

Dr. sc. Enco Tireli

Pomorski fakultet u Rijeci
Studentska 2
51000 Rijeka

Dr. sc. Joško Dvornik

Pomorski fakultet u Splitu
Zrinsko-Frankopanska 38
21000 Split

Izvorni znanstveni rad

UDK: 004.032.26

621.165

Primljeno: 18. travnja 2006.

Prihvaćeno: 24. travnja 2006.

DOPRINOS RAZVOJU MODELA BRODSKE PARNE TURBINE U UVJETIMA OPTEREĆENJA

Svrha ovoga rada jest pokazati uspješnost primjene sustavno dinamičkog simulacijskog modeliranja pri istraživanju dinamike ponašanja brodske parne turbine u uvjetima opterećenja brodskim sinkronim generatorom.

Brodska parna turbina pod opterećenjem sinkronog generatora, jest složen nelinearan sustav, kojega treba istraživati sustavno, tj. kao cjelinu sastavljenu od niza podsustava i elemenata, koji su uzročno-posljedično (UPV) međusobno povezani krugovima povratnog djelovanja (KPD), kako unutar pogonskog sustava, tako i s relevantnom okolinom.

U ovome radu će se predstaviti učinkovita primjena znanstvenih metoda istraživanja složenih dinamičkih sustava pod nazivom kvalitativna i kvantitativna simulacijska metodologija sustavne dinamike, koja će omogućiti izradu i korištenje većeg broja, i vrsta simulacijskih modela promatranog realiteta, te konačno omogućiti kontinuiranu računalnu simulaciju, što će značajno doprinijeti stjecanju novih saznanja o nelinearnoj naravi dinamike ponašanja turbogeneratorskih sustava u procesu dizajniranja i edukacije.

Brodska parna turbina predstaviti će se skupom nelinearnih diferencijalnih jednadžbi te će se potom izraditi kvalitativni strukturni modeli i dijagrami toka u simboličkom sustavnoj dinamici [1 i 2], a u POWERSIM simulacijskom jeziku [5] simulirati će se dinamika ponašanja u uvjetima opterećenja.

Ključne riječi: *plinska turbina, sinkroni generator, simulacijsko modeliranje, simulacija i heuristička optimizacija*

1. SIMULACIJSKO MODELIRANJE BRODSKE PARNE TURBINE

1.1. Matematički model brodske parne turbine

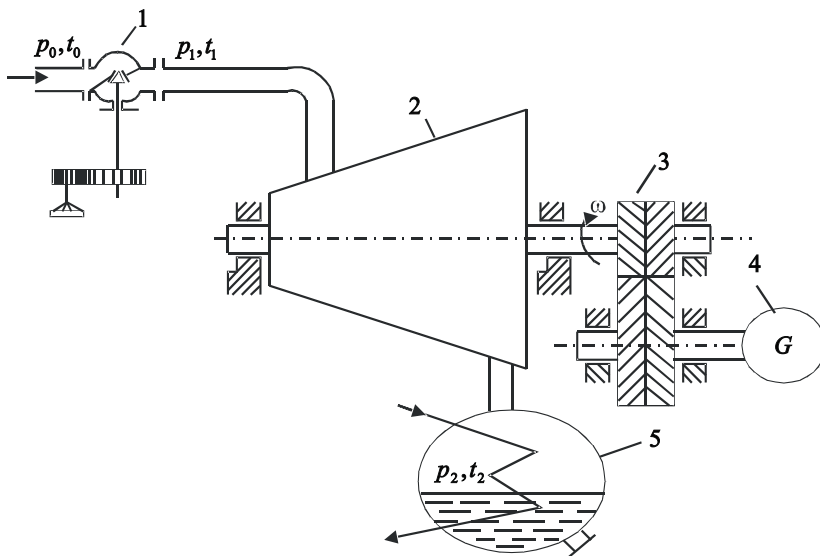
Na slici 1. prikazan je (prema [7]) model parnog broskog turbinskog postrojenja parne turbine koja pokreće brodski električni sinkroni generator.

U našem slučaju imamo dvije suštinske pojave sposobnosti akumulacije energije:

1. u parnom volumenu (parni prostor, parni obujam turbine) i
2. u rotoru turbine,

dok se glavni kondenzator promatra kao poseban objekt reguliranja.

Svaki od navedenih toplinskih dijelova opisan je svojom jednadžbom stanja, odnosno diferencijalnom jednadžbom koja opisuje dinamiku ponašanja.



Slika 1. Kondenzacijsko parno postrojenje broskog turbogeneratorsa
1- regulacijski ventil, 2- turbina, 3- reduktor, 4- generator, 5- kondenzator

Dinamički sustav matematičkog modela brodske parne turbine definira se eksplicitnim oblikom diferencijalnih jednadžbi, odnosno izrazima, [7]:

1. Jednadžba parnog volumena turbine

$$\frac{d\psi_1}{dt} = \frac{\mu}{R_\mu} + \frac{\psi_0}{R_{\psi_0}} - \frac{\psi_1}{R_{\psi_1}} \quad (1)$$

2. Jednadžba dinamike rotora turbine

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\Psi_1}{T_{\psi 1}} + \frac{\Psi_2}{T_{\psi 2}} - \frac{\varphi}{T_{\varphi}} \quad (2)$$

gdje je:

- Ψ_1 - relativni tlak pare u parnom volumenu [B.D.],
- φ - relativna kutna brzina rotora turbine [B.D.],
- $T_{\psi 1}$ - vremenska konstanta rotora turbine [s],
- T_{φ} - vremenska konstanta rotora turbine [s],
- P_{μ} i $R_{\psi 1}$ - vremenska konstanta volumena pare [s],
- Ψ_0 - relativni tlak pare ispred manevarskog ventila [B.D.],
- $P_{\psi 0}$ - vremenska konstanta rotora turbine [s],
- μ - relativni položaj manevarskog ventila [B.D.],
- Ψ_2 - relativni tlak pare u glavnom kondenzatoru [B.D.],
- $T_{\psi 2}$ - vremenska konstanta kotla [s],

vrijedi da je: $\psi_1 = \frac{P_1}{P_{1N}}, \psi_0 = \frac{P_0}{P_{0N}}$

- P_1 - tlak pare u parnom volumenu [Pa],
- P_0 - tlak ispred manevarskog ventila [Pa],
- P_{1N} - nominalni prirast tlaka pare u parnom volumenu [Pa],
- P_{0N} - nominalni prirast tlaka ispred manevarskog ventila [Pa].

1.2. Dinamički sustav kvalitativnih modela brodske parne turbine

Na temelju matematičkog modela, odnosno eksplicitnog oblika jednadžbe stanja brodske parne turbine (1) moguće je determinirati kvalitativni model brodske parne turbine:

- Ako raste relativni prirast tlaka pare u parnom volumenu turbine ψ_1 , padat će brzina relativnog prirasta tlaka pare u parnom volumenu turbine iz čega slijedi negativan predznak promatrane uzročno-posljedične veze (-).
- Ako raste relativni prirast tlaka pare ispred manevarskog ventila ψ_0 , rast će i brzina relativnog prirasta tlaka pare u parnom volumenu turbine iz čega slijedi pozitivan predznak promatrane uzročno-posljedične veze (+).

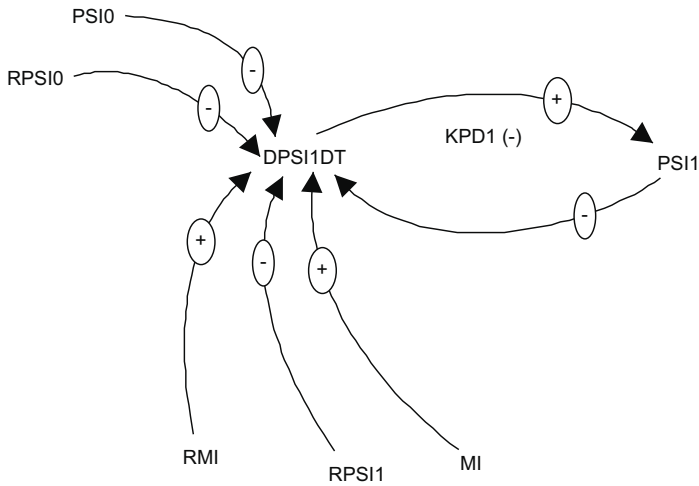
- Ako raste relativna promjena položaja manevarskog ventila μ , rast će i brzina relativnog prirasta tlaka pare u parnom volumenu turbine iz čega slijedi pozitivan predznak promatrane uzročno-posljedične veze (+).
- Ako raste vremenska konstanta volumena pare R_{μ} , padat će brzina relativnog prirasta tlaka pare u parnom volumenu turbine iz čega slijedi negativan predznak promatrane uzročno-posljedične veze (-).
- Ako raste vremenska konstanta rotora turbine R_{ψ_0} , padat će brzina relativnog prirasta tlaka pare u parnom volumenu turbine iz čega slijedi negativan predznak promatrane uzročno-posljedične veze (-).
- Ako raste vremenska konstanta volumena pare R_{ψ_1} , rast će i brzina relativnog prirasta tlaka pare u parnom volumenu turbine iz čega slijedi pozitivan predznak promatrane uzročno-posljedične veze (+).

Na temelju matematičkog modela, odnosno eksplicitnog oblika jednadžbe stanja brodske parne turbine (2) moguće je determinirati kvalitativni model brodske parne turbine:

- Ako raste relativni prirast tlaka pare u parnom volumenu ψ_1 , rast će i brzina relativnog prirasta kutne brzine rotora turbine iz čega slijedi pozitivan predznak promatrane uzročno-posljedične veze (+).
- Ako raste relativni prirast kutne brzine rotora turbine φ , padat će brzina relativnog prirasta kutne brzine rotora turbine iz čega slijedi negativan predznak promatrane uzročno-posljedične veze (-).
- Ako raste relativni prirast tlaka pare u glavnom kondenzatoru ψ_2 , padat će brzina relativnog prirasta kutne brzine rotora turbine iz čega slijedi negativan predznak promatrane uzročno-posljedične veze (-).
- Ako raste vremenska konstanta rotora turbine T_{ψ_1} , padat će brzina relativnog prirasta kutne brzine rotora turbine iz čega slijedi negativan predznak promatrane uzročno-posljedične veze (-).
- Ako raste vremenska konstanta rotora turbine T_{φ} , rast će i brzina relativnog prirasta kutne brzine rotora turbine iz čega slijedi pozitivan predznak promatrane uzročno-posljedične veze (+).
- Ako raste vremenska konstanta kotla T_{ψ_2} , rast će i brzina relativnog prirasta kutne brzine rotora turbine iz čega slijedi pozitivan predznak promatrane uzročno-posljedične veze (+).

1.3. Dinamički sustav strukturnih modela brodske parne turbine

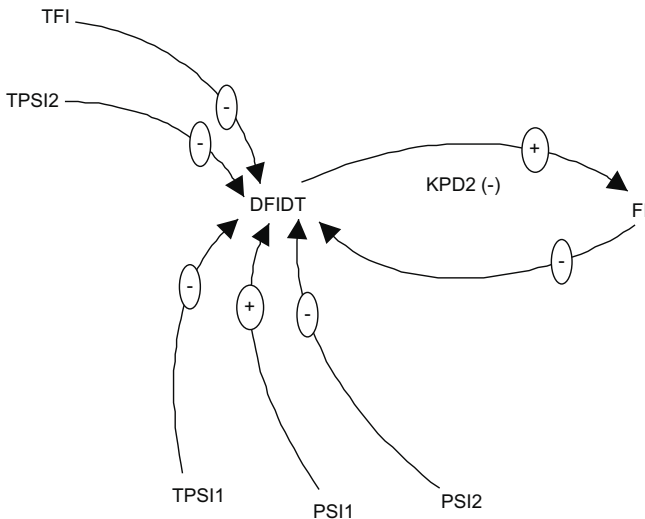
Na temelju navedenih kvalitativnih modela moguće je izraditi strukturne dijagrame brodske parne turbine, koji su prikazani na slici 2, 3 i 4.



Slika 2. Strukturni model brodske parne turbine - po volumenu pare

U promatranom sistemu egzistira krug povratnog djelovanja (KPD1).

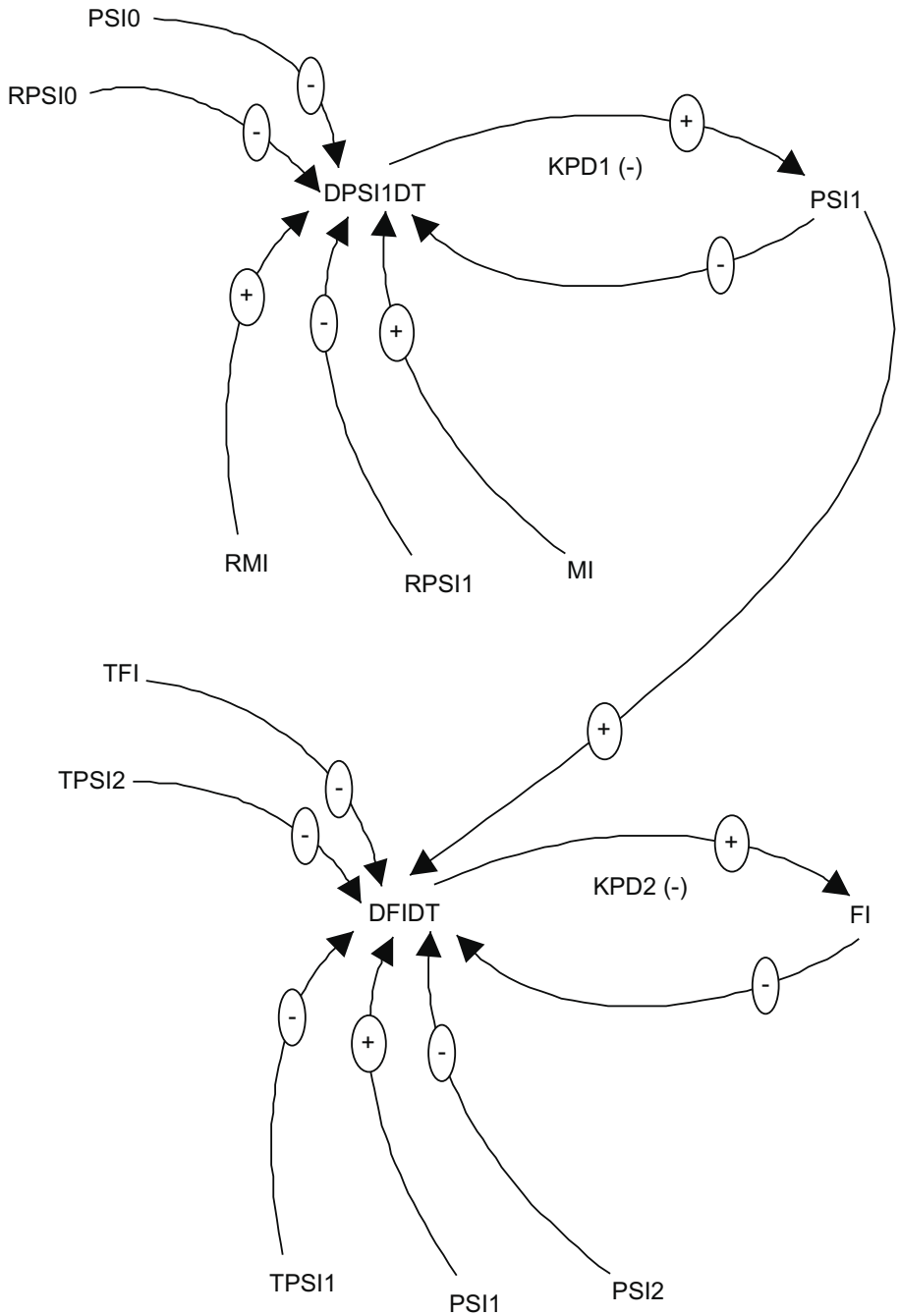
KPD1(-):PSI1=>(-)DPSI1DT=>(+)DPSI1DT=>(+)PSI1; koji ima samo-regulirajući dinamički karakter (-), jer je suma negativnih predznaka neparan broj.



Slika 3. Strukturni model brodske parne turbine - po dinamici rotora

U promatranom sistemu egzistira krug povratnog djelovanja (KPD2).

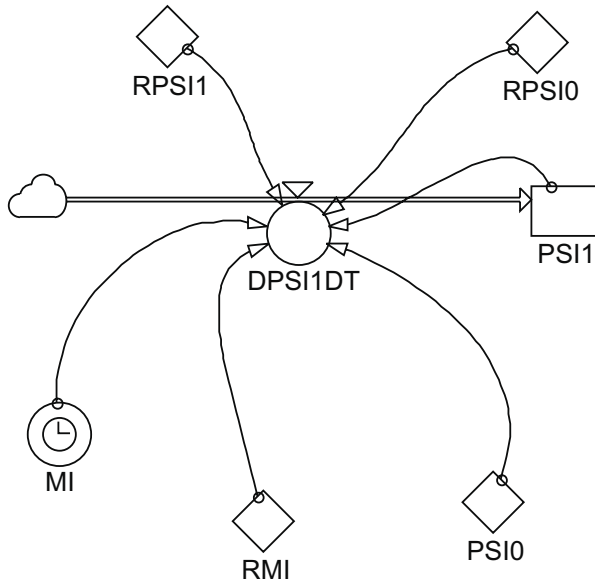
KPD2(-):FI=>(-)DFIDT=>(+)DFIDT=>(+)FI; koji ima samoregulirajući dinamički karakter (-), jer je suma negativnih predznaka neparan broj.



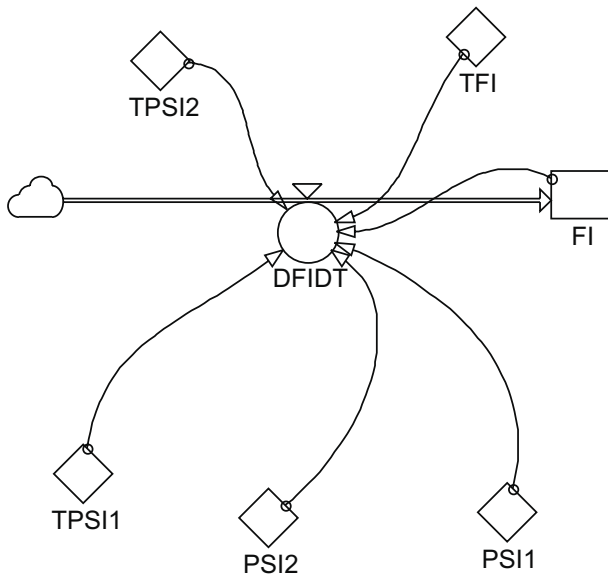
Slika 4. Globalni strukturalni model brodske parne turbine

1.4. Dinamički sustavi dijagrama toka brodske parne turbine

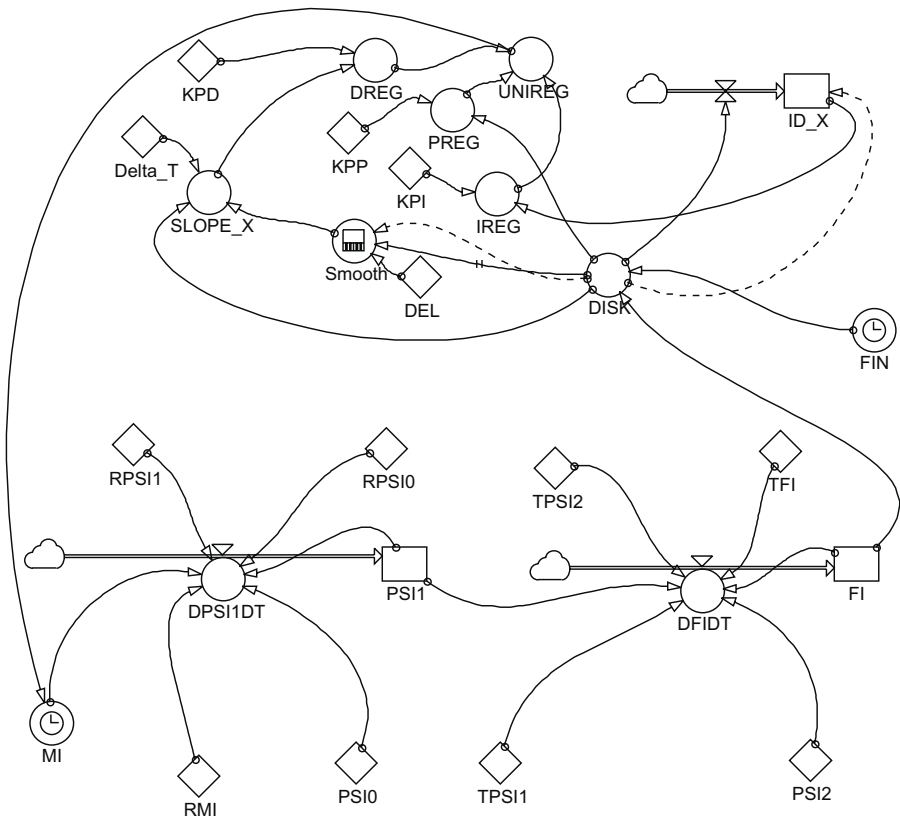
Na temelju izrađenih kvalitativnih i strukturnih modela izrađuju se dijagrami toka, koji su prikazani na slici 5, 6 i 7.



Slika 5. Dijagram toka brodske parne turbine - po volumenu pare



Slika 6. Dijagram toka brodske parne turbine - po dinamici rotora



Slika 7. Globalni dijagram toka brodske parne turbine s ugrađenim PID regulatorom

MACRO DYNAMO funkcije koje su ugrađene u simulacijski model brodske plinske turbine: *CLIP*, *STEP*, *UNIREG*.

2. KVANTITATIVNI SIMULACIJSKI MODEL BRODSKE PARNE TURBINE

Simulacijski model brodske parne turbine u DYNAMO simulacijskom jeziku:

MACRO SLOPE(X,DEL)

*

A SLOPE.K=(X.K-SMOOTH(X.K,DEL))/DT

*

MEND

*

* UNIREG-PID REGULATOR:

*

MACRO UNIREG(X,KPP,KPI,KPD)

*

INTRN IBD,PREG,IREG,DREG

*

A PREG.K=KPP*X.K

*

L IBD.K=IBD.J+DT*X.J

*

N IBD=X

*

A IREG.K=KPI*IBD.K

*

A DREG.K=KPD*SLOPE(X.K,DT)

*

A UNIREG.K=PREG.K+IREG.K+DREG.K

*

MEND

*

R DPSI1DT.KL=(MI.K/RMI.K)+(PSIO.K/RPSIO.K)-(PSI1.K/RPSI1.K)

*

L PSI1.K=PSI1.J+DT*DPSI1DT.JK

*

N PSI1=0

*

A

MI.K=CLIP(STEP(.05,10)+STEP(.95,50)+PIDFI.K,0,DELAY1(RE.K,2),1E-1
6)

*

A RMI.K=5

*

A PSIO.K=0

*

A RPSIO.K=5

*

A RPSI1.K=5

*

SAVE DPSI1DT,PSI1,MI,RMI,PSIO,RPSIO,RPSI1

*

```
R DFIDT.KL=(PSI1.K/TPSI1.K)-(PSI2.K/TPSI2.K)-(FI.K/TFI.K)
*
L FI.K=FI.J+DT*DFIDT.JK
*
N FI=0
*
A TPSI1.K=5
*
A PSI2.K=0
*
A TPSI2.K=5
*
A TFI.K=.1+MEL.K
*
* UNIREG-PID REGULATOR INSTALLING:
*
A DISK.K=FIN.K-FI.K
*
A FIN.K=STEP(.05,10)+STEP(.95,50)
*
A PIDFI.K=CLIP(UNIREG(DISK.K,KPP,KPI,KPD),0,TIME.K,10)
*
C KPP=100
*
C KPI=0.1
*
C KPD=100
SAVE DISK,PIDFI,FIN
*
SAVE TPSI1,PSI2,TPSI2,FI,TFI
```


3. ISTRAŽIVANJE DINAMIKE PONAŠANJA RADA BRODSKE PARNE TURBINE U UVJETIMA OPTEREĆENJA

Nakon što smo izradili dinamičke sustave kvalitativnih i kvantitativnih simulacijskih modela, u nekom od simulacijskih paketa, a najčešće je to DYNAMO [2] ili POWERSIM [5], simuliramo sva moguća pogonska stanja sustava, i to laboratorijski.

Nakon što inženjer, projektant ili pak student izvrši dovoljan broj eksperimenata, odnosno scenarija te dobije uvid u dinamiku ponašanja sustava metodom heurističke optimizacije može vršiti optimizaciju bilo kojih parametara u samom sustavu. Naravno, sve uz pretpostavku da je model validan.

U scenariju koji ćemo predstaviti prikazat će se zalet (pokretanje) brodske parne turbine i to u dvije faze, te priključivanje broskog sinkronog generatora u vremenskom trenutku $TIME = 100$ sekunda i to na način:

1. Otvara se manevarski ventil brodske parne turbine na 5% nominalnog otvora u vremenskom trenutku $TIME = 10$ sekunda. Sve do 50 sekundi održava se smanjeni broj okretaja (oko 5% nominalnog broja okretaja ili 500 do 600 ok./min.) radi ravnomjernog grijanja turbinskih masa.

2. U vremenu $TIME = 50$ sekunda otvara se manevarski (regulacijski) ventil na nominalni otvor (100%) $MI=STEP(.05,10)+STEP(.95,50)$ i vrši dizanje brodske parne turbine na nominalni broj okretaja.

U vremenu $TIME = 10$ sekunda započinje rasti relativni prirast tlaka pare u parni volumen (ψ_1) i relativni prirast kutne brzine rotora brodske parne turbine (φ).

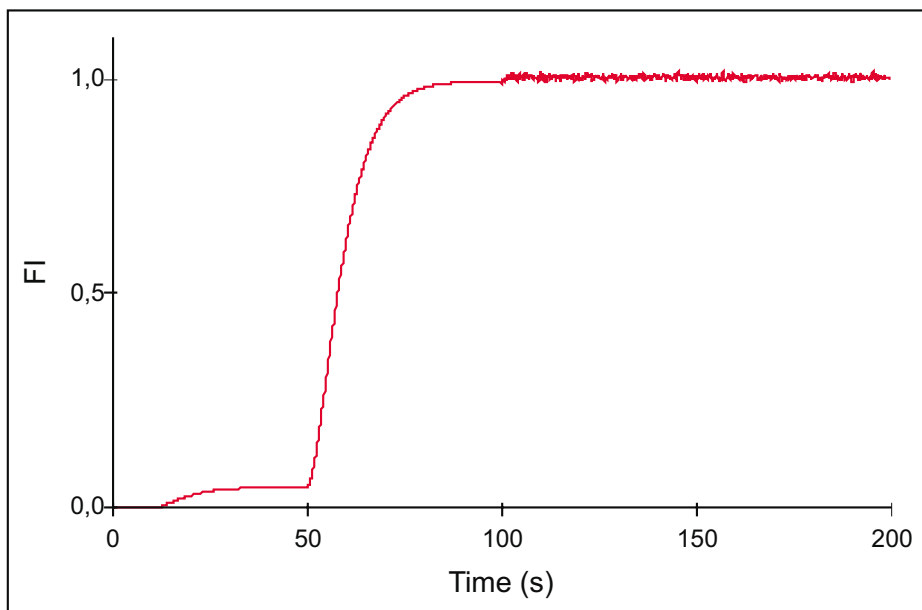
3. U vremenskom trenutku $TIME = 100$ sekunda vršimo skokovito opterećenje sa 50% nominalnoga, kao i u prethodnom scenariju i dodavanjem stohastičkog opterećenja prema izrazu:

$$TFI.K=STEP(2.5,100)*(1-NOISE()).$$

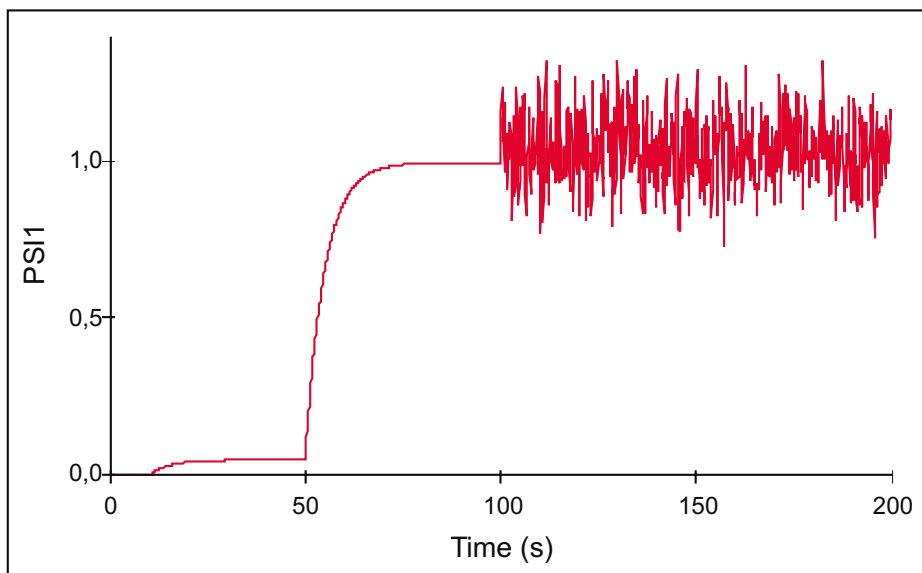
4. Ugrađen je elektronski PID regulator parametara: $KPP = 100$, $KPI = 0.1$ i $KPD = 100$.

Rezultati simulacije upravo pokazuju stvarnu dinamiku ponašanja brodske parne turbine, koja se u praznom hodu upućuje barem dvostupno, što daje dovoljno vremena da se svi dijelovi jednoliko ugriju. Ovaj scenarij može poslužiti pri heurističkoj optimizaciji koeficijenata PID regulatora. Naime, ako dostignemo dopuštene kriterije, tada će u normalnim pogonskim uvjetima odabrana kombinacija PID regulatora u svakom slučaju zadovoljiti. Scenarij pokazuje da će uz odabir koeficijenata univerzalnog PID regulatora ($KPP = 100$, $KPI = .1$, $KPD = 100$), doći vrlo brzo do stabilizacije prijelazne pojave, u granicama do-

Grafički rezultati simulacije:



Slika 9. Relativni prirast kutne brzine rotora - φ



Slika 10. Relativni prirast tlaka pare u parnom volumenu - ψ_1

zvoljenih odstupanja brzine okretanja rotora brodske parne turbine (oko 4% nominalnog broja okretaja).

4. ZAKLJUČAK

Sustavna dinamika je takva znanstvena metodologija koja omogućuje simulacije najsloženijih sustava. U pokazanom primjeru metodologija očito pokazuje na visoku kvalitetu simulacija složenih dinamičkih sistema, te daje priliku svakom zainteresiranom studentu ili inženjeru da pomoću iste metodologije modelira, optimira i simulira bilo koji scenarij postojećih realiteta.

Nadalje, korisnici koji koriste ovu metodologiju simuliranja kontinuiranih modela na digitalnom računalu otvaraju sebi mogućnost stjecanja najnovijih znanja u ponašanju dinamičkih sistema. Metodologija je značajna i po tome što ne obuhvaća samo računalni tip modeliranja već jasno determinira i kvalitativno, strukturno i matematičko modeliranje istih realiteta sustava.

U ovoj kratkoj prezentaciji daju se svi potrebni podaci jednom stručnjaku 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. ”bije-
le kutije”, tj. sustavom dinamičke metodologije.”*

Autori

LITERATURA

1. Forrester, Jay W., *Principles of Systems*, Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 1973/1971.
2. Richardson, George P., L. Aleksander, *Introduction to System Dynamics Modelling with Dynamo*, Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 1981.,
3. Munitic, A., *Computer Simulation with Help of System Dynamics*, Split, BIS, 1989., str. 297.
4. Munitic, A., L. Milic, M. Milikovic, System Dynamics Computer Simulation Model of the Marine Diesel-Drive Generation Set, *IMACS World Congress on Scientific Computation, Modelling and Applied Mathematics*, Vol.5, Berlin, Verlag, 1997.
5. Byrknes, A. H., *Run-Time User's Guide and Reference Manual*, Powersim 2.5, Powersim Corporation, Powersim AS, 12007 Sunrise Valley Drive, Reston Virginia 22091 USA.
6. Munitic, A., I. Kuzmanic, M. Krcum, System Dynamic Simulation Modelling of the Marine Synchronous Generator, *Modelling and Simulation*, Pittsburgh, IASTED, 1998., str. 372-375.
7. Isakov, L. I., L. I. Kutljin, *Kompleksnaja avtomatizacija sudovljih dizeljih i gazoturbinljih ustanovok*, Leningrad, Sudostreonnje, 1984.
8. Suprun, G. F., *Sintezsystem elektroenergetiki sudov*, Leningrad, Sudostroenie, 1972.
9. Hind, A., *Automation in merchant ships*, London, 1968.
10. Nalepin, R. A., O.P. Demeenko, *Avtomatizacija sudovljih energetskih ustanovok*, Leningrad, Sudostroennie, 1975.

Summary

A CONTRIBUTION TO THE DEVELOPMENT OF THE MARINE STEAM TURBINE IN LOAD CONDITIONS

The aim of this paper is to present the successful application of the system dynamics simulation modelling in the research carried on the performance dynamics of the marine steam turbine in load conditions, and in this very example at load of a marine synchronous generator.

The marine steam turbine at load of a synchronous generator is a complex non-linear system, which needs to be systematically researched into as a unit consisting of a number of subsystems and elements, which are linked by cause-effect (CE) feedback loops (FBL), both within the propulsion system and with the relevant environment.

The authors of this paper aim at presenting the efficient application of the scientific methods used in the research of the complex dynamic systems called System dynamics qualitative and quantitative simulation methodology, which will make the production and use of a larger number and a variety of simulation models of the observed elements possible, thus enabling the continuous computer simulation, which will significantly contribute to the acquisition of new information about the non-linear character of the turbine and generator system performance dynamics in the designing and education process.

The marine steam turbine will be presented by a set of non-linear differential equations, after which mental and verbal structural models and flowcharts in the System dynamics symbols [1 and 2] will be worked out, and the performance dynamics in load conditions will be simulated in the POWERSIM simulation language [5].

Key words: *Steam turbine, synchronous generator, simulation modelling, simulation and heuristic optimization.*

*Faculty of Maritime Studies Rijeka
Studentska 2
51000 Rijeka
Croatia*

*Faculty of Maritime Studies Split
Zrinsko-Frankopanska 38
21000 Split
Croatia*