

Mr.sc Joško Dvornik
Dr.sc. Matijo Oršulić
Mr.sc. Kolja Jurišić
Pomorski fakultet u Splitu
Split, Zrinjsko-frankopanska 38

Prethodno priopćenje
UDK: 004.94
621.436
621.313.322
Primljeno: 13. svibnja 2004.
Prihvaćeno: 26. svibnja 2004.

SIMULACIJA DINAMIKE PONAŠANJA BRODSKOGA DIESEL- MOTORA POD OPTEREĆENJEM

Simulacijsko modeliranje, uz pomoć Sustavne dinamike i intenzivnoga korištenja suvremenih digitalnih računala, što podrazumijeva i masovnu primjenu, danas veoma jeftinih, a istovremeno veoma moćnih personalnih računala (PC-a), jedna je od najprimjerenijih i najuspješnijih znanstvenih načina istraživanja dinamike ponašanja nelinearnih i veoma složenih, prirodnih, tehničkih i organizacijskih sustava. Svrha ovoga rada jest pokazati uspješnost primjene sustavno dinamičkog simulacijskog modeliranja, pri istraživanju dinamike ponašanja složenoga sustava brodskoga Diesel agregata. Brodski Diesel agregat biti će predstavljen skupom nelinearnih diferencijalnih jednačji tj. kontinuiranim simulacijskim modelom višega reda, odnosno tzv. jednačjbama stanja, te će on ujedno biti i diskretni simulacijski model jer strogo zadovoljava odabranu veličnu osnovnoga računskoga integracijskoga koraka ΔT , u skladu s Teoremom o uzorkovanju, (Shannon-Koteljnikov-Nyquist-Sampling teorem). U radu je dat matematički model sustava koji se sastoji od modela brodskog diesel-motora i modela brodskog sinkronog generatora na osnovu kojega se izrađuju sustavno dinamički kvalitativni (mentalno-verbalni, strukturni i dijagramski model) i kvantitativni model (sustavno dinamički matematički i kompjutersko simulacijski model), te je predstavljen scenarij mješovitih pogonskih stanja.

Ključne riječi: simulacija, Sustavna dinamika, modeliranje, diesel- motor, sinkroni generator, heuristička optimizacija.

1. UVOD

Obzirom da u praksi egzistira veliki broj različitih diesel- motora, pokazuje se veoma korisnim i efikasnim izgradnja jedinstvenoga općega modela koji bi bio primjenjiv na svaki posebni tip stroja. Ovo naročito dolazi do izražaja kod

izgradnje kompleksnih matematičkih modela diesel- strojeva koji uključuju sve bitne podprocese:

- opisivanje stanja radnoga medija (gorivo, zrak),
- dinamiku mehaničkog sistema,
- sistem hlađenja,
- sistem podmazivanja, kao i njihove međusobne interakcije.

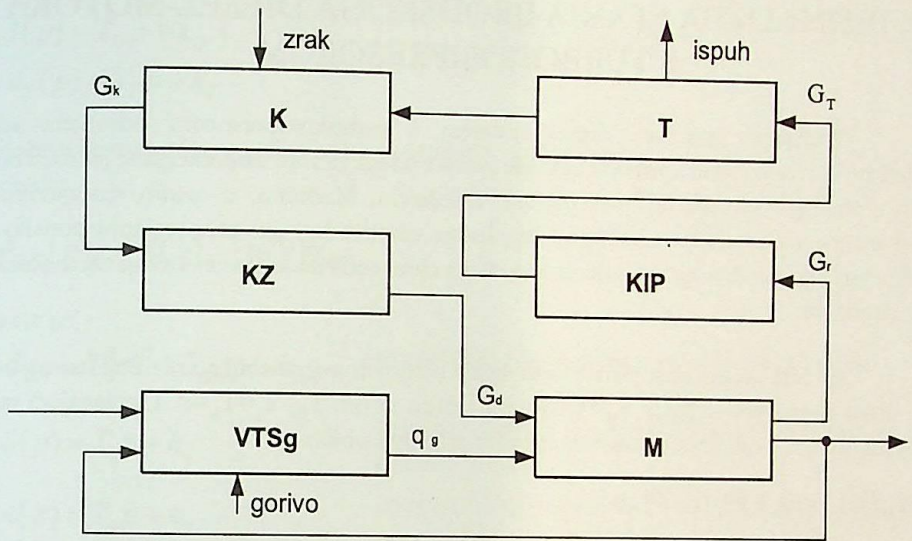
Međutim, u modeliranju diesel - motora za potrebe kompjutorsko simulacijskog modela, ne ide se sa tako kompleksnim modelom. Ostali podprocesi ukupnog modela indirektno su uključeni preko vrijednosti raznih parametara koji su definirani za određena stacionarna stanja.

Sam proces rada diesel- motora ima u jednom svom dijelu (proces ubrizgavanja, paljenja, gorenja i izgaranja smjese) diskretni karakter pa je zasigurno diskretni model stroja egzaktniji. S obzirom da je za brzohodne diesel- strojeve vrijeme diskretizacije (period ubrizgavanja) mnogo manje od dominantnih vremenskih konstanti samog procesa, to se diskretni model veoma približava kontinuiranom, pa će u ovom radu biti razmatran samo kontinuirani model stroja.

Na slici 1. prikazana je principijelna shema brodskoga diesel -motora s nabijanjem zraka pomoću turbokompresora. Sa slike se uočavaju ove osnovne funkcionalne cjeline:

- motorni mehanizam (M),
- kolektor ispušnih plinova (KIP),
- turbina (T) i kompresor (K) turbokompresora,
- kolektor ispirnog zraka (KZ),
- visokotlačna sisaljka goriva (VTSg).

svakoj od navedenih funkcionalnih cjelina dodijeljene su, za model relevantne, ulazne i izlazne varijable, varijable stanja i poremećaja, koje povezuju ove dijelove u jedinstveni multivarijabilni sistem.



Slika 1. Principijelna shema brodskoga diesel-motora

Gdje je:

- M - motor,
- KIP - kolektor ispušnih plinova,
- T - turbina,
- K - kompresor,
- KZ - kolektor zraka,
- VTSg - visokotlačna sisaljka goriva,
- Ω - kutna brzina koljeničastoga vratila motora -KV,
- G_r - količina ispušnoga plina koja iz motora ulazi u KIP,
- p_r - tlak ispušnoga plina u KIP,
- ρ_r - gustoća ispušnoga plina,
- G_T - količina ispušnoga plina u protoku kroz turbinu,
- Ω_T - kutna brzina turbokompresora,
- G_k - količina zraka koju dobavlja turbokompresor u KZ,
- p_k - tlak zraka u kolektoru,
- ρ_k - specifična masa zraka u KZ,
- χ - djelovanje regulatora,
- q_g - količina goriva koju motoru dobavlja VTS.

2. JEDNADŽBA STANJA BRODSKOGA DIESEL-MOTORA S TURBOKOMPRESOROM

Dinamička svojstva diesel- motora s turbokompresorom određena su dinamičkim svojstvima pripadajućih elemenata (sl.1.), te zato diferencijalne jednadžbe tih elemenata moraju biti promatrane zajednički. Međutim, u nekim slučajevima pri malim volumenima usisnoga i ispušnoga cjevovoda i pri nepostojanju plinsko-dinamičkoga prednabijanja, utjecaj volumena cjevovoda na dinamička svojstva motora je neznatan.

To daje mogućnost pojednostavljenja njegovih jednadžbi kao rezultat uzimanja u obzir pretpostavki da je $V_B \approx V_r \approx 0$ te u skladu sa tim $T_B = T_r = T_h = 0$. Uvažavajući taj uvjet, sistem jednadžbi elemenata motora poprima oblik:

$$\begin{aligned} d_D(p)_\varphi &= \chi + \Theta_k \rho - \Theta_D \alpha_D \\ d_T(p)_{\varphi_T} &= \xi + \Theta_{T1} \chi - \Theta_{T2} \rho \end{aligned} \quad (1)$$

$$k_{B\varphi} = \varphi_T - \Theta_B \varphi$$

$$k_r \xi = \varphi + \Theta_r \rho - k_h \chi$$

Budući da se u radu istražuje sustav dinamičkog modeliranja s aspekta broja okretaja, potrebno je istraživati promjenu po vremenu kutne brzine koljeničastoga vratila diesel-motora. Iz tog razloga rezultirajuća jednadžba motora može se prikazati u obliku:

$$\varphi = \Delta\varphi$$

gdje determinante sistema jednadžbi (1) poprimaju oblik:

$$\varphi = \begin{vmatrix} d_D(p) & 0 & -\Theta_k & 0 \\ 0 & d_T(p) & \Theta_{T2} & -1 \\ \Theta_B & -1 & k_B & 0 \\ -1 & 0 & -\Theta_r & k_r \end{vmatrix}$$

$$\Delta\varphi = \begin{vmatrix} \chi - \Theta_D \alpha_D & 0 & -\Theta_k & 0 \\ \Theta_I \chi & d_T(p) & \Theta_{Tr} & -1 \\ 0 & -1 & k_B & 0 \\ -k_h \chi & 0 & -\Theta_r & k_r \end{vmatrix}$$

Rješenjem ovih determinanti i uzimajući u obzir izraze:

$$d(p) = T_D p + k_D \text{ i}$$

$$d_T(p) = T_T p + k_T$$

dobiva se mogućnost prikazivanja jednadžbe diesel- motora sa turbokompresorom u obliku:

$$d_{DH}(p)_\varphi = S(p)_\chi - u(p)\alpha_D \quad (2)$$

gdje je:

$$d_{DH} = T_H^2 p^2 + T_{DH} p + k_{DH} \quad \text{pripadajući operator motora sa turbopuhalom}$$

$$S(p) = T_s p + k_s \quad \text{operator djelovanja sa strane organa upravljanja dovoda goriva}$$

$$u(p) = T_u p + k_u \quad \text{operator djelovanja sa strane podešavanja potrošača}$$

Zavisnost koeficijenata prethodnih izraza od parametara elemenata koji ulaze u sustav motora imaju oblik:

$$T_H^2 = T_D T_T k_s k_r$$

$$T_{DH} = [T_D (k_B k_T + \Theta_{T2}) + T_T (k_D k_B + \Theta_B \Theta_k)] k_r - \Theta_r T_D$$

$$k_{DH} = k_D k_r (k_B k_T + \Theta_{T2}) - \Theta_k (1 - k_T k_r \Theta_B) - \Theta_r k_D$$

$$T_s = T_T \Theta_D k_D k_r$$

$$k_s = k_r (k_B k_T + \Theta_k \Theta_{T1} + \Theta_{T2}) - \Theta_k k_h - \Theta_r$$

$$k_u = \Theta_D k_r (k_B k_T + \Theta_{T2}) - \Theta_r \Theta_D$$

Jednadžba (2) u diferencijalnom obliku je:

$$T_H^2 \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + T_{DH} \frac{d\varphi}{dt} + \varphi k_{DH} = T_s \frac{d\chi}{dt} + \chi k_s - T_u \frac{d\alpha_D}{dt} - k_u \alpha_D \quad (3)$$

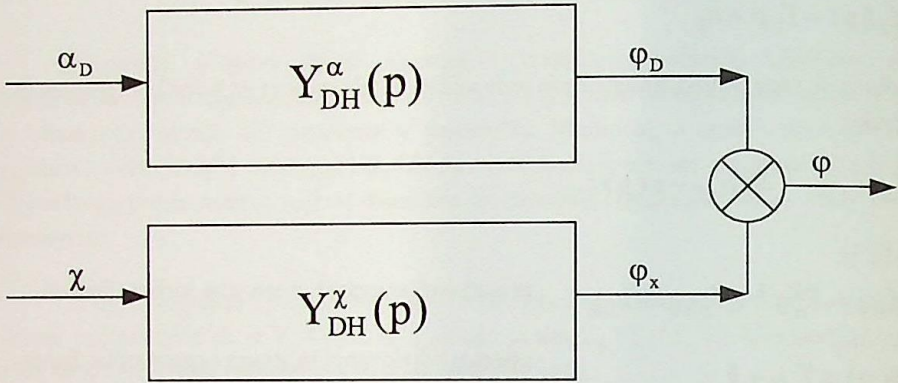
Ako sve članove jednadžbe (2) podijelimo sa pripadajućim operatorom slijedi:

$$\varphi = Y_{DH}^\chi(p)_\chi + Y_{DH}^\alpha(p)\alpha_D$$

gdje prijenosne funkcije:

$$Y_{DH}^\chi(p) = \frac{S(p)}{d_{DH}(p)} = \frac{T_s p + k_s}{T_H^2 p^2 + T_{DH} p + k_{DH}}$$

daju mogućnost da se načini shema motora sa prednabijanjem pogodnija od one na slici 2.



Slika 2. Pojednostavljena strukturna shema D.M. sa prednabijanjem

3. JEDNADŽBE STANJA BRODSKOG SINKRONOG GENERATORA

Prijelazni procesi u sinkronim generatorima mogu se opisati sljedećim nizom, eksplicitnim oblikom, nelinearnih diferencijalnih jednadžbi [4]:

$$\frac{d\Psi_d}{dt} = -\frac{r_s}{x_s}\Psi_d + A\Psi_q\omega + \frac{r_s}{x_s}\Psi_{ad} + u_d$$

brzina magnetskoga toka kruga statora po osi d (4)

$$\frac{d\Psi_q}{dt} = -\Psi_d\omega - \frac{r_s}{x_s}\Psi_q + \frac{r_s}{x_s}\Psi_{aq} + u_q$$

brzina magnetskoga toka kruga statora po osi q (5)

$$\frac{d\Psi_f}{dt} = -\frac{r_f}{x_f}\Psi_f + \frac{r_f}{x_f}\Psi_{ad} + u_f$$

brzina magnetskoga toka omotača uzbude (6)

$$\frac{d\Psi_{1d}}{dt} = -\frac{r_{1d}}{x_{1d}}\Psi_{1d} + \frac{r_{1d}}{x_{1d}}\Psi_{ad}$$

brzina magnetskoga toka prigušnih krugova po osi d (7)

$$\frac{d\Psi_{1q}}{dt} = -\frac{r_{1q}}{x_{1q}}\Psi_{1q} + \frac{r_{1q}}{x_{1q}}\Psi_{aq}$$

brzina magnetskoga toka prigušnih krugova po osi q (8)

Gdje je:

- Ψ_d – magnetski tok kruga statora po osi d,
- r_s – aktivni otpor kruga statora,
- x_s – induktivni otpor rasipanja kruga statora,
- Ψ_q – magnetski tok kruga statora po osi q,
- ω – kutna brzina,
- Ψ_{ad} – magnetski tok uzajamne indukcije kontura po osi d,
- u_d – napona u konturama statora po osi d,
- Ψ_{aq} – magnetski tok uzajamne indukcije kontura po osi q,
- u_q – napona u konturama statora po osi q,
- u – napon u konturama statora,
- Ψ_f – magnetski tok omotača uzbude,
- r_f – aktivni otpor omotača uzbude,
- u_f – napon uzbude,
- Ψ_{1d} – magnetski tok prigušnih krugova po osi d,
- r_{1d} – aktivni otpor prigušnih krugova po osi d,
- x_{1d} – induktivni otpor prigušnih krugova po osi d,
- Ψ_1 – magnetski tok prigušnih krugova po osi q,
- r_{1q} – aktivni otpor prigušnih krugova po osi q,
- x_{1q} – induktivni otpor prigušnih krugova po osi q,

4. KOMPJUTERSKO-SIMULACIJSKI MODEL BRODSKOGA DIESEL-MOTORA

4.1. Sustav dinamički matematički model brodskoga diesel- motora

Sustav dinamički matematički model brodskoga diesel -motora s turbopuhalom može se definirati izrazom (eksplicitni oblik jednadžbe 3.):

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = -\frac{d\varphi}{dt} \frac{T_{DH}}{T_H^2} - \varphi \frac{k_{DH}}{T_H^2} + \frac{d\chi}{dt} \frac{T_S}{T_H^2} + \chi \frac{k_S}{T_H^2} - \frac{d\alpha_D}{dt} \frac{T_u}{T_H^2} - \alpha_D \frac{k_u}{T_H^2} \quad (9)$$

Gdje je:

$d^2 \varphi / dt = D2F1$	- akceleracija kutne brzine koljeničastoga vratila motora (K.V.)
$d \varphi / dt = D1F1$	- brzina promjene kutne brzine K.V. motora (gradijent brzine)
$T_{DH} = TDH$	- vrijeme koje karakterizira inertnost motora kao reguliranoga objekta
$T_H^2 = TH2$	- kvadrat vremena koje karakterizira inertnost motora kao reguliranoga objekta
$T_S = TS$	- vrijeme koje karakterizira inertnost motora
$d \chi = DKAPA$	- brzina pomaka zupčane letve visoko- tlačne sisaljke (VTS) goriva
$\chi = KAPA$	- relativni pomak zupčane letve VTS goriva
$k_s = KS$	- koeficijent pojačanja motora
$d \alpha_d = DALFAD$	- brzina promjene relativnoga opterećenja potrošača
$\alpha_d = ALFAD$	- relativna promjena opterećenja potrošača
$T_u = TU$	- vrijeme koje karakterizira inertnost generatora
$k_u = KU$	- koeficijent pojačanja vanjskoga opterećenja motora
$\varphi = FI$	- relativna promjena kutne brzine K.V.
$k_{DH} = KDH$	- faktor zavisan od koeficijenta samoizjednačavanja i koeficijenta pojačanja motora
ALFAD	- vanjsko opterećenje motora
SLOPE	- subrutina prve derivacije (KAPA I ALFAD)

Temeljem danog matematičkoga modela brodskoga diesel- motora mogu se izraditi sustavno-dinamički simulacijski modeli, tj. mentalno-verbalni, strukturni, dijagram toka i kompjuterski model promatranoga realiteta brodskoga diesel- motora.

4.2. Sustav dinamičko mentalno verbalni model brodskoga diesel- motora

“Ako raste brzina promjene kutne brzine koljeničastoga vratila motora $d\varphi/dt$ smanjivati će se akceleracija (brzina brzine promjene) kutne brzine koljeničastoga vratila motora $d^2\varphi/dt$, iz čega slijedi “negativan” (-) predznak promatrane uzročno- posljedične veze.

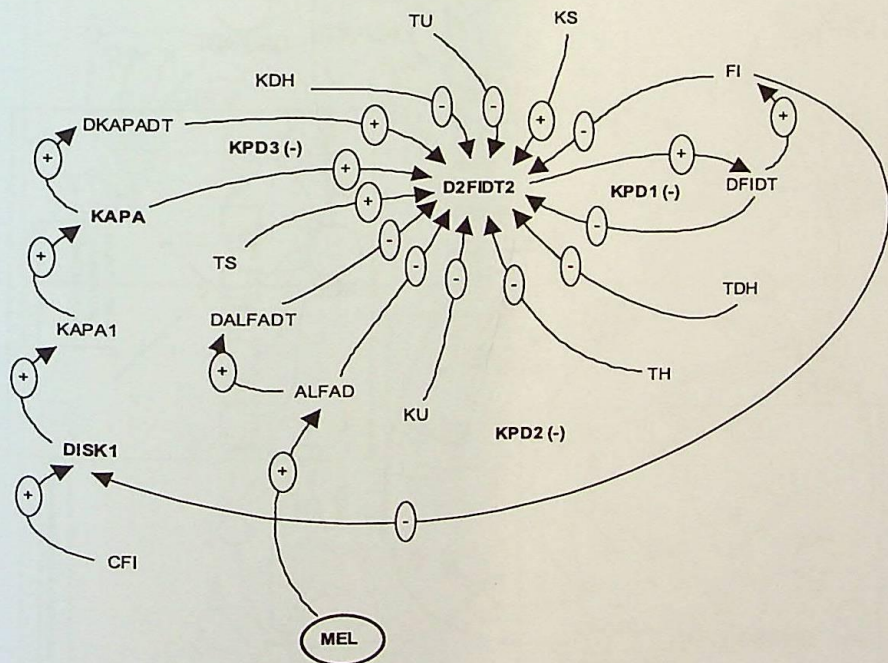
Ako raste kutna brzina koljeničastoga vratila motora te ako raste brzina promjene relativnoga opterećenja potrošača $d\alpha_d$, smanjivat će se akceleracija (brzina brzine promjene) kutne brzine koljeničastoga vratila motora $d^2\varphi/dt$ iz čega slijedi “negativan” (-) predznak promatrane uzročno- posljedične veze. Ako raste vrijeme koje karakterizira inertnost generatora T_u , te koeficijent pojačanja vanjskoga opterećenja motora k_u i ako raste i vrijeme koje karakterizira inertnost motora kao reguliranoga objekta T_{DH} , smanjivat će se akceleracija (brzina brzine promjene) kutne

brzine koljeničastoga vratila motora $d^2\varphi/dt$ iz čega slijedi "negativan" (-) predznak promatrane uzročno- posljedične veze. Ako raste relativni pomak zupčane letve VTS goriva χ kao i brzina pomaka zupčane letve visokotlačne sisaljke (VTS) goriva $d\chi$, rast će i akceleracija (brzina brzine promjene) kutne brzine koljeničastoga vratila motora $d^2\varphi/dt$, iz čega slijedi "pozitivan" (+) predznak promatrane uzročno- posljedične veze. Ako raste vrijeme koje karakterizira inertnost motora T_s kao i koeficijent pojačanja motora

k_s , rast će i akceleracija (brzina brzine promjene) kutne brzine koljeničastoga vratila motora, $d^2\varphi/dt$ iz čega slijedi "pozitivan" (+) predznak promatrane uzročno- posljedične veze"

4.3. Sustav dinamičko strukturalni model broskoga diesel- motora

Na temelju navedenog mentalno-verbalnoga modela moguće je izraditi strukturalni dijagrama koji je prikazan na Sl. 3.



Slika 3. Strukturalni model broskoga diesel- motora

U promatranom sistemu egzistiraju nekoliko krugova povratnih djelovanja (KPD):

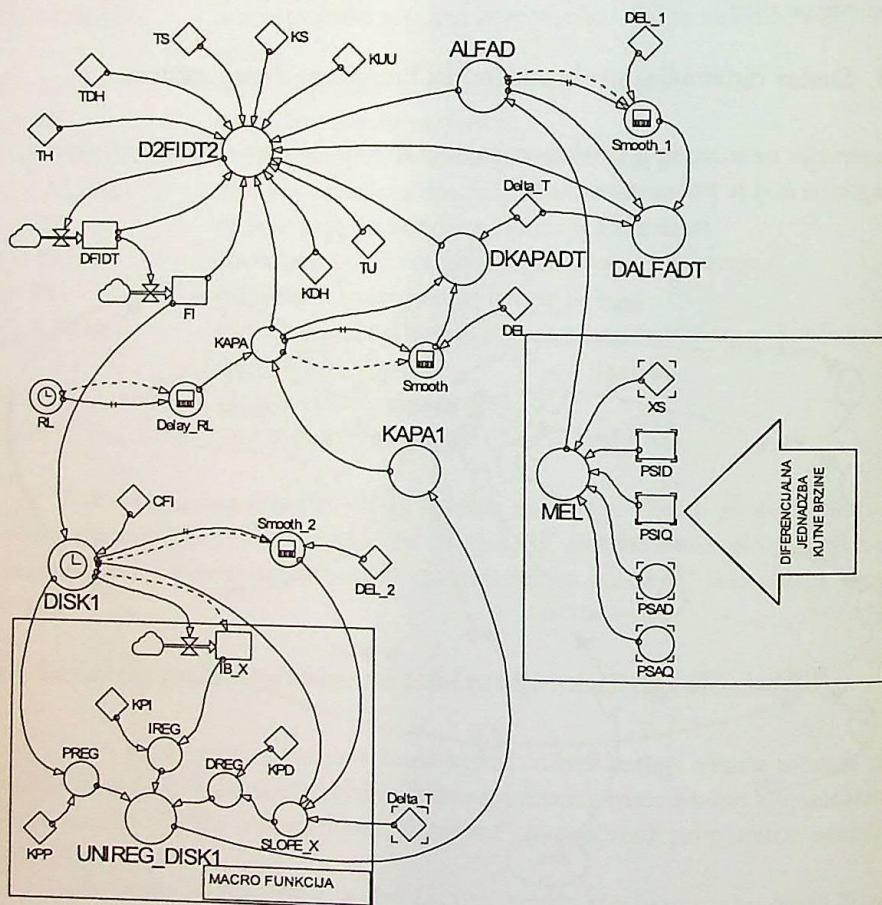
1. KPD1(-):D2FIDT2(+)=>DFIDT(+)=>FI=>D2FIDT2
2. KPD2(-):FI(-)=>DISK1(+)=>KAPA1(+)=>KAPA(+)=>D2FIDT2(+)

=>DFIDT(+)=>FI

3. KPD3(-):FI(-)=>DISK1(+)=>KAPA1(+)=>KAPA(+)=>DKAPADT(+)=>D2FIDT2(+)=>DFIDT(+)=>FI

4.4. Sustav dinamički dijagram toka brodskoga diesel- motora

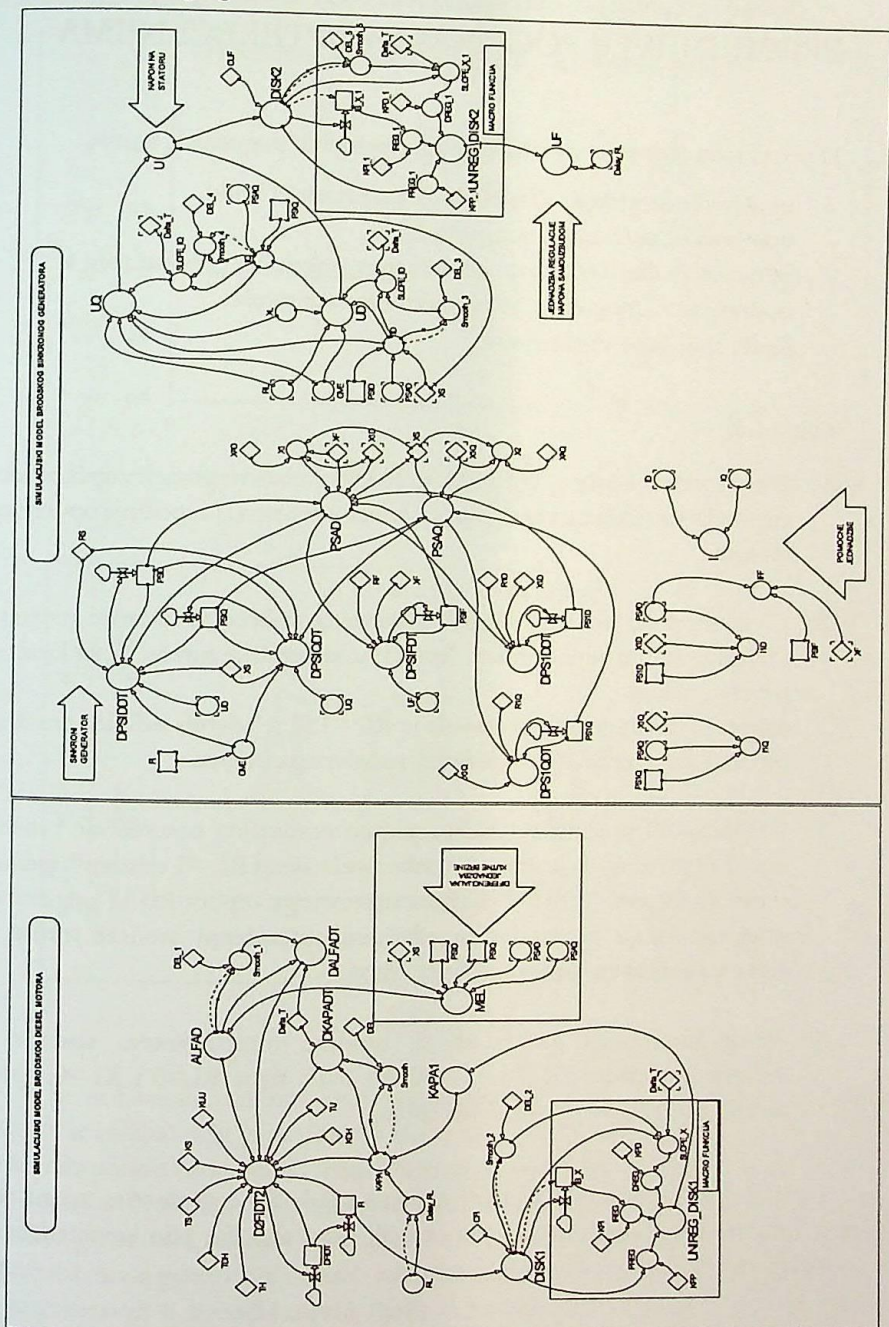
Na temelju izradenoga mentalno-verbalnoga i strukturnoga modela izrađuje se dijagram toka, koji je prikazan na sl. 4.



Slika 4. Dijagram toka brodskoga diesel- motora s UNIREG regulatorom

Sustav dinamičkog kvalitativnog i kvantitativnog modela brodskog sinkronog generatora određuju se na jednak način, a zbog ograničenosti prostora izlaganja na sljedećoj slici prikazan je globalni sustav dinamičkog dijagrama toka složenog sustava

brodskog diesel-agregata.



Slika 5. Globalni sustav dinamičkog simulacijskog modela brodskog diesel motora agregata u powersim simulacijskom jeziku

5. SIMULACIJA DINAMIKE PONAŠANJA PRI PROMJENJIVIM POGONSKIM OPTEREĆENJIMA

U ovom radu opisan je zajednički slučaj mješovitih pogonskih stanja:

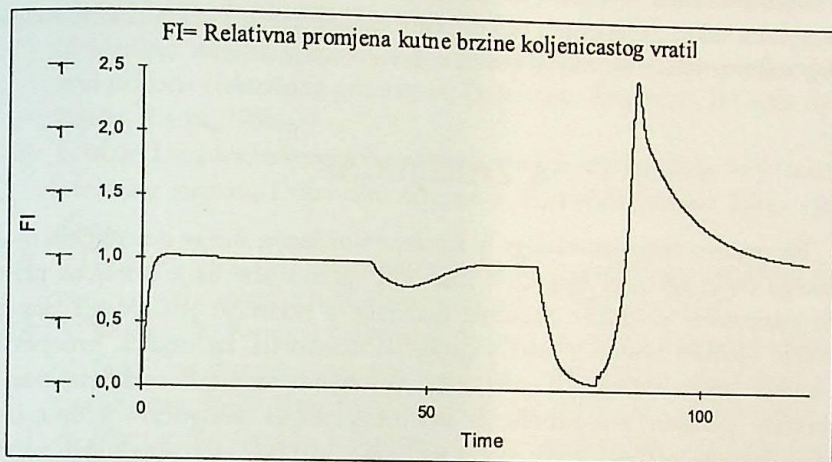
- upućivanje broskog diesel- motora u praznom hodu,
- upućivanje generatora u praznom hodu,
- opterećenje diesel- motora opterećenoga sinkronim generatorom s nominalnom mogućom potrošnjom brodske mreže,
- kratki spoj složenoga sustava.

Odnosno:

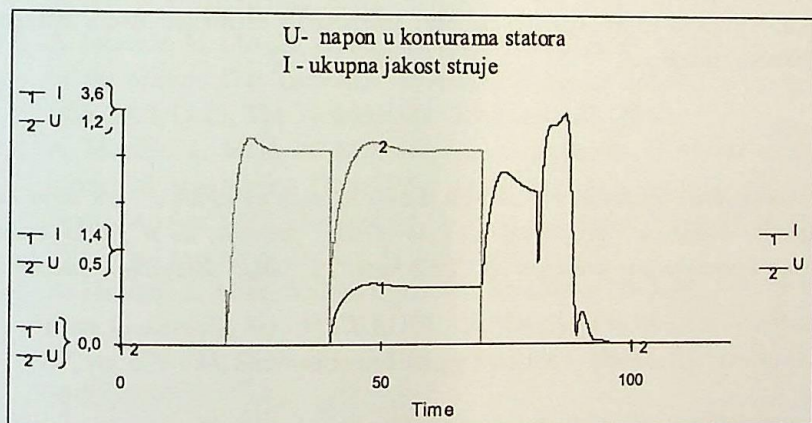
1. Diesel- motor starta u $TIME=0$, tj. KAPA (relativni pomak zupčane letve visokotlačne sisaljke goriva) je pomaknuta (otvorena) i započinje upućivanje motora.
2. U vremenskom trenutku $TIME =20$ upućuje se brodski sinkroni generator i njegov samouzbudni proces. Imendancija brodske mreže, tj. sinkronoga generatora koji napaja tu mrežu, uzima se kao da je $RL =150$ relativnih jedinica omskoga otpora i reaktancija $XL =0$ jedinica reaktivnoga otpora.
3. U $TIME=40$ se simulira snažno udarno nominalno opterećenje brodske mreže te se uzima da je otpor brodske mreže svega $RL =1$ relativnih jedinica omskoga otpora i $XL=1$ jedinica reaktivnoga otpora što bi odgovaralo nominalnom (u ovom slučaju udarnom opterećenju brodske mreže na sinkroni generator odnosno diesel - motor).
4. Stator sinkronoga generatora tj. brodsku mrežu kratko spajamo u vremenskom trenutku $TIME =70$ što znači da je $RL=0$ i $XL=0$, pa je diesel -generator u tzv. kratkom spoju.

Ovaj složeni simulacijski scenarij zapravo obuhvaća i prezentira mogućnost da se u jednom simulacijskom eksperimentu ili testu simulira više karakterističnih pogonskih stanja broskog diesel- generatora.

Grafički rezultati simulacije:



Slika 6. FI



Slika 7. U, I

Iz dobivenih rezultata svih pogonskih stanja broskoga diesel generatora moguće je zaključiti da je ovaj zadnji slučaj opterećenja kratkoga spoja najopasniji jer dovodi do pojave vrlo snažnih struja kratkoga spoja brodske mreže, odnosno stvaranja Bio-Savart-ovih sila koje mogu izazvati fizičko oštećenje svih dijelova brodske mreže, naročito generatora, motora i specijalnih uređaja. Istovremeno, akumulirana energija rotirajućih masa generatora i diesel- motora koja se akumulirala u elektromagnetskom polju generatora tj. brodske mreže, može dovesti do tzv. motorskoga rada sinkronoga generatora, te sinkroni generator (sada motor) može značajno zarotirati diesel motor. Da se smanji opasnost od mogućega pretjeranoga rotiranja diesel- agregat te fizičkoga oštećenja brodske mreže, u modelu je ugrađena učinkovita sklopna zaštita te vidimo

da u momentu kada je napon $U=0$ djeluje relativno brzo sklopka, koja iskapča samouzbudni sklop generatora i nešto sporije djeluje zaštitna sklopka koja isključuje KAPA, kojim se isključuje dovod goriva u diesel- motor.

6. ZAKLJUČAK

Na osnovu svega iznesenoga tj. izvršene simulacije, sustav dinamičkih modela brodskoga diesel agregata moguće je zaključiti i preporučiti da je primjena pristupa novije znanstvene discipline Sustavne dinamike u području istraživanja dinamike ponašanja složenih brodskih sustava neobično učinkovita, racionalna, prospektivna i edukativno opće društveno korisna, kako za studente tehničkih fakulteta, tako i za diplomirane inženjere svih profila, jer ista metodologija omogućava jeftinu, brzu i preciznu metodu stjecanja novih znanja pa i umijeća u području strojarških sustava i procesa.

U ovoj kratkoj prezentaciji daju se svi potrebni podaci i mogućnost prikupljanja dodatnih znanja o istom sustavu na brz, znanstveno utemeljen način istraživanja kompleksnog sustava.

Što znači:

“Ne simuliraj dinamiku ponašanja složenih sustava na način istraživanja tzv. «crne kutije», jer je praksa educiranja i dizajniranja složenih sustava potvrdila, da je daleko kvalitetnije simulirati s istraživačkim pristupom tzv. “bijele kutije”, tj. Sustav- dinamičkom metodologijom”

Autori

LITERATURA

- [1] R. A. Nalepin, O.P. Demeenko, Avtomatizacija sudovljih energetskih ustanovok, Sudostroennie-, in Russian, 1975.
- [2] L.I. Isakov, L.I. Kutljin, Kompleksnaja avtomatizacija sudovljih dizeljnih i gazoturbinskih ustanovok, in Russian, Leningrad, Sudostroennie, 1984.
- [3] L.P. Veretenikov, Isledovanie procesov v sudovljih elektro-energetičeskih sistemah-teorija i metodlji, in Russian, Sudostroennie, 1975.
- [4] G.F. Suprun, Sintezsistem elektroenergetiki sudov, in Russian; Leningrad, Sudostroenie, 1972.
- [5] T. Šretner: Brodski motori s unutarnjim izgaranjem, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1970.

- [6] A. Muntitić, Kompjuterska simulacija uz pomoć Sistemske Dinamike, BRODOSPLIT, BIS SPLIT, 1989.
- [7] V. Medica, Simulacija dinamičkih uvjeta rada dizel motora s prednabijanjem kod pogona električnog generatora, Doktorska disertacija, Tehnički fakultet Rijeka, Rijeka, 1988.
- [8] L. Milić, Dinamičko kontinuirani simulacijski model broskog dizel-motornog porivnog sustava, Doktorska disertacija, Pomorski fakultet Rijeka, Rijeka, 1996,
- [9] J. Dvornik, Sustavno dinamičko simulacijsko modeliranje broskog Diesel motora pod opterećenjem, Magistarski rad, FESB, Split, 2004.
- [10] A. Munitic, R. Antonic, J. Dvornik, System Dynamics Simulation Modeling of Ship Gas-turbine generator, ICC3'03, International Carpathian Control Conference, 26-29 May, 2003, KOŠICE, SLOVAK, str. 357-360, 2003.
- [11] A. Munitic, M. Orsulic, J. Dvornik, Computer Simulation of Complex Ship System "Gas turbine- Synhronous generator", ISC 2003, The Industrial Simulation Conference, 9-12 June, 2003, VALENCIA, SPAIN, ISBN: 90-77381-03-1, 192-197 str., 2003.
- [12] A. Munitic, M. Orsulic, J. Dvornik, Continuous Computer Simulation Model of the Marine Gas Turbine, 15th Annual European Simulation Symposium, ESS 2003, Delft, The Netherlands, October 26-29, 2003.
- [13] A. Munitić, L. Milić, M. Milković, System Dynamics Computer simulation model of the Marine Diesel-drive generating set automatic, 15th IMACS, Berlin, August 1997, Proceedings Volume 5, Systems Engineering, str. 245-250, Wissenschaft & Technik Verlag, Germany, 1997.
- [14] A. Munitić, L. Milić, System Dynamics Simulation Modelling of the Diesel-drive Generating Set,, 9th EUROPEAN SIMULATION SYMPOSIUM ESS 97, str. 679-684, Simulation in Energy Systems I, Passau, Germany, October 19-23, 1997.
- [15] A. Munitić, I. Kuzmanić, M. Krčum, System Dynamics Simulation Modelling of the Marine Synchronous Generator Set, INTERNATIONAL CONFERENCE: MODELLING AND SIMULATION, May 13-16, 1998, Pittsburgh, USA, 1998.
- [16] A. Munitić, L. Milić, I. Milić, System Dynamics Simulation Model of the Marine Diesel Engine, NAŠE MORE, str. 97-102, broj 43(3-4)/96, Pomorski Fakultet Dubrovnik, Dubrovnik, 1996.
- [17] M. Jadrić, B. Frančić, Dinamika električnih strojeva, Zagreb, Croatia, 1996.

*Summary*SIMULATION OF BEHAVIORAL DYNAMICS OF THE MARINE DIESEL
ENGINE UNDER LOAD

Simulation Modelling, together with System Dynamics and intensive usage of modern digital computers, which means application on a massive scale, nowadays very cheap, and at the same time a very powerful personal computer (PC-a), is one of the most suitable and effective scientific ways for investigation of the behavioral dynamics of non-linear and very complex natural, technical and organisation systems. The aim of this paper is to show the efficiency of System Dynamics Simulation Modelling during the study of the dynamics behavior of the complex marine diesel generator system. The marine diesel generator is presented by a set of non-linear differential equations i.e. a continuous simulation model of higher order, in other words by so-called level equations and will at the same time be a discrete simulation model since it strictly satisfies the selected value of the basic discrete time period DT, which value is determined in total accordance with "Sampling Theorem" (Shannon – Kotelnikov – Nyquist – Sampling theorem). Furthermore, the paper presents the mathematical model of the whole system, i.e. the marine diesel engine model and marine synchronous generator model, based on which System Dynamics qualitative models (mental-verbal, structural and diagram models) and quantitative models (mathematical and computer simulation models) are made.

Key words: simulation, systemic dynamics, modelling, diesel engine, synchronous generator, heuristic optimization.

*Faculty of Maritime Studies in Split
Zrinskijsko-frankopanska 38, 21000 Split
Croatia*