



## 2.3 Hidrodinamičke sile u sustavu brod-trup-vijak

Sve metode numeričke prognoze svojstava upravljivosti broda pretpostavljaju da su hidrodinamičke značajke broda poznate ulazne veličine. Hidrodinamičke sile koje djeluju u sustavu trup-vijak-kormilo, na žalost, još uvijek nije moguće modelirati i računati samo primjenom postojećih teorijskih znanja brodske hidrodinamike. Rezultati proračuna po današnjim čisto teorijskim modelima nisu upotrebljivi za praktičnu primjenu.

Pouzdaniji podaci o hidrodinamičkim svojstvima nekog broda dobivaju se jedino ispitivanjem modela tog broda u hidrodinamičkim laboratorijima (bazenima). Modelska ispitivanja imaju zadatak odrediti ovisnost ukupne hidrodinamičke sile na brod o parametrima gibanja sustava trup-vijak-kormilo:

$$\begin{aligned} X_H &= X_H(\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, u, v, r, \delta, n, \dots) \\ Y_H &= Y_H(\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, u, v, r, \delta, n, \dots) \\ N_H &= N_H(\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, u, v, r, \delta, n, \dots) \end{aligned} \quad (4.28)$$

Provedba eksperimenta s ovako puno uplivnih parametara je praktično neizvediva. Zbog toga se sustav (4.28) mora prilagoditi mogućnostima opreme hidrodinamičkih laboratorija i izabranoj tehnici modelskih ispitivanja.

Ako se za određivanje hidrodinamičkih sila izabere kombinacija

- pokusa slobodnih vožnji i
- pokusa sa vođenim modelom

što je standardni postupak Brodarskog instituta u Zagrebu, hidrodinamičke sile se dalje rasčlanjuju na komponente, kako slijedi:

$$\begin{aligned} X(\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, u, v, r, \delta, n) &= X_{HI}(\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}) + X_{HS}(u, v, r) + X_P(u, v, r, n, \delta) + X_R(u, v, r, n, \delta) + X_{HP}(X_P) \\ Y(\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, u, v, r, \delta, n) &= Y_{HI}(\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}) + Y_{HS}(u, v, r) + Y_P(u, v, r, n, \delta) + Y_R(u, v, r, n, \delta) + Y_{HR}(Y_R) \\ N(\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, u, v, r, \delta, n) &= N_{HI}(\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}) + N_{HS}(u, v, r) + N_P(u, v, r, n, \delta) + N_R(u, v, r, n, \delta) + N_{HR}(Y_R) \end{aligned} \quad (4.29)$$

Indeks H označava hidrodinamičke sile koje se na brod prenose preko njegovog trupa, a sastoji se od:

- HI hidrodinamičke inercijalne sile na goli trup broda u ubrzanom kruženju,
- HS kvazistacionarne hidrodinamičke sile na goli trup broda u stacionarnom kruženju,
- HP propelerom inducirane sile na trup broda u stacionarnom kruženju i
- HR kormilom inducirane sile na trup broda u stacionarnom kruženju.

Indeksom P označene su hidrodinamičke sile koje se na brod prenose preko osovine propelera, a

indeksom R hidrodinamičke sile koje se pojavljuju na listu kormila i na brod prenose preko osovine kormila.

### 2.3.1 Sile na kormilu i vijku

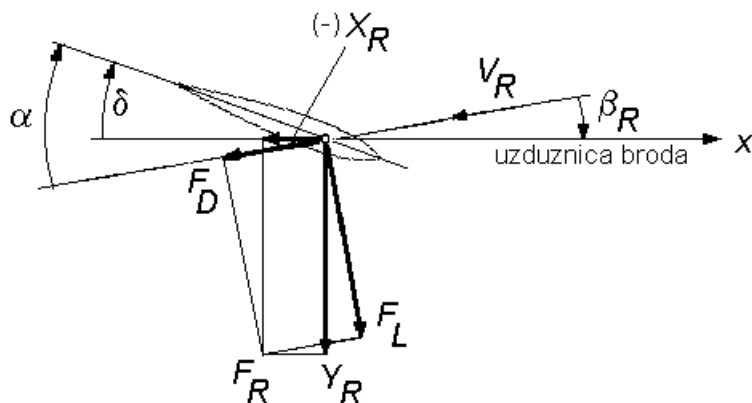
Brodsko kormilo se može razmatrati kroz teoriju krila malog izduženja. Po toj teoriji, ukupna hidrodinamička sila  $F_R$ , na kormilu površine  $A_R$ , koje se nalazi u struji vode brzine  $V_R$ , pod kutem  $\alpha$ , može se rastaviti na dvije međusobno okomite komponente: silu otpora u smjeru brzine pritjecanja vode na kormilo  $F_D$  i silu dinamičkog uzgona okomita na smjer brzine pritjecanja vode na kormilo  $F_L$ . Prema teoriji krila vitkog izduženja sila otpora i uzgona mogu se prikazati pomoću koeficijenata otpora  $C_D$  i  $C_L$ , redosljedno, na slijedeći način:

$$\begin{aligned} F_D &= \frac{1}{2} \rho A_R V_R^2 C_D(\alpha) \\ F_L &= \frac{1}{2} \rho A_R V_R^2 C_L(\alpha) \end{aligned} \quad (4.34)$$

Koeficijenti uzgona i otpora kormila određuju se eksperimentalno provedbom pokusa slobodne vožnje kormila.

Ukupna hidrodinamička sila na kormilu  $F_R$  transformira se iz strujnog u brodski koordinatni sustav, vidi sl. 4.1, primjenom slijedećih jednadžbi:

$$\begin{aligned}
 X_R &= F_L \sin \beta_R - F_D \cos \beta_R \\
 Y_R &= F_L \cos \beta_R + F_D \sin \beta_R \\
 N_R &= Y_R x_R
 \end{aligned}
 \tag{4.35}$$



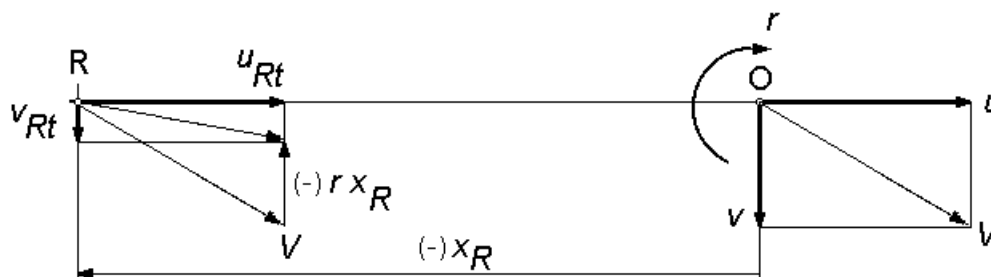
sl. 4.1 Hidrodinamička sila na kormilu

Na sl.1 je prikazano je kormilo, okrenuto za pozitivan kut  $\delta$ . Kormilo se nalazi u struji vode brzine  $V_R$  koja nailazi pod pozitivnim kutem pristujavanja  $\beta_R$  u odnosu na uzdužnicu broda (os x). Kut dostrujavanja vode na kormilo jednak je kutu između vektora brzine vode i kormila i iznosi:

$$\alpha = \delta + \beta_R
 \tag{4.36}$$

Ako se brod giba brzinom  $V \equiv (u, v)$  i kutnom brzinom  $r$ , brzina gibanja kormila u prostoru (vidi sl. 2) bit će:

$$\begin{aligned}
 V_{Rt} &= \sqrt{u_{Rt}^2 + v_{Rt}^2} \\
 u_{Rt} &= u \\
 v_{Rt} &= v + x_R r \\
 \beta_{Rt} &= \arctan \frac{-v_{Rt}}{u_{Rt}}
 \end{aligned}
 \tag{4.37}$$



sl. 2 Vektor brzine gibanja kormila

Budući da se kormilo nalazi iza trupa i u mlazu propelera, vektor brzine pritjecanja vode na kormilo nije jednak vektoru brzine gibanja kormila. Korekcije za utjecaj trupa i propelera mogu se provesti na slijedeći način:

$$\begin{aligned}
 V_R^2 &= u_{RPH}^2 + v_{RPH}^2 \\
 \beta_R &= \arctan \frac{-v_{RPH}}{u_{RPH}}
 \end{aligned}
 \tag{4.38}$$

gdje su  $u_{RPH}$  i  $v_{RPH}$  komponente brzine pritjecanja vode na kormilo iza propelera (P) i trupa (H) broda, a računaju se po formulama:

$$\begin{aligned}
 u_{RPH} &= u_{RH} + \varphi_u u_{PH} \\
 v_{RPH} &= v_{RH} + \varphi_v u_{PH}
 \end{aligned}
 \tag{4.39}$$

U ovom izrazu  $u_{RH}$  i  $v_{RH}$  su komponente brzine pritjecanja vode na kormilo bez upliva propelera,  $u_{PH}$  je uzdužna projekcija brzine pritjecanja vode na propeler iza trupa, a  $\varphi_u$  i  $\varphi_v$  su bezdimenzionalni koeficijenti (uzdužne i poprečne komponente) propelerom inducirane brzine:

$$\begin{aligned}
 u_{RH} &= (1 - w_R) u_{Rt} & u_{PH} &= (1 - w_P) u_{Pt} \\
 v_{RH} &= \gamma_R v_{Rt} & v_{PH} &= \gamma_P v_{Pt}
 \end{aligned}
 \tag{4.40}$$

gdje su:

$$\begin{aligned}
 u_{Rt} &= u & u_{Pt} &= u \\
 v_{Rt} &= v + x_R r & v_{Pt} &= v + x_P r \\
 V_{Rt} &= \sqrt{u_{Rt}^2 + v_{Rt}^2} & V_{Pt} &= \sqrt{u_{Pt}^2 + v_{Pt}^2} \\
 \beta_{Rt} &= \arctan \frac{-v_{Rt}}{u_{Rt}} & \beta_{Pt} &= \arctan \frac{-v_{Pt}}{u_{Pt}}
 \end{aligned}
 \tag{4.41}$$

parametri gibanja kormila i propelera.

Bezdimenzionalne veličine  $w_R(u, v, r, \delta)$ ,  $w_P(u, v, r, n)$ ,  $\gamma_R(u, v, r, \delta)$ ,  $\gamma_P(u, v, r, n)$  nazivaju se koeficijentima sustrujanja na kormilu odnosno propeleru i određuju se eksperimentalno modelskim ispitivanjem.

Veličine  $x_R$  i  $x_P$  su x-koordinate kormila i propelera, redosljedno. Budući da su propeler i kormilo smješteni krmi broda to su uvijek negativne veličine.

Koeficijenti propelerom induciranih brzina, prema impulsnoj teoriji vijka, mogu se prikazati u obliku:

$$\begin{aligned}
 \varphi_u &= \varepsilon_{RP} \left( \sqrt{1 + k_{RP} C_{Th}} - 1 \right) \\
 \varphi_v &= \varepsilon_{PI} \varphi_u
 \end{aligned}
 \tag{4.42}$$

gdje se veličine  $\varepsilon_{RP}$ ,  $\varepsilon_{PI}$  i  $k_{RP}$  u analizi rezultata modelskih ispitivanja smatraju konstantama.

Koeficijent  $C_{Th}$  naziva se koeficijentom opterećenja vijka porivom:

$$C_{Th} = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho \left( \frac{\pi D_P^2}{4} \right) u_{PH}^2} = \frac{8 K_T}{\pi J^2}
 \tag{4.43}$$

gdje su:

$T$	poriv propelera
$D_P$	promjer propelera
$u_{PH}$	uzdužna komponenta brzine pritjecanja vode na propeler prema (4.40)

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D_p^4}$$

koeficijent poriva vijka

$$J = \frac{u_{pH}}{n D_p}$$

koeficijent napredovanja vijka