XLIV KONFERENCIJA ZA ETRAN, SOKOBANJA, 26 – 29. JUNA, 2000.

OPTIMALNO UPRAVLJANJE KURSA BRODA

Ljubiša Draganović, Vladimir Zeljković, *LOLA Institut*, Beograd, Kneza Višeslava 70a

Sadžaj - U radu se najpre daje matematički model kretanja broda u horizontalnoj ravni i vrši linearizacija tog modela. Daje se model u prostoru stanja sa i bez poremećaja. Zatim se vrši sinteza optimalnog regulatora kursa koji minimizira integral odstupanja od zadatog kursa. Na kraju izlažu se rezultati simulacije za jedan konkretan brod specijalne namene za linearni i nelinearni model kada se uzme u obzir delovanje vetra sa i bez optimalnog regulatora. Daje se odziv broda po pravcu/kursu i pozicija broda sa i bez optimalog regulatora, takođe.

1. UVOD

Dinamika vođenja broda od interesa je kada se razmatra manevrabilnost i upravljivost broda i ono je neophodno kada se projektuju autopiloti, sistemi vođenja i navigacije broda. Dinamika broda određena je korištenjem Newtonovih zakona kretanja. Glavna poteškoća je u određivanju hidrodinamičkih sila i momenata koji deluju na korito broda. U opštem slučaju sile i moment koji deluju na brod složene su funkcije kretanja, tj, brzine, ugaone brzine i kretanja kormila, kao i od rasporeda tereta i pogonske sile broda [1], [2], [3].

Ako se brod razmatra kao kruto telo sa šest stepeni slobode onda ono ima tri stepena slobode koji odgovaraju translacijama u tri pravca i rotacijama oko tri ose. Jednačine kretanja konvencijonalno su pisane u odnosu na koordinatni sistem vezan za brod.

2. MATEMATIČKI MODEL BRODA

Za određivanje optimalnog regulatora, korišćen je u ovom radu, linearizovani matematički model kretanja broda [5]

$$(m - Y_{H\dot{v}})\cdot\dot{v} - Y_{Hv}\cdot v - Y_{H\dot{r}}\cdot\dot{r} + (m\cdot u_0 - Y_{Hr})\cdot r = Y_{H\delta}\cdot\delta$$

$$(I_z - N_{H\dot{r}})\cdot\dot{r} - N_{Hr}\cdot r - N_{H\dot{v}}\cdot\dot{v} - N_{Hv}\cdot v = N_{H\delta}\cdot\delta \qquad (1)$$

gde je: v - bočna brzina translacije broda,

r - ugaona brzina skretanja,

m, I_z - masa i momenat inercije oko z ose,

u_0 - brzina broda,

$Y_{H\bullet}$, $N_{H\bullet}$ - linearizovani hidrodinamički derivativi po promenljivoj ($\bullet$) bočne sile i momenta oko z ose,

δ - otklon kormila.

Rearanžiranjem se (1) može napisati kao standardna matrična jednačina u prostoru stanja [1]

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ 0 \end{bmatrix}\delta \qquad (2)$$

gde je $r = \dfrac{d\psi}{dt}$, a ψ - je ugao kusa broda.

Za detaljniju analizu neophodno je nekada u model uvrstiti i dinamiku davača i pokretača za otklanjanje kormila. Detaljnije o linearizaciji matematičkog modela i njegovom predstavljanju može se naći u [2], [3], [4] i drugoj literaturi.

Na osnovu (2) određuje se funkcija prenosa

$$G_1(s) = \frac{\psi(s)}{\delta(s)} = \frac{b_1 s + b_2}{s(s + a_1 s + a_2)} \qquad (3)$$

gde je:

$$a_1 = -a_{11} - a_{22},$$

$$a_2 = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21},$$

$$b_1 = b_{21},$$

$$b_2 = a_{21}b_{11} - a_{11}b_{21}.$$

Kada se u model broda uzmu u obzir sile i moment koji potiču od udara vetra, tada se sistema jednačina (1) proširuje sa desne strane sa dodatnom silom $Y_w(\psi_w,\psi)$ i dodatnim momentom $N_w(\psi_w,\psi)$ koji potiču od vetra. Pri tome je ψ_w ugao između kursa broda i vektora relativne brzine vetra.

Linearizacijom $Y_w(\psi_w,\psi)$ i $N_w(\psi_w,\psi)$ i uključenjem u sistema (1) dobija se sledeći model kretanja broda u prostoru stanja, sa prisustvom vetra

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ 0 \end{bmatrix}\delta + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (4)$$

Parametri a_{13} i a_{23} zavise od brzine i pravca vetra (statičke komponente), a e_1 i e_2 su su stohastičke komponente koje imaju karakter belog šuma i potiču od sila koje su posledica udara vetra.

Na osnovu (4) može se odrediti sledeća relacija

$$\psi(s) = \frac{(b_2 s + b_3)\delta(s)}{s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3} + \frac{a_{21}E_1(s)}{s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3} + \frac{(s - a_{11})E_2(s)}{s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3} \qquad (5)$$

gde su $E_1(s)$ i $E_2(s)$ Laplasove transformacije $e_1(t)$ i $e_2(t)$, respektivno.

Parametri u (5) dati su izrazima:

$$a_1 = -a_{11} - a_{22},$$

$$a_2 = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} - a_{23},$$

$$a_3 = a_{11}a_{23} - a_{13}a_{21}$$

$$b_2 = b_{21},$$

$$b_3 = a_{21}b_{11} - a_{11}b_{21}.$$

Bočna komponenta turbulencije može biti opisana spektralnom gustinom [1]

$$S_{La}(\omega) = \frac{\sigma_w^2 L}{2\pi}\frac{1+3(\omega L)^2}{\left[1+(\omega L)^2\right]^2} \tag{6}$$

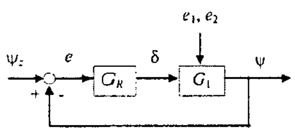
a longitudinalna komponenta sa

$$S_{Ma}(\omega) = \frac{\sigma_w^2 L}{2\pi}\frac{1}{1+(\omega L)^2} \tag{7}$$

gde je σ_w intenzitet turbulencije, L je foktor turbulencije (L=0.9h za visine h<300m).

3. SINTEZA OPTIMALNOG UPRAVLJANJA KURSA BRODA

Strukturna šema SAU kursa broda data je na sl. 1.



Sl. 3 *SAU kursa broda*

Sinteza algoritma upravljanja biće izvršena tako da se minimizira kriterijum optimalnosti

$$J = \int_0^\infty e(t)dt \tag{8}$$

izborom odgovarajuće strukture i parametara regulatora $G_R(s)$.

Kako funkcija prenosa broda $G_1(s)$, relacija (3), ima inherentno integralno dejstvo u samom objektu, to ćemo predpostaviti da je funkcija prenosa regulatora PD tipa, tj.

$$G_R(s)=K_P(1+T_D s) \tag{9}$$

gde su K_P i T_D parametri PD regulatora.

Na osnovu sl. 1. je

$$E(s) = \psi_z\left(1-\frac{G_R G_1}{1+G_R G_1}\right) = \psi_z\frac{1}{1+G_R G_1} \tag{10}$$

Uvrštavajući (3) i (9) u (10) dobija se

$$E(s) = \frac{(s+a_1 s+a_2)\psi_z(s)}{s^3+s^2(a_1+K_P T_D b_1)+s(K_P b_1+K_P T_D b_2+a_2)+K_P b_2} \tag{11}$$

Primenom teoreme o konačnoj vrednosti, kriterijum (8) se može sračunati kao

$$J = \int_0^\infty e(t)dt = \lim_{t\to\infty}\int_0^t e(\tau)d\tau = \lim_{s\to 0} s\frac{E(s)}{s} = E(0) \tag{12}$$

Koristeći relaciju (11) dobija se

$$J = \frac{a_2}{K_P b_2}, (\psi_z = 1(t) \equiv \frac{1}{s}) \tag{13}$$

Polazeći od Vijetovih pravila za polinome, na osnovu karakteristične jednačine sistema (11) može se napisati

$$\sigma_1\sigma_2\sigma_3 = -K_P b_2 \tag{14}$$

$$\sigma_1\sigma_2+\sigma_2\sigma_3+\sigma_3\sigma_1 = K_P b_1 + K_P T_D b_2 + a_2 \tag{15}$$

$$\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3 = -(a_1+K_P T_D b_1) \tag{16}$$

gde su σ_1, σ_2 i σ_3 koreni karakteristične jednačine sistema (11).

Na osnovu (14) izraz (13) se može napisati kao

$$J = \frac{-a_2}{\sigma_1\sigma_2\sigma_3} \tag{17}$$

Da bi minimizirali (17) uvedimo "novu" funkciju u obliku

$$J = \frac{-a_2}{\sigma_1\sigma_2\sigma_3} + \lambda(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3-a_1-K_P T_D b_1) \tag{18}$$

gde je λ - Lagranžov multiplikator, a relacija (16) iskorištena je kao ograničenje.

Da bi (13) imalo ekstremum mora biti

$$\frac{\partial J}{\partial\sigma_1} = \frac{\partial J}{\partial\sigma_2} = \frac{\partial J}{\partial\sigma_3} = \frac{\partial J}{\partial\lambda} = 0 \tag{19}$$

ili

$$\frac{\partial J}{\partial\sigma_1} = \frac{a_2}{\sigma_1^2\sigma_2\sigma_3} + \lambda = 0 \tag{20}$$

$$\frac{\partial J}{\partial\sigma_1} = \frac{a_2}{\sigma_1\sigma_2^2\sigma_3} + \lambda = 0 \tag{21}$$

$$\frac{\partial J}{\partial\sigma_1} = \frac{a_2}{\sigma_1\sigma_2\sigma_3^2} + \lambda = 0 \tag{22}$$

$\frac{\partial J}{\partial\lambda} = 0$ degeneriše se u (16).

Na osnovu (20) - (22) dobija se

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma \tag{23}$$

Ekstremum (17) se dobija kada su koreni karakteristične jednačine iyraya (11) jednaki medusobno.

Uvrštavajući u (14)-(16) jednakost $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma$ i eliminišući K_P i T_D iz tih jednačina dobija se karakteristična jednačina (11) koja ima rešenja za σ vrednost

$$\sigma = C^{1/3} - \frac{b_2}{b_1} \tag{24}$$

gde je $C = \frac{b_2^3}{b_1^3} - a_1\frac{b_2^2}{b_1^2} + a_2\frac{b_2}{b_1}$.

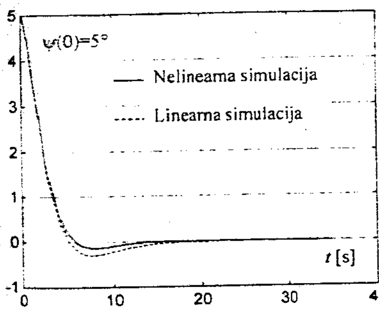
Sada su, na osnovu (24) i sistema (14)-(16), vrednosti optimalnih parametara PD regulatora

$$K_{Popt} = -\frac{1}{b_2}\left(C^{1/3} - \frac{b_2}{b_1}\right)^3 \tag{25}$$

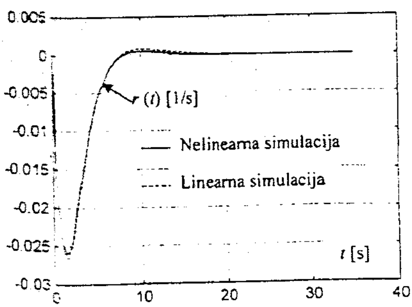
$$T_{Dopt} = \frac{3\left(C^{1/3} - b_2/b_1\right) + a_1}{-\frac{b_1}{b_2}\left(C^{1/3} - \frac{b_2}{b_1}\right)^3} \tag{26}$$

4. REZULTATI SIMULACIJE

Razmatra se rečni brod sa parametrima a_1=0.5665, a_2=0.0061, b_1=-0.1091, b_2=-0.0273. Određeni su parametri optimalnog regulatora K_{Popt} =-4.9517 i T_{Dopt} =1.799. Urađena je simulacija linearnog modela za početne uslove $\psi(0)$=5°, sl.2.



a) Kurs broda

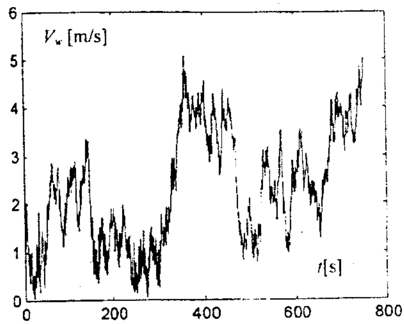


b) Ugaona brzina skretanja

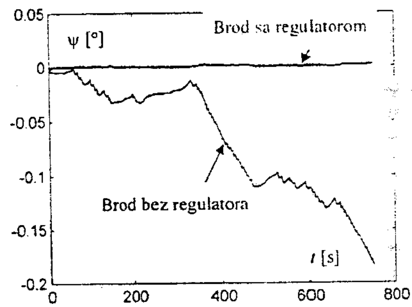
Sl 2. *Linearna i nelinearna simulacija kretanja broda pri* $\psi(0)$=5°

Prelazni proces pokazuje svođenje stacionarne greške na nulu, pri čemu se pojavljuje preskok u odzivu. Radi upređenja, urađena je simulacija nelinearnog modela, prema relacijama za nelinearni model datim u [5]. Pokazuje se relativno velika bliskost odziva linearnog i nelinearnog sistema.

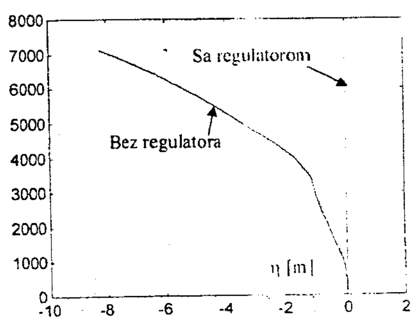
U cilju razmatranja uticaja vetra urađena je nelinearna simulacija kretanja broda bez regulatora i sa optimalnim regulatorom, sl 3. Vetar je zadavan, pod uglom ψ_w=45°, u obliku srednjeg intenziteta V_{Lw}=1m/s i turbulencije sa σ_w=10m/s.



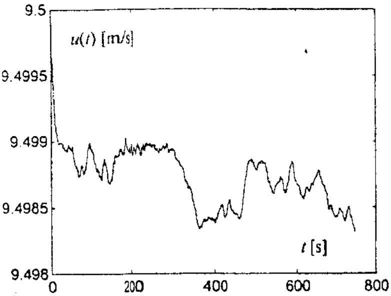
a) Vetar



b) Ugao kursa



c) Putanja broda



d) Uzdužna brzina broda

Sl 3. *Nelinearna simulacija udara vetra na kretanje broda sa i bez regulatora*

Pokazuje se da vetar utiče na promenu putanje broda (promenu kursa i odstupanje položaja) kada nema regulatora i kada se ne vrši korakcija putanje broda otklonom kormila. Simulacija kretanja broda sa uključenim regulatorom pokazuje veoma malo (zanemarljivo) odstupanje putanje i održavanje kursa broda oko nule. Ne pokazuje se potreba uključenja integralnog člana u optimalni regulator jer se ne oučava statička greška kursa broda.

5. ZAKLJUČAK

U radu je pokazan način određivanja oprimalnog regulatora broda. Brod je predstavljen lineranim modelon. Određivanje parametara regulatora je rađeno minimizacijom integralnog kriterijuma. Izvedene su relacije za izračunavanje pojačanja i vremenske konstante regulatora. Pokazuje se da optimalni regulator daje ista rešenja karakterističnog polinoma zatvorenog sistema, u slučaju broda su to 3 ista aperiodična pola. Odziv ovakvog sistema ima preskok koji potiče od nula u funkciji prenosa po gršci.

U cilju ilustracije metoda urađena je analiza rečnog broda. Izračunati su parametri optimalnog regulatora i pokazan odziv na početne uslove. Upoređenjem prelaznog procesa linearnog i nelinearnog modela se vidi velika bliskost u vremenskom zapisu koordinata stanja, kao i svođenje statičke greške na nulu. Uticaj vetra, kao stacionaran i turbulencija, je razmatran kroz simulaciju na nelinearnom modelu broda. Pokazuje se da, predhodno određen optimalni regulator dobro kompenzuje uticaj vetra.

LITERATURA

[1] K. J. ÅSTRÖM, C. G. KÄLLSTRÖM, "Identification of Ship Steering Dynamics" *Automatica*, Vol. 12, pp. 9-22, 1976.

[2] V. Zeljković, Lj. Draganović, *Dinamika i automatsko upravljanje broda*, LOLA Institut, 2000.

[3] Grua autora, *Principles of NAVAL ARCHITECTURE*. 5th reprinting, Editor E. V. Lewis, The Society of Naval Architecturs and Marine Engineers, New York, 1980.

[4] V. Zeljković, Lj. Draganović, Dinamičko modeliranje rečnog broda, *Etran*, 2000.

[5] M. Stojić, S. Vuković, Lj. Draganović, Process Control Structure and Optimal Tunning of a Digital PID Controller, FACTA UNIVERSITATIS, Univerzity of Niš, 1999.

Abstract - *In this paper, the linear mathematical model of ship motion is presented. The model includes wind forces. Than, the optimal regulator is derived to minimise integral criteria. The effect of optimal regulator, in case of initial conditions and wind destubancies, is ilustrated to small ship..*

OPTIMAL COTROL APPLY TO SHIP YAW STEERING

Ljubiša Draganović, Vladimir Zeljković,

LOLA Institut, Beograd