliki je omjer ω_E/ω_b . Budući da se ljuljanje broda sastoji od vlastitih i prisilnih oscilacija, treba osim prisilnih titraja prigušivati i vlastite titraje, za koje treba uspostaviti fazni pomak od 90° (linija $a-a$), a krivulju $d-d$ modificirati u krivulju $d'-d'$. Ako valovi djeluju na brod s frekvencijama koje leže blizu vlastitoj frekvenciji broda (u području rezonancije), regulator treba da prekrene smjer djelovanja stabilizatora kad brod prolazi kroz svoj srednji položaj

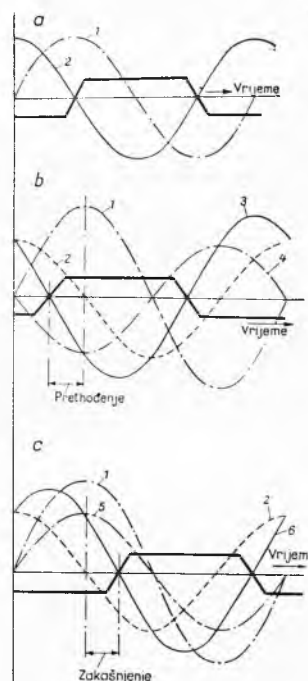
(pomak faze između gibanja broda i stabilizatora 90°). Ako je frekvencija valova manja, regulator treba da impuls za prekratanje dađe kasnije, a ako je frekvencija valova veća, prije.



Sl. 13. Pomaci faza za različite slučajeve regulacije

Potrebni pomak faze između gibanja broda i stabilizatora uspostavlja se pomoću automatskog regulatora koji, na osnovu informacija o momentanom položaju broda i momentanoj brzini kojom se on nagiba, upravlja kontrolnim ventilom hidrauličkog uređaja koji pokreće stabilizator. Kut nagiba broda i kutna brzina njegova nagibanja mjere se girokopima, rezultati mjerenja pretvaraju se u električne promjene koje se šalju kao ulazne veličine u regulator, pa ih on na odgovarajući način obrađuje i pretvara u izlaznu veličinu koja upravlja postavnim organom stabilizatora. Na koji se način tako postižu različiti pomaci faze između gibanja broda i stabilizatora pokazuje sl. 14. Krivulje 1 i 2 na toj slici prikazuju idealizirano (kao sinusoidu odn. kosinusoidu) kako se s vremenom mijenja ulazna veličina regulatora koja dolazi sa mjerila kuta nagiba odn. sa mjerila kutne brzine. Debelo izvučena lomljena crta prikazuje, također idealizirano, promjenu položaja stabilizatora: kosi dijelovi te crte jesu odsjeci krivulje sinusoidnog oblika koja ima pomak faze od 180° prema krivulji izlazne veličine regulatora, a horizontalni njezin dio prikazuje mirovanje stabilizatora u krajnjem položaju do kojeg se maksimalno može zakretati u jednom ili drugom smjeru. Na sl. 14 a regulator se služi samo ulaznom veličinom sa mjerila kutne brzine, tj. ona je istovremeno i izlazna veličina regulatora: takva regulacija daje fazni pomak od 90° između gibanja broda i stabilizatora.

Na sl. 14 b izlazna je veličina regulatora suma (prikazana krivuljom 3) ulazne veličine sa mjerila kutne brzine (linija 2) i negativne vrijednosti jednog dijela ulazne veličine sa mjerila kuta nagiba (krivulja 4 = $0,6 \cdot 1$). Takva regulacija, kojom se postiže da gibanje regulatora prethodi u fazi promjeni kutne brzine nagibanja broda, primjenjuje se kad valovi dolaze s pramca, jer je onda $\omega_E/\omega_b > 1$ (v. sl. 13). Na dugim valovima mrtvog mora, osobito kad dolaze s krme, može se dogoditi da ω_E/ω_b postane < 1 . U tom slučaju treba da gibanje stabilizatora zaostaje u fazi za kutnom brzinom; to se postiže time da regulator sumira ulaznu veličinu sa mjerila kutne brzine i dio ulazne veličine sa mjerila kuta nagiba (sl. 14 c, izlazna veličina 6 = $2 + 0,63 \cdot 1$). Na nepravilnom moru ni gibanje broda nije tako pravilno kako je pretpostavljeno na sl. 14, ali to ne utječe na princip prednjih razmatranja.



Sl. 14. Uspostavljanje pomaka faze između gibanja broda i stabilizatora

Finija se regulacija položaja broda može dobiti ako se regulatoru, uz informacije o kutu i brzini nagiba broda, dovodi i informacija o kutnom ubrzanju nagibanja broda (v. *Regulacija, automatska*).

PRORAČUN ČVRSTOĆE BRODSKE KONSTRUKCIJE

Da bi brod mogao odgovoriti namjeni radi koje se gradi, njegova konstrukcija mora imati odgovarajuću čvrstoću, tj. ona se pod djelovanjem vanjskih sila ne smije pretjerano deformirati a njena krutost mora biti tolika da vibracije ostaju u dopuštenim granicama. Nadalje, brodska konstrukcija treba da je što lakša, a raspored njenih konstruktivnih elemenata takav da stvara što više slobodnog prostora. To se postiže njenim ispravnim dimenzioniranjem. Na osnovu zakonâ nauke o čvrstoći određuju se iz vanjskog opterećenja naponi u materijalu i odabiru dimenzije konstruktivnih elemenata tako da ti naponi ne prelaze dopuštene vrijednosti.

Određivanje dimenzija brodskih konstruktivnih elemenata na osnovu proračuna čvrstoće počelo se polako uvoditi tek u drugoj polovici XIX st., kad se je prešlo od drvene na željeznu brodsku konstrukciju. Drveni i prvi željezni brodovi gradili su se isključivo na osnovu iskustva. Kako su rastle dimenzije brodova tako je i pitanje njihove čvrstoće postajalo sve kritičnije, pa se nije moglo riješiti na zadovoljavajući način samo oponašanjem prijašnjih uspješnih izvedbi. M. I. Brunel je prema svojim iskustvima iz mostogradnje sagradio u godinama 1851 do 1858 prvi gigantski željezni brod «Great Eastern» dužine 210 m, deplasmana 27 000 t. Iako taj brod s ekonomskog stanovišta nije uspio, njegova konstrukcija dokaz je genijalnosti Brunela, koji je u doba kada još nije postojalo nikakvo iskustvo u gradnji željeznih brodova uspio ostvariti konstrukciju i s današnjeg stanovišta ispravno oblikovanu za preuzimanje savijanja, amicanja i izvijanja, tako da je besprijekorno izdržala sve mnogobrojne udese koji su brod zadesili za vrijeme njegove eksploatacije.

Uspjele Brunelove konstrukcije ipak predstavljaju izuzetak za ono doba. Prvi željezni brodovi gradili su se jednostavnim kopiranjem njihovih drvenih prethodnika, što je imalo za posljedicu glomazne i teške konstrukcije i česte havarije. Kada se 1870 parobrod «Maru» prelomio nadvoje na valu osrednje visine, postala je potreba proračunavanja uzdužne čvrstoće očit. Osnove za taj proračun dali su već davno matematičari L. Euler i D. Bernoulli (između 1705 i 1744) i engleski fizičar T. Young (1811), koji je razlike između težine i uzgona broda u pojedinim njegovim presjecima predočio kao krivulju opterećenja. U brodogradnji uvode taj proračun konstruktori engleske mornarice E. I. Reed (1870) za ratne i W. John (1874) za trgovačke brodove. Na prijedlog J. Bilesa brod se na brijegu odnosno dolu trohoidnog vala, dužine jednake dužini broda i visine jednake 1/20 dužine, smatra gredom statički opterećenom razlikom težine i uzgona po njenoj dužini, i na taj je pretpostavci osnovan tzv. standardni proračun uzdužne čvrstoće broda, koji je uspio, uza sve nedostatke, održati se do danas. A. N. Krylov je (1898) prvi dao način proračuna čvrstoće koji uzima u obzir i gibanje broda na valovima. Još 1883 je W. E. Smith pokazao da se u proračunu pritisaka u valu mora uzeti u obzir dinamička raspodjela pritiska uslijed orbitalnog gibanja vodenih čestica, prema trohoidnoj teoriji valova. Od onda pa do danas izvršeno je uz daljnju teorijsku razradu dinamičkog proračuna momenata savijanja (A. Robb 1917, W. Jacobs 1959 i dr.) i mnogo eksperimenata, kako na stvarnim brodovima («San Francisco», 1935—38, «Ocean Vulcan», 1945—47 i dr.), tako i na njihovim modelima (E. Lewis 1954, Ackita i Ochi 1955, De Does 1960, i dr.) radi određivanja opterećenja kojima je izvrgnut brod na uzburkanom moru, što je dalo poticaja za nove metode proračuna. Ta ispitivanja su još i danas u punom toku.

Katastrofa razarača «Cobra», koji se 1901 prelomio na valu, upozorila je brodograditelje na činjenicu da se brodski trup, kao sandučast nosač tankih zidova, ponaša pri savijanju drukčije nego greda punog presjeka. Ispitivanjima što ih je izvršio na razaraču «Wolf» (1905) J. Biles je pokazao da su ugibi broda znatno veći nego što ih daje proračun, a F. Pietzker je na osnovu eksperimenata dokazao da to nije posljedica klizanja zakivanih spojeva (kako je mislio Biles) i prvi je (1911) ukazao na to da nedovoljno ukrućeni limovi nisu efikasni za preuzimanje tlačnih naprezanja jer se izvijaju.

Pokušaji klasifikacionih društava da na osnovu empirije riješe problem ispravnog dimenzioniranja broda nisu uspjeli, i brodograditelji su morali posegnuti za radovima teoričarâ da bi odredili stvarni raspored napona i na osnovu toga ispravno dimenzionirali elemente brodske konstrukcije. Studije o izvijanju greda dali su L. Euler (1757) i F. Engesser (1899), a o izvijanju ploča Saint Venant (1883) i G. H. Bryan (1891). Te radove primijenili su na brodske konstrukcije I. G. Bubnov u Rusiji (1909), G. Schnadel u Njemačkoj (1926 i kasnije) i H. A. Schade u Americi (1951). God. 1930—31 izvršeni su pokusi s opterećenjem do loma na dva razarača američke mornarice, «Preston» i «Bruce». Oba razarača slomila su se uslijed izvijanja limova pod tlačnim naprezanjem i rezultati mjerenja dobro su se slagali s teorijskim proračunima. Ta ispitivanja, kao i ona koja su kasnije izvršena na tankerima «Newerita» i «Newcombia» (1946), pokazala su ispravnost pretpostavke o linearnoj raspodjeli napona ako su uzdužne veze efektivno ukrućene protiv izvijanja.

Premda je bila rano uočena pojava koncentracije napona na mjestima nagle promjene presjeka u brodskim konstrukcijama (eksperimentalna istraživanja izvršili su E. G. Coker pomoću fotoelastične metode, 1911 i poslije, A. Klehn mjerenjem deformacija na modelima, 1933, a teorijska istraživanja proveo je E. Inglis, 1913), brodograditelji su to uvidjeli tek kada je došlo do katastrofalnih loma zavarenih brodova za vrijeme i neposredno nakon Drugoga svjetskog rata. Pokazalo se da je jednostavno kopiranje konstrukcije zakivanih brodova ne odgovara za zavarene konstrukcije. Utjecaj konstrukcije grotla na koncentracije napona ispitivali su de Garmo (1948) i A. Audigé (1953), a utjecaj krajeva nadgrada J. A. Šimanski (1949) i van der Neut (1951). Postojao je i problem kako osloboditi palubu nadgrada od znatnih napona koji se u nju prenose savijanjem broskog trupa, da bi se ta paluba mogla izvesti od laganih limova. Pokusi koje je izvršio J. Vasta na brodu «President Wilson» (1949) pokazali su da se elementarna teorija savijanja grede ne može primijeniti na kombinaciju broda i nadgrada. Raspodjelu napona u nadgradama nastojali su teorijski razjasniti L. Crawford (1950) i H. Bleich (1953). Problem napona u nadgradama od aluminijske legure obradili su W. Muckle (1952) i H. E. Jaeger (1955).

Osim problema uzdužne čvrstoće, u gradnji čeličnih brodova pojavio se ubrzo i problem dimenzioniranja rebra i sponja, dakle elemenata poprečne čvrstoće. Posluživi se teoreomom A. Castigliana (1865), Norvežanin J. Bruhn razvio je 1901 metodu proračuna za okvire sastavljene od rebrenice, rebra i sponja. Na osnovu tog proračuna Frodsham Holt (1915) i Westcott Abell (1916)

dali su približne formule za dimenzioniranje poprečnih rebra, kojima su se služila skoro sva klasifikaciona društva. Primjena Castiglianova teorema za proračun kompliciranijih okvirnih sistema dovodila je do dugotrajnih i nezgodnih računa. Danas se upotrebljava u tu svrhu metoda kutova zaokreta (A. Bendixsen 1914, A. Ostenfeld 1926, L. Mann 1927), metoda H. Crossa (1932) i druge metode građevne statike.

Poseban problem predstavljala je konstrukcija broskog dna, sastavljena od sklopa ploča i ukrštenih nosača, napregnuta savijanjem od pritiska vode. Metode za njen proračun dali su W. Schilling (1925), G. Schnadel (1935) i H. A. Schade (1937). Za proračun uzdužnih veza Lorenz (1924) je primijenio poznate Clapeyronove jednačbe (1848), a u novije doba G. Vedeler (1954) je dao metode proračuna clemenata za uzdužni sistem gradnje.

Značajni doprinos proračunu čvrstoće brodske konstrukcije dali su ruski učenjaci. A. N. Krylov razvio je dinamički proračun uzdužne čvrstoće, uzvši u obzir gibanje broda na valovima (1898). On je razvio metode proračuna grede na elastičnoj podlozi, napisao je, između ostalog, i knjigu o vibracijama broda, analizirao je elastične linije pri izvijanju stupova uzvši u obzir velike ugame itd. Njegovi učenici i suradnici nastavili su rad na tom području, tako da je čvrstoća broda postala posebna nauka. I. G. Bubnov postavio je i djelomično riješio sve osnovne probleme čvrstoće broda. On je prvi primijenio teoriju savijanja ploča na proračun brodske konstrukcije, riješio je na osnovu teorije grede na elastičnoj podlozi problem savijanja rešetkastih konstrukcija sastavljenih od ukrštenih gređa, ispitivao je čvrstoću pri dokovanju itd. Bubnov je prvi predložio (1908) norme za čvrstoću brodova, koje su zadržale svoje značenje i danas. P. F. Papkovič, nakon što je dao niz sjajnih radova iz oblasti teorije elastičnosti, elastične stabilnosti i teorije vibracija, napisao je knjigu o čvrstoći broda (1941—47), koja po bogatstvu sadržaja i originalnosti metoda nije do danas premašena. S. Timošenko dao je, uz ostale radove, i rješenje problema izvijanja ploča u brodskim konstrukcijama (1907), a J. Hlitičev je ispitivao savijanje i stabilnost ploča ukrućenih uzdužnim ili poprečnim rebri.

Upotreba električkog zavarivanja, gradnja supertankera i uvođenje atomskog pogona postavili su brodograđevnog konstruktora pred mnogobrojne nove probleme, koji se rješavaju metodama teorije elastičnosti i pomoću eksperimenata na brodovima, njihovim modelima i pojedinim dijelovima brodske konstrukcije, tako da se brodska konstrukcija i metode njenog proračuna danas brzo razvijaju.

Glavni element brodske konstrukcije je tanka ploča, opterećena silama u svojoj vlastitoj ravnini i okomito na nju i učvršćena protiv izvijanja i savijanja sistemom ukrepa (ukrućenja) koje se obično ukrštaju pod pravim kutom. Proračun čvrstoće i stabilnosti takvih konstrukcija zahtijeva upotrebu kompliciranih matematičkih metoda, za što brodograđevnim inženjerima često nedostaje i znanja i vremena. Osim toga tačnost dobivenih rezultata, uslijed mnogobrojnih nužnih aproksimacija, često ne opravdava vrijeme utrošeno na takve proračune. Zato se je proračun čvrstoće ispočetka u brodogradnji zanemarivao. Klasifikaciona društva počela su propisivati dimenzije pojedinih konstruktivnih elemenata broskog trupa, oslobađajući na taj način brodograđevnog inženjera bilo kakvog proračunavanja čvrstoće, i to je uvelike utjecalo kako na njegovu izobrazbu tako i na daljnji razvoj brodske konstrukcije. Propisi klasifikacionih društava su ispočetka počivali gotovo isključivo na iskustvu, pa iako su time s jedne strane predstavljali kočnicu napretku, s druge su strane odigrali pozitivnu ulogu, sakupljajući, analizirajući i iskorišćavajući iskustvo s izgrađenim brodskim konstrukcijama. Kako su ti propisi obavezni samo za trgovačke brodove, proračun čvrstoće našao je široku primjenu u gradnji ratnih brodova. Ratne mornarice pojedinih zemalja propisuju samo kakvoću materijala, veličinu i vrstu opterećenja i dopuštene napone, a ostavljaju konstruktoru slobodne ruke što se tiče načina dimenzioniranja. Za njih su na raspolaganju znatno veća finansijska sredstva, postoji veća mogućnost eksperimentiranja jer se prihvaća veći rizik, pa su zato ratne mornarice uvijek vodile napredak u brodogradnji, i to ne samo u gradnji trupa nego i na drugim područjima. Tako je npr. trgovačka brodogradnja preuzela od ratne sistem uzdužnih rebra i električko zavarivanje, plinske turbine, atomski pogon, radar itd. Za upotrebu novih materijala u brodogradnji (čelika veće čvrstoće, aluminijskih legura, plastičnih masa) i novih tehnoloških metoda (električkog zavarivanja, laminiranja) i za gradnju novih tipova brodova (supertankera, kombiniranih brodova za prevoz nafte i rude) nije postojalo iskustvo na osnovu kojeg bi se mogli graditi brodovi, pa se nedostatak iskustva nastoji danas nadoknaditi eksperimentalnim istraživanjima. Ona su veoma skupa, i da bi od njih bilo koristi, treba ih ispravno voditi. To je moguće samo na osnovu dobrog poznavanja teorije. Eksperimenti služe uglavnom za to da se ispitaju pretpostavke teorije i da se kontroliraju njeni rezultati.

Opterećenje brodske konstrukcije. Zbog velikog omjera dužine naprama širini, brodski trup se može smatrati kao sandučast nosač, napregnut savijanjem u uzdužnom smjeru. Ukupan je uzgon jednak težini broda, ali se raspodjela uzgona po dužini razlikuje od raspodjele težina. Zbog toga u pojedinim presjecima po dužini broda nastaju viškovi težine ili uzgona koji naprežu brod savijanjem kao gredu koja je po dužini opterećena nejednoliko raspoređenim teretima (sl. 1 i 2). Ta nejednolika raspodjela