

# Simulacijsko modeliranje brodskih turbinskih pogona sinkronih generatora

---

Dvornik, Joško

Doctoral thesis / Disertacija

2006

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:188:062036>

*Rights / Prava:* [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-30**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka Library - SVKRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET U RIJECI**

Mr. sc. Joško Dvornik

**Simulacijsko modeliranje brodskih turbinskih pogona  
sinkronih generatora**

Doktorska disertacija

Rijeka, 2006.

Doktorska disertacija pod nazivom:

**SIMULACIJSKO MODELIRANJE BRODSKIH TURBINSKIH POGONA  
SINKRONIH GENERATORA**

obranjena je dana 22.05.2006. godine pred Povjerenstvom u sastavu:

1. Dr. sc. VLADIMIR MEDICA, redoviti profesor Tehničkog fakulteta u Rijeci,  
predsjednik povjerenstva
2. Dr. sc. ENCO TIRELI, redoviti profesor Pomorskog fakulteta u Rijeci,  
mentor i član,
3. Dr. sc. TIBOR POGANJ, redoviti profesor Pomorskog fakulteta u Rijeci,  
komentor i član,
4. Dr. sc. VINKO TOMAS, docent Pomorskog fakulteta u Rijeci,  
član

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET U RIJECI

Mr. sc. Joško Dvornik

*Simulacijsko modeliranje brodskih turbinskih pogona  
sinkronih generatora*

Doktorska disertacija

Mentor: Dr. sc. Enco Tireli, red. prof.

Komentor: Dr. sc. Tibor Poganj, red. prof.

Rijeka, 2006.

*Čast mi je i dužnost, zahvaliti se na pruženoj podršci,  
danim savjetima i sugestijama tijekom izrade disertacije,  
a bez kojih sigurno uspješna realizacija ne bi bila moguća,  
svom mentoru*

*Dr. sc. Encu Tireliu, red. prof.*

*i komentoru*

*Dr. sc. Tiboru Poganju, red. prof.*

**Podaci za bibliografsku karticu:**

<b>UDK:</b>	519.876.5:[621.313.322:629.12]
<b>Ključne riječi:</b>	Plinska turbina, parna turbina, turbogenerator, sinkroni generator, modeliranje, kontinuirana i diskretna simulacija, sustavna dinamika i heuristička optimizacija.
<b>Znanstveno područje:</b>	Tehničke znanosti
<b>Znanstveno polje:</b>	Tehnologija prometa i transporta
<b>Grana:</b>	Pomorski i riječni promet
<b>Institucija u kojoj je rad izrađen:</b>	Pomorski fakultet u Rijeci
<b>Mentor rada:</b>	Dr. sc. Enco Tireli, red. prof.
<b>Broj stranica:</b>	159
<b>Broj slika:</b>	80
<b>Broj tablica:</b>	3
<b>Broj korištenih bibliografskih jedinica:</b>	70
<b>Datum obrane:</b>	
<b>Povjerenstvo za ocjenu i obranu:</b>	1. Dr. sc. Vladimir Medica, red. prof. - predsjednik, 2. Dr. sc. Enco Tireli, red. prof. - mentor, 3. Dr. sc. Tibor Poganj, red. prof. - komentor, 4. Dr. sc. Vinko Tomas, doc. - član.
<b>Institucija u kojoj je rad pohranjen:</b>	Pomorski fakultet u Rijeci

## SADRŽAJ

PREDGOVOR	7
Sažetak	9
Summary	10
Ključne riječi	11
Key Words	11
Popis oznaka	12
Popis kratica	16
Popis slika	18
Popis tablica	21
1. UVOD	22
1.1. Postavljanje problema	23
1.2. Postavljanje funkcije cilja	23
1.3. Dosadašnja znanstvena istraživanja	25
1.4. Metoda znanstvenoga istraživanja	27
1.5. Metodološki prikaz disertacije	28
2. MATEMATIČKI MODELI BRODSKIH PLINSKIH I PARNIH TURBINA	30
2.1. Simulacijski model brodske plinske turbine	30
2.1.1. Jednadžbe stanja brodske plinske turbine	30
2.2. Simulacijski model brodske parne turbine	46
2.2.1. Jednadžbe stanja brodske parne turbine	46
3. MATEMATIČKI MODEL BRODSKOGA SINKRONOGA GENERATORA	55
3.1. Jednadžbe stanja broskog sinkronog generatora	55
4. REGULACIJA BROJA OKRETAJA BRODSKIH TOPLINSKIH TURBINA	58
4.1. Osnovne karakteristike regulatora	58
4.2. Proporcionalni regulator direktnog djelovanja (P- regulator)	59
4.2.1. Proporcionalni element nultog djelovanja	60
4.2.2. Proporcionalni element prvog djelovanja	60
4.2.3. Proporcionalni element drugog djelovanja	61

4.3. D- regulator	61
4.4. I- regulator	62
4.5. Kombinirani elementi	63
4.5.1. PD element	63
4.5.2. PI element	63
4.5.3. PID element	64
4.6. Kompjutorsko simulacijski model P, I, D, PI i PID regulatora	64
5. SUSTAV-DINAMIČKO SIMULACIJSKO MODELIRANJE BRODSKIH TURBINSKIH POGONA SINKRONIH GENERATORA	67
5.1. Općenitost i povijesnost Sustavne dinamike	67
5.2. Osnovni pristup Sustavne dinamike	68
5.2.1. Sustav-dinamičko modeliranje	69
5.2.2. Osnovni elementi Sustavne dinamike	70
5.2.3. Osnovne jednadžbe sustava	71
5.2.4. Raspoloživi softverski paketi Sustavne dinamike	75
5.2.5. Osnovni pojmovi potrebni za izvođenje simulacije - eksperimenta	77
5.3. Jednadžbe stanja broskog turbogeneratorskog sustava	81
5.4. Kompjutorsko simulacijski modeli brodske plinske turbine	82
5.4.1. Sustav-dinamički matematički modeli brodske plinske turbine	82
5.4.2. Sustav-dinamički mentalno verbalni modeli brodske plinske turbine	82
5.4.3. Sustav-dinamički strukturni modeli brodske plinske turbine	84
5.4.4. Sustav-dinamički dijagrami toka brodske plinske turbine	87
5.4.5. Kvantitativni simulacijski model brodske plinske turbine	89
5.5. Kompjutorsko simulacijski modeli brodske parne turbine	91
5.5.1. Sustav-dinamički matematički modeli brodske parne turbine	91
5.5.2. Sustav-dinamički mentalno verbalni modeli brodske parne turbine	91
5.5.3. Sustav-dinamički strukturni modeli brodske parne turbine	93
5.5.4. Sustav-dinamički dijagrami toka brodske parne turbine	96
5.5.5. Kvantitativni simulacijski model brodske parne turbine	98
5.6. Kompjutorsko simulacijski model broskog sinkronoga generatora	99
5.6.1. Sustav-dinamički matematički model broskog sinkronoga generatora	99



5.6.2. Sustav-dinamički mentalno verbalni modeli brodskoga sinkronoga generatora	100
5.6.3. Sustav-dinamički strukturni modeli i dijagrami toka brodskog sinkronoga generatora	103
5.6.4. Kvantitativni simulacijski model brodskog sinkronog generatora	109
5.7. Globalni strukturni dijagram i dijagram toka brodskog plinskog turbogeneratora	112
5.8. Globalni strukturni dijagram i dijagram toka brodskog parnog turbogeneratora	115
<b>6. ISTRAŽIVANJE DINAMIKE PONAŠANJA MODELA TURBINSKOG POGONA SINKRONOG GENERATORA S PRIMJENOM HEURISTIČKE OPTIMIZACIJE</b>	<b>118</b>
6.1. Simulacijski scenariji rada brodske plinske turbine	118
6.2. Simulacijski scenariji rada brodske parne turbine	124
6.3. Simulacijski scenariji brodskog plinskog turbogeneratora	131
6.3.1. Scenarij zaleta brodske plinske turbine u praznom hodu, te priključivanja generatora u praznom hodu	131
6.3.2. Scenarij zaleta brodske plinske turbine u praznom hodu, te priključivanja generatora u praznom hodu i opterećenja	134
6.4. Simulacijski scenariji brodskog parnog turbogeneratora	140
6.4.1. Scenarij zaleta brodske parne turbine u praznom hodu, te priključivanja generatora u praznom hodu	140
6.4.2. Scenarij zaleta brodske parne turbine u praznom hodu, te priključivanja generatora u praznom hodu i opterećenja	142
<b>7. ZAKLJUČAK</b>	<b>147</b>
LITERATURA	151
ŽIVOTOPIS	156
CURRICULUM VITAE	158

## PREDGOVOR

Ova je doktorska disertacija rezultat dužeg rada u području simulacijskog modeliranja nelinearnih brodskih pogonskih sustava. Još od dodiplomskog studija, usmjerio sam svoj interes na područje simulacijskog modeliranja brodskih nelinearnih sustava, a rezultat toga je bio diplomski rad pod nazivom *Primjena kompjutorske simulacije dinamike ponašanja pogonskog sustava brodsko sidreno vitlo-asinkroni motor*. Poslije sam isti rad nastavio i na poslijediplomskom studiju, nizom seminarских radova, a izradio sam i magistarski rad pod nazivom *Simulacijsko modeliranje broskog Diesel motora pod opterećenjem*.

U daljnjem znanstvenom istraživačkom radu, na Pomorskom fakultetu u Splitu, objavio sam preko 50 radova na međunarodnim skupovima i to baš iz područja brodskih pogonskih sustava, a istupao sam nekoliko puta i na skupovima diljem svijeta (samo u Sjedinjenim američkim državama četiri puta).

Područje koje me je zaista zainteresiralo, a nakon izrade simulacijskog modela broskog Diesel generatora, jet simulacijsko modeliranje dinamike ponašanja rada brodskih toplinskih turbina, te modeliranje brodskih turbogeneratora u kojih je izrazita pojavnost uzročno posljedičnih veza i dominantnih krugova povratnih djelovanja.

Moguće je zaključiti, iz dostupne literature, da je osnovna problematika u projektiranju turbogeneratorskih sustava bila izražena u činjenici da nisu bili razvijeni odgovarajući kvalitativni i kvantitativni simulacijski modeli čije bi dinamičko ponašanje bilo jednako ponašanju modeliranih sustavnih realiteta, te koji omogućuju temeljitiji i prospektivniji uvid u dinamiku ponašanja nelinearnih pogonskih sustava.

Do sada korišteni posredni postupci istraživanja dinamike ponašanja turbogeneratorskih sustava, koji se baziraju na uporabi klasičnih, uglavnom lineariziranih metoda (kao što su Laplaceova transformacija, prijenosne funkcije i kriteriji stabilnosti) ne zadovoljavaju današnje potrebe znanja o dinamici ponašanja nelinearnih turbogeneratorskih sustava.

Današnji brzi razvoj industrije i sve zahtjevnije tržište, neophodno traže brzo osnivanje novih projekata, konstrukcija i tehnologija. Dosadašnji razvoj bio je zasnovan na iskustvu projekatata, stečenog dugotrajnim radom, što predstavlja veoma skup i spor put. Rješavanje ovog problema izuzetno je poticano brzim razvojem elektroničkih računala.

Računalom podržana simulacija svih mogućih ekstremnih pogonskih sustava predstavlja jedan od načina projektiranja sustava koji je prije svega brz, jeftin, bezopasan i pouzdan. Takav se način projektiranja danas razvija istom brzinom kao i računala i u biti

predstavlja jedan od poticaja što bržeg razvoja kompjutorskih tehnologija.

U ovoj disertaciji turbogeneratorski sustav definiran je kao "cjelina", tj. definirani su njegovi sustav-dinamički kvantitativni i kvalitativni modeli u interakcijskom uzročno-posljedičnom međusobnom djelovanju dijelova broskog turbogeneratorskog sustava, kao i s "relevantnom" okolinom.

Korištena je znanstvena metoda istraživanja dinamike ponašanja, pod nazivom: *Sustavna dinamika* (System Dynamics - Forrester /28/), koja se razvila i primijenila u znanstvenoj praksi upravo u cilju simulacije najsloženijih sustava kao što su to društveni, ekonomski, ekološki, hidrološki, poslovni, proizvodni, biološki, energetske, proizvodni, transportni, tehnološki, strojo-tehnološko-termodinamički, elektromagnetski, hidraulični i pneumatski sustavi.

Duboko vjerujem da je Sustavna dinamika izvanredno znanstveno sredstvo za istraživanje dinamike ponašanja složenih strojarskih sustava i podsustava pa i elemenata, što se nadam i dokazati u ovoj disertaciji.

Sustavna dinamika kao znanstvena disciplina je zapravo *matematičko - kompjutorsko-simulacijski metodološki alat* koji služi kao podloga općoj teoriji sustava i općoj teoriji upravljanja.

Metodologija Sustavne dinamike predstavlja višestruko modelsko predstavljanje simuliranog realiteta, te razlikuje:

1. kvalitativno modeliranje (mentalno verbalni, strukturni modeli te dijagrami toka )
2. kvantitativno modeliranje (matematički i kompjutorski modeli).

Metodologija Sustavne dinamike omogućit će izradu i korištenje većeg broja i vrsta simulacijskih modela promatranog realiteta, te konačno omogućiti kontinuiranu kompjutorsku simulaciju na brzim i preciznim digitalnim računalima, što će značajno doprinijeti stjecanju novih saznanja o nelinearnoj naravi dinamike ponašanja turbogeneratorskih sustava u procesu dizajniranja, edukacije i dijagnosticiranja mogućih kritičnih pogonskih stanja.

Mr. sc. Joško Dvornik, dipl. ing.

## SAŽETAK

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.

Sustavna dinamika raspolaže s kvalitativnim i kvantitativnim simulacijskim modeliranjem, te se suština optimizacije dinamičkih sustava i procesa temelji na tzv. "heurističkoj" proceduri, a to znači na metodi "ručne i iterativne" procedure, koja je uz pomoć brzog digitalnog računala automatizirana te se naziva "heuristička optimizacija" (*retry and error*).

Svrha je ove disertacije pokazati uspješnost primjene sustav-dinamičkoga simulacijskoga modeliranja prilikom istraživanju dinamike ponašanja složenoga nelinearnog brodskoga turbogeneratorskog sustava.

Brodski turbogeneratorski sustav predstaviti će se skupom nelinearnih diferencijalnih jednadžbi, tj. kontinuiranim simulacijskim modelom višega reda, tzv. jednadžbama stanja, te će on istodobno biti i diskretni simulacijski model, a na kraju će se simulirati razna pogonska stanja sustava.

Predstavit će se učinkovita primjena znanstvenih metoda istraživanja složenih dinamičkih sustava pod nazivom:

1. kvalitativna
2. kvantitativna simulacijska metodologija Sustavne dinamike (*System Dynamics Modelling Approach* - MIT)

Stručnjaku će biti dani svi potrebni podaci uz mogućnost prikupljanja dodatnih znanja o istom sustavu na brz i znanstveno utemeljen način istraživanja kompleksnog sustava.

Što znači:

*Ne simuliraj dinamiku ponašanja složenih sustava na način istraživanja tzv. "crne kutije", jer je praksa izučavanja i dizajniranja složenih sustava potvrdila, da je daleko kvalitetnije simulirati istraživačkim pristupom tzv. "bijele kutije", tj. sustav - dinamičkom metodologijom*

## SUMMARY

Simulation modelling, supported by System Dynamics and intensive use of modern digital computers, which implies also the mass application of, nowadays inexpensive, but at the same time very powerful personal computers, is one of the most convenient and most successful scientific methods of investigation of performance dynamics of non - linear and very complex scientific, technical and organisational systems.

System dynamics uses qualitative and quantitative simulation modelling, and the basis of optimisation of dynamic systems and processes is based on the so called "heuristic" procedure, which means on the method of "manual and iterative" procedure, which has been automatized by fast digital computer, and is called "heuristic optimisation" (retry and error).

The purpose of this thesis is to demonstrate the achievements of system dynamics simulation modelling while investigating the performance dynamics of a complex non - linear ship turbine generator system.

The ship turbine generator system will be presented as a set of non - linear differential equations, or continuous simulation model of higher level, and it will simultaneously be a discrete simulation model. In the end various propulsion states of the system will be simulated.

An efficient application of scientific methods of investigation of complex dynamic systems will be presented by:

1. qualitative method
2. quantitative simulation methodology of System Dynamics Modelling Approach - MIT

and all data will be presented to experts, with the possibility of collecting additional data about the same system, in fast, scientifically based method of investigating a complex system. This means:

*Do not simulate performance dynamics of complex systems by investigation of the "black box", because practice in research and designing complex systems confirmed that it far better to simulate by applying the investigation approach of the "white box", i.e. " The System Dynamics Methodology*

## **KLJUČNE RIJEČI**

Plinska turbina, parna turbina, turbogenerator, sinkroni generator, modeliranje, kontinuirana i diskretna simulacija, sustavna dinamika i heuristička optimizacija.

## **KEY WORDS**

Gas Turbine, Steam Turbine, Turbogenerator, Synchronous Generator, Modeling, Continuous and Discrete Simulation, System Dynamics, Heuristics Optimization.

## POPIS OZNAKA

### Latiničke oznake

$f(t)$		relativna promjena vanjskih mogućih djelovanja tereta
$f_1(t)$		relativna promjena mogućih vanjskih djelovanja
$g_{AKK}$	[kg]	količina pare koja je akumulirana u parnom volumenu
$G_{KL}$	[kg/s]	brzina prolaza pare kroz manevarski ventil
$\Delta G_{KL}$	[kg/s]	promjena tijekom potrošnje pare u manevarskom ventilu
$G_{OKL}$	[kg/s]	početna vrijednosti stacionarnog stabilnog stanja
$G_{OT}$	[kg/s]	početna vrijednosti stacionarnog stabilnog stanja
$G_T$	[kg/s]	tijek potrošnje pare kroz turbinu
$\Delta G_T$	[kg/s]	apsolutna promjena potrošnje goriva
$G_{T\sigma}$	[kg/s]	nominalna potrošnja goriva
$H$		apsolutna promjena varijabli
$H_\sigma$		bazni iznos (nominalni)
$i$	[A]	ukupna jakost struje
$i_d$	[A]	jakost struje po osi d
$i_f$	[A]	jakost struje u uzbudnom krugu
$i_q$	[A]	jakost struje po osi q
$J$	[kgm <sup>2</sup> ]	moment inercije rotora turbine
$J_1$	[kgm <sup>2</sup> ]	moment inercije rotirajućih masa prvog vratila
$J_2$	[kgm <sup>2</sup> ]	moment inercije rotirajućih masa drugog vratila
$k$		koeficijent samoregulacije
$k'$		koeficijent samoreguliranja PTP-a pri potrošnji goriva koji ovisi o kutnoj brzini
$k_B$		koeficijent povećanja kutne brzine PTP – a po nagibu vijka
$k_B'$		koeficijent povećanja kutne brzine po nagibu vijka
$k_G$		koeficijent povećanja kutne brzine uređaja po potrošnji goriva
$k_{Gh}$		koeficijent povećanja potrošnje goriva po koordinatama
$k_{TG}$		koeficijent porasta temperature po potrošnji goriva
$k_{G\omega}$		koeficijent povećanja potrošnje goriva po kutnoj brzini
$k_{T\omega}$		koeficijent porasta temperature po kutnoj brzini
$k_{\omega_1}$		koeficijent povećanja kutne brzine $\omega_2$ po kutnoj brzini $\omega_1$
$k_{\omega_2}$		koeficijent povećanja kutne brzine $\omega_1$ po kutnoj brzini $\omega_2$
$k_1$		koeficijent samoregulacije prvog vratila
$k_2$		koeficijent samoregulacije drugog vratila
$m$	[m]	veličina otvora manevarskog ventila

$\Delta m$	[m]	apsolutna promjena položaja manevarskog ventila
$\sum M$	[Nm]	suma momenata sila koje djeluju na rotor turbine
$M_B$	[Nm]	nelinearna frekvencija ovisnosti vijka (osovine)
$M_C$	[Nm]	moment otpora
$\Delta M_C$	[Nm]	apsolutna promjena momenta otpora
$M_D$	[Nm]	pogonski moment
$\Delta M_D$	[Nm]	apsolutna promjena pogonskog momenta
$M_e$		električni moment sinkronoga generatora
$M_G$		nelinearna frekvencija ovisnosti generatora
$M_K$		nelinearna frekvencija ovisnosti momenata kompresora
$M_{K1}$	[Nm]	moment niskotlačnog kompresora
$M_{K2}$	[Nm]	moment visokotlačnog kompresor
$M_N$	[Nm]	moment opterećenja
$m_N$	[m]	nominalna veličina otvora manevarskog ventila
$\Delta M_N$	[Nm]	apsolutna promjena momenta opterećenja
$M_T$	[Nm]	moment turbine
$M_{T1}$	[Nm]	moment niskotlačne turbine
$M_{T2}$	[Nm]	moment visokotlačne turbine
$N_a$	[kJ/kg]	pad toplinskog kapaciteta
$\Delta p_0$	[Pa]	apsolutni prirast tlaka ispred manevarskog ventila
$p_{0N}$	[Pa]	nominalni prirast tlaka ispred manevarskog ventila
$p_{1N}$	[Pa]	nominalni prirast tlaka pare u parnom volumenu
$p_{2N}$	[Pa]	nominalni prirast tlaka pare u glavnom kondenzatoru
$\Delta p_1$	[Pa]	apsolutni prirast tlaka pare u parnom volumenu
$\Delta p_2$	[Pa]	apsolutni prirast tlaka pare u glavnom kondenzatoru
$r_{1d}$	[ $\Omega$ ]	aktivni otpor prigušnih krugova po osi $d$
$r_f$	[ $\Omega$ ]	aktivni otpor omotača uzbude
$r_{1q}$	[ $\Omega$ ]	aktivni otpor prigušnih krugova po osi $q$
$r_s$	[ $\Omega$ ]	aktivni otpor krugova statora
$R_\mu$	[s]	vremenska konstanta volumena pare
$R_{\psi 0}$	[s]	vremenska konstanta rotora turbine
$R_{\psi 1}$	[s]	vremenska konstanta volumena pare
$T$	[s]	vremenska konstanta
$T_a$	[s]	vremenska konstanta koja karakterizira utjecaj inercije rotiranja masa u ovisnosti o kutnoj brzini osovine pri promjeni potrošnje goriva ili opterećenja regulirajućeg organa sustava
$T_a'$	[s]	vrijeme zaleta
$T_{a1}'$	[s]	vrijeme zaleta prvog vratila
$T_{a2}'$	[s]	vrijeme zaleta drugog vratila



$T_p$	[s]	vremenska konstanta rotora turbine
$T_\varphi$	[s]	vremenska konstanta rotora turbine
$T_{\psi 1}$	[s]	vremenska konstanta rotora turbine
$T_{\psi 2}$	[s]	vremenska konstanta kotla
$u$	[V]	napon u konturama statora
$u_d$	[V]	napon u konturama statora po osi $d$
$u_f$	[V]	napon uzbude
$u_q$	[V]	napon u konturama statora po osi $q$
$V_p$	[m <sup>3</sup> ]	volumen prostora ispunjenog parom
$x_s$	[ $\Omega$ ]	induktivni otpor rasipanja kruga statora
$x_{1d}$	[ $\Omega$ ]	induktivni otpor prigušnih krugova po osi $d$
$x_{1q}$	[ $\Omega$ ]	induktivni otpor prigušnih krugova po osi $q$ .

### Grčke oznake

$\eta_e$		stupanj iskoristivosti parne turbine
$\mu$		relativna promjena položaja manevarskog ventila
$\mu_B$		relativna promjena nagiba osovine
$\mu_G$		relativna promjena potrošnje goriva
$\rho_0$	[kg/m <sup>3</sup> ]	gustoća pare ispred manevarskog ventila
$\rho_1$	[kg/m <sup>3</sup> ]	gustoća pare u parnom volumenu
$\Delta\rho_0$	[kg/m <sup>3</sup> ]	prirast gustoće pare ispred manevarskog ventil
$\Delta\rho_1$	[kg/m <sup>3</sup> ]	prirast gustoće pare u parnom volumenu
$\varphi$		relativni prirast kutne brzine rotora turbine
$\varphi_T$		relativna promjena prirasta temperature plin
$\varphi_\omega$		relativna promjena kutne brzine
$\psi_d$		magnetski tok kruga statora po osi $d$
$\psi_f$	[Wb]	magnetski tok omotača uzbude
$\psi_q$	[Wb]	magnetski tok kruga statora po osi $q$
$\psi_{ad}$	[Wb]	magnetski tok uzajamne indukcije kontura po osi $d$
$\psi_{aq}$	[Wb]	magnetski tok uzajamne indukcije kontura po osi $q$
$\psi_{1d}$	[Wb]	magnetski tok prigušnih krugova po osi $d$
$\psi_{1q}$	[Wb]	magnetski tok prigušnih krugova po osi $q$
$\psi_0$		relativni prirast tlaka pare ispred manevarskog ventila
$\psi_1$		relativni prirast tlaka pare u parni volumen turbine

$\psi_2$		relativni prirast tlaka pare u glavnom kondenzatoru
$\omega$	$[s^{-1}]$	kutna brzina
$\Delta\omega$	$[s^{-1}]$	apsolutni prirast kutne brzine rotora turbine
$\omega_N$	$[s^{-1}]$	nominalna kutna brzina rotora turbine
$\omega_1$	$[s^{-1}]$	kutna brzina prvog vratila
$\omega_2$	$[s^{-1}]$	kutna brzina drugog vratila
$\Delta\omega_1$	$[s^{-1}]$	apsolutna promjena kutne brzine prvog vratila
$\Delta\omega_2$	$[s^{-1}]$	apsolutna promjena kutne brzine drugog vratila
$\omega_{1\sigma}$	$[s^{-1}]$	nominalna kutna brzina prvog vratila
$\omega_{2\sigma}$	$[s^{-1}]$	nominalna kutna brzina drugog vratila.

## POPIS KRATICA

A	pomoćne jednađžbe
$A_R$	faktor pojačavanja
BSG	brodski sinkroni generator
BTGS	brodski turbogeneratorski sustav
BTSG	brodski turbo sinkroni generator
C	jednađžba konstanti
D	koeficijent relativnoga prigušenja
D	derivabilni regulator
DREG	izlazna varijabla iz derivatora
dt	diferencijalni operator – beskonačno mali interval vremena
DT	vremenski interval između dva susjedna proračuna
FI	relativni prirast kutne brzine rotora brodske parne turbine
FIOM1	relativna promjena kutne brzine prve osovine
FIOM2	relativna promjena kutne brzine druge osovine
I	integralni regulator
IPS	inputne promjene stanja
IPS	izlazni tok promjene stanja
IREG	izlazna varijabla iz I – regulatora
K	faktor ili koeficijent povećanja
$K_I$	prijenosni faktor integriranja
$K_D$	prijenosni faktor D – elementa
$K_p$	faktor prijenosa
KPD	prijenosni faktor D – elementa
KPI	prijenosni faktor integriranja
KPP	faktor povećanja P – regulatora
L	jednađžba stanja sustava
L.J	stanje varijable L prije početka računanja J
L.K	stanje varijable L poslije računanja K (sada)
L.L	stanje varijable L za slijedeće računanje L (poslije)
$L_0$	početno stanje u trenutku $t = 0$ (jedinica)
$M_C$	moment otpora (trenje u ležajevima)
$M_D$	pogonski moment

## POPIS KRATICA

A	pomoćne jednažbe
$A_R$	faktor pojačavanja
BSG	brodski sinkroni generator
BTGS	brodski turbogeneratorski sustav
BTSG	brodski turbo sinkroni generator
C	jednažba konstanti
D	koeficijent relativnoga prigušenja
D	derivabilni regulator
DREG	izlazna varijabla iz derivatora
dt	diferencijalni operator – beskonačno mali interval vremena
DT	vremenski interval između dva susjedna proračuna
FI	relativni prirast kutne brzine rotora brodske parne turbine
FIOM1	relativna promjena kutne brzine prve osovine
FIOM2	relativna promjena kutne brzine druge osovine
I	integralni regulator
IPS	inputne promjene stanja
IPS	izlazni tok promjene stanja
IREG	izlazna varijabla iz I – regulatora
K	faktor ili koeficijent povećanja
$K_I$	prijenosni faktor integriranja
$K_D$	prijenosni faktor D – elementa
$K_p$	faktor prijenosa
KPD	prijenosni faktor D – elementa
KPI	prijenosni faktor integriranja
KPP	faktor povećanja P – regulatora
L	jednažba stanja sustava
L.J	stanje varijable L prije početka računanja J
L.K	stanje varijable L poslije računanja K (sada)
L.L	stanje varijable L za slijedeće računanje L (poslije)
$L_0$	početno stanje u trenutku $t = 0$ (jedinica)
$M_C$	moment otpora (trenje u ležajevima)
$M_D$	pogonski moment

MEL	električni moment generatora
MIG	relativna promjena potrošnje goriva
N	jednadžba početnih vrijednosti
NVSS	nova vrijednost stanja sustava
OPT	outputne promjene stanja
P	proporcionalni regulator
PSII	relativni prirast tlaka pare u parni volumen
PTP	plinsko – turbinska postrojenja
PVSS	prethodna vrijednost stanja sustava
R	jednadžba promjene stanja sustava
R.JK	R je promjena stanja varijable (RATE) koja se dogodila vremenskom intervalu DT
RA	inputna promjena stanja toka
RA.JK	iznos promjene stanja koja će biti sumirana u intervalu JK stanju L
RA=IPS	inputna promjena stanja koja će biti dodana stanju L (jedinica/vrijeme)
RS	outputna promjena stanja toka
RS.JK	iznos promjene stanja koji će biti oduzeta u intervalu JK od stanja L (jedinica/vrijeme)
RS=OPS	promjena stanja koja će biti odbijena (output) stanju L
SS	iznos stanja u bilo kojem vremenskom trenutku $t$ (jedinica mjere)
SS <sub>0</sub>	početno stanje u trenutku $t = 0$ (jedinica)
T	vremenska konstanta
UNIREG	univerzalni regulator
UPS	ulazni tok promjene stanja
UPV	uzročno – posljedična veza
VIR	vremenski interval računanja
X	ulazna varijabla na koju djeluje regulator

## POPIS SLIKA

Sl. 1. Principijelna shema sustava jednoosovinske plinske blok – turbina	32
Sl. 2. Principijelna shema sustava dvoosovinske plinske blok – turbina	32
Sl. 3. Dinamičke karakteristike PTP-a pri skokovitom poremećaju potrošnje goriva	33
Sl. 4. Statičke karakteristike turbokompresora	33
Sl. 5. Statičke karakteristike turbokompresora	34
Sl. 6. Statičke karakteristike radnoga dijela PTP-a	34
Sl.7. Strukturna shema PTP-a	36
Sl.8. Ovisnost koeficijenata $T_a$ i $k_G$ o kutnoj brzini	37
Sl.9. Ovisnost između momenata i kutne brzine	38
Sl. 10. Zavisnosti koeficijenata $k$ i $T'_a$ o kutnoj brzini $\omega$	39
Sl 11. Kondenzacijsko parno postrojenje broskog turbogeneratorsa	46
Sl. 12. Prikaz prijenosne funkcije	60
Sl. 13. Prikaz prijenosne funkcije	62
Sl. 14. PD – element (P – element sa elementom kašnjenja u povratnom krugu)	63
Sl. 15. Prikaz prijenosne funkcije	66
Sl. 16. Strukturni model UNIREG PID regulatora u paralelnoj vezi	66
Sl. 17. Shematski prikaz sustav - dinamičkoga računalnoga simulacijskoga modeliranja	69
Sl. 18. Vremenska os u Sustavnoj dinamici	70
Sl. 19. Grafički simbol za varijablu stanja sustava L	73
Sl. 20. Grafička oznaka pomoćnih jednadžbi	74
Sl. 21. Grafički simbol Level funkcije	79
Sl. 22. Grafički simbol Rate funkcije	79
Sl. 23. Grafički simbol Auxiliary funkcije	79
Sl. 24. Grafički simbol Constants funkcije	80
Sl.25. Strukturni dijagram turbokompresora niskog tlaka	84
Sl.26. Strukturni dijagram turbokompresora visokog tlaka	85
Sl. 27. Globalni strukturni model brodske plinske turbine	86
Sl.28. Dijagram toka turbokompresora niskog tlaka	87
Sl.29. Dijagram toka turbokompresora visokog tlaka	87
Sl. 30. Globalni dijagram toka u POWERSIM simbolici brodske plinske turbine s ugrađenim elektronskim PID regulatorom	88

Sl. 31. Strukturni model brodske parne turbine - po volumenu pare	93
Sl. 32. Strukturni model brodske parne turbine - po dinamici rotora	94
Sl. 33. Globalni strukturni model brodske parne turbine	95
Sl. 34. Dijagram toka brodske parne turbine - po volumenu pare	96
Sl. 35. Dijagram toka brodske parne turbine - po dinamici rotora	96
Sl. 36. Globalni dijagram toka brodske parne turbine s ugrađenim PID regulatorom	97
Sl. 37. Strukturni dijagram i dijagram toka prve diferencijalne jednadžbe stanja broskog sinkronoga generatora	103
Sl. 38. Strukturni dijagram i dijagram toka druge diferencijalne jednadžbe stanja broskog sinkronoga generatora	104
Sl. 39. Strukturni dijagram i dijagram toka treće diferencijalne jednadžbe stanja broskog sinkronoga generatora	104
Sl. 40. Strukturni dijagram i dijagram toka četvrte diferencijalne jednadžbe stanja broskog sinkronoga generatora	105
Sl. 41. Strukturni dijagram i dijagram toka pete diferencijalne jednadžbe stanja broskog sinkronoga generatora	105
Sl. 42. Globalni strukturni dijagram broskog sinkronoga generatora s PID regulatorom	106
Sl. 43. Globalni dijagram toka broskog sinkronoga generatora s ugrađenim PID regulatorom	108
Sl. 44. Globalni strukturni dijagram broskog plinskog turbogeneratorskoga sustava	113
Sl. 45. Globalni dijagram toka broskog plinskog turbogeneratorskoga sustava s ugrađenim PID regulatorima u POWERSIM simulacijskom jeziku	114
Sl. 46. Globalni strukturni dijagram broskog parnog turbogeneratorskoga sustava	116
Sl. 47. Globalni dijagram toka broskog parnog turbogeneratorskoga sustava s ugrađenim PID regulatorima u POWERSIM simulacijskom jeziku	117
Sl. 48. Relativna promjena potrošnje goriva	119
Sl. 49. Relativna kutna brzina prve osovine	119
Sl. 50. Relativna kutna brzina druge osovine	119
Sl. 51. Relativna promjena potrošnje goriva	120
Sl. 52. Relativna kutna brzina prve osovine	121
Sl. 53. Relativna kutna brzina druge osovine	121
Sl. 54. Relativna promjena potrošnje goriva	122
Sl. 55. Relativna kutna brzina prve osovine	122
Sl. 56. Relativna kuta brzina druge osovine	123

Sl. 57. Relativna kutna brzina rotora	124
Sl.58.Relativni prirast tlaka pare u parnom volumenu	125
Sl. 59. Relativna kutna brzina rotora FI i relativni prirast tlaka pare u parnom volumenu PSII	127
Sl. 60. Relativna kutna brzina rotora FI	128
Sl.61.Relativni prirast tlaka pare u parnom volumenu PSII	128
Sl. 62. Relativna kutna brzina rotora FI	129
Sl.63.Relativni prirast tlaka pare u parnom volumenu PSII	130
Sl. 64. Relativna kutna brzina prve osovine FIOM1 i druge osovine FIOM2	132
Sl. 65. Ulančani tokovi brodskog sinkronog generatora	132
Sl. 66. Relativna promjena potrošnje goriva MIG i električni moment generatora MEL	133
Sl. 67. Napon na konturama statora generatora	133
Sl. 68. Ukupna jakost struje	134
Sl. 69. Relativna kutna brzina prve osovine FIOM1 i druge osovine FIOM2	135
Sl. 70. Ulančani tokovi brodskog sinkronog generatora	135
Sl. 71. Relativna promjena potrošnje goriva MIG i električni moment generatora MEL	136
Sl. 72. Napon na konturama statora generatora	136
Sl. 73. Ukupna jakost struje	137
Sl. 74. Relativna kutna brzina rotora FI i relativni prirast tlaka pare u parnom volumenu PSII	140
Sl. 75. Ulančani tokovi brodskog sinkronog generatora	141
Sl. 76. Napon na konturama statora generatora U i ukupna jakost struje I	141
Sl. 77. Relativna kutna brzina rotora FI i relativni prirast tlaka pare u parnom volumenu PSII	142
Sl. 78. Ulančani tokovi brodskog sinkronog generatora	143
Sl. 79. Napon na konturama statora generatora U	143
Sl. 80. Ukupna jakost struje I	144



## POPIS TABLICA

Tablica br. 1. Vrijednosti koeficijenata jednadžbi dinamike jednoosovinske PTP-a za različita pogonska stanja.	43
Tablica br. 2. Vrijednosti koeficijenta jednadžbi dinamike po temperaturi plina za dva jednoosovinska sustava.	43
Tablica br. 3. Značenje simbolike iz jednadžbe (63).	78

## 1. UVOD

Svrha je ove disertacije pokazati uspješnost primjene sustav-dinamičkog simulacijskog modeliranja (*System Dynamics Modelling* – Forrester /28/) pri istraživanju dinamike ponašanja složenog nelinearnog brodskog pogonskog sustava.

Brodski turbogeneratorski sustav je 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 u odnosu s relevantnom okolinom.

U disertaciji će biti predstavljena učinkovita primjena znanstvenih metoda istraživanja složenih dinamičkih sustava pod nazivom:

1. kvalitativna simulacijska metodologija Sustavne dinamike (*System Dynamics Modelling Approach*),
2. kvantitativna simulacijska metodologija Sustavne dinamike (*System Dynamics Modelling Approach*),

Metodologija Sustavne dinamike omogućit će izradu i korištenje većeg broja i vrsta simulacijskih modela promatranog realiteta, te konačno omogućiti kontinuiranu kompjutorsku simulaciju na brzim i preciznim digitalnim računalima, što će značajno doprinijeti stjecanju novih saznanja o nelinearnoj naravi dinamike ponašanja turbogeneratorskih sustava u procesu dizajniranja, izučavanja i dijagnosticiranja mogućih kritičnih pogonskih stanja.

Simulacijsko modeliranje uz pomoć Sustavne dinamike i intenzivnog korištenja suvremenih digitalnih računala jedna je od najprimjerenijih i najuspješnijih znanstvenih metoda istraživanja dinamike ponašanja nelinearnih prirodnih, tehničkih i organizacijskih sustava. Metodologija Sustavne dinamike (Forrester /28/), tj. relativno novije znanstvene discipline, u dosadašnjoj edukativnoj i dizajnerskoj praksi, pokazala se kao učinkovito sredstvo za znanstveno istraživanje problematike upravljanja, ponašanja, osjetljivosti i fleksibilnosti mnogobrojnih sustava i procesa.

Kompjutorsko simulacijsko dinamičko istraživanje dobivenih karakteristika ponašanja relevantnih varijabli i osjetljivosti parametara, izvodit će se na PC-u, pri čemu će se koristiti standardne test funkcije kao i simulirani stohastički vanjski utjecaji na parametre turbogeneratorskog sustava.

## 1.1. Postavljanje problema

Dinamičko ispitivanje nelinearnih strojarskih (posebno elektrostrojarskih) sustava je relativno veliki problem u području ispitivanja dinamike ponašanja brodskih pogonskih sustava.

Brodске toplinske turbine, tj. brodski turbo sinkroni generatori (BTSG), bez sumnje, spadaju u skup nelinearnih veoma složenih tehničkih sustava sastavljenih od dva osnovna podsustava: turbinskog sustava i broskog sinkronog generatora. U ovoj disertaciji to su dva turbogeneratora.

Brodski trofazni samouzbudni sinkroni generatori (BSG) u obrađeni kao karakteristični osjetljivi potrošači koje pogoni brodska parna i brodska plinska turbina, tj. oni su osnovni izvor izmjeničnog napona brodskih energetske potrošača.

Brodski turbogeneratorski sustav predstaviti ćemo skupom nelinearnih diferencijalnih jednadžbi, tj. kontinuiranim simulacijskim modelom višeg reda, tzv. jednadžbama stanja, te će on ujedno biti i diskretni simulacijski model jer u potpunosti zadovoljava odabranu veličinu osnovnog računskog interakcijskog koraka  $DT$ .

Moguće je zaključiti da je osnovna problematika u projektiranju turbogeneratorskih sustava bila izražena u činjenici da nisu bili razvijeni odgovarajući kvalitativni i kvantitativni simulacijski modeli čije bi dinamičko ponašanje bilo jednako ponašanju modeliranih sustavnih realiteta, te koji omogućuju temeljitiji i prospektivniji uvid u dinamiku ponašanja nelinearnih pogonskih sustava.

## 1.2. Postavljanje funkcije cilja

Osnovna globalna hipoteza postavljena u ovoj disertaciji je intuitivno uvjerenje autora da je brodski turbogeneratorski sustav (BTGS) nelinearan veoma složen tehnički sustav, te da je kod njega izrazita pojavnost višestrukih međusobnih uzročno-posljedičnih veza i krugova povratnog djelovanja koji dominiraju ponašanjem relevantnih varijabli turbinskog sustava i pogonjenog sinkronog generatora (alternatora).

Nadalje, dopunske su hipoteze da je ova pojavnost toliko složena da će jedino primjena relativno novije znanstvene metodologije sustav-dinamičkog simulacijskog modeliranja imati kao krajnji rezultat postizanje višeg nivoa znanja o dinamičkim

fenomenima prijelaznih pojava promatranog sustava, što će teoretski i praktički biti potvrđeno znanstvenom komparacijom rezultata simulacije i empirijskih mjerenja.

Višestruki su ciljevi istraživanja dinamike ponašanja s aspekta moguće znanstvene implementacije i verifikacije postavljenih hipoteza o korištenju sustav-dinamičkih simulacijskih modela u području dizajniranja, visokoškolske naobrazbe i izobrazbe, eksploatacije i upravljanja složenim brodskim turbogeneratorskim sustavom, te se ogledaju u sljedećem:

1. izrada kvalitativnih (mentalno-verbalni, strukturni i dijagram tokova) i kvantitativnih (matematičkih i kompjutorskih) simulacijskih modela nelinearnog sustava;
2. provjera validnosti dinamike ponašanja modela;
3. primjena simulacijskih modela pri projektiranju, tj. dizajniranju turbogeneratorskih sustava i teoretskoj i praktičnoj inženjerskoj edukaciji (softverski trenažer);
4. primjena heurističke optimizacije parametara simuliranog realiteta, tj. parametara brodskih toplinskih turbina i generatora s aspekta osjetljivosti, stabilnosti i pouzdanosti sustava u dinamičkim uvjetima rada;
5. znanstvena provjera dobivenih rezultata simulacije modela, te predlaganje poboljšanja rada pri raznovrsnim pogonskim stanjima, tj. scenarijima.

Ostali ciljevi su:

Dokazivanje praktične svrsishodnosti primjene sustavne dinamike u procesu simulacije ostalih brodskih sustava i procesa, kao i povećanje kvalitete i pouzdanosti, i korisnosti dizajniranja i educiranja elektrostrojarskih inženjera, po principima *white box* pristupa, a ne *black - box*, kao što je, na žalost, danas najčešći slučaj u praksi, pa i u visokoškolskim ustanovama.

### 1.3. Dosadašnja znanstvena istraživanja

Današnji brzi razvoj industrije i sve zahtjevnije tržište, neophodno traži brzo osnivanje novih projekata, konstrukcija i tehnologija. Dosadašnji razvoj bio je zasnovan na iskustvu projekatata, koje je bilo stečeno dugotrajnim radom, a to predstavlja veoma skup i spor put. Rješavanje ovog problema izuzetno je ubrzano naglim razvojem elektroničkih računala.

Računalom podržana simulacija svih mogućih ekstremnih pogonskih sustava, predstavlja jedan od načina projektiranja sustava, koji je prije svega brz, jeftin, bezopasan i pouzdan. Takav se način projektiranja danas razvija istom brzinom kao i računala, i u biti predstavlja jedan od poticaja što bržeg razvoja kompjutorskih tehnologija.

Sljedeći prikaz radova daje kratak pregled dosadašnjih nastojanja što boljeg i potpunijeg rješavanja problema vezanih uz kompjutorsku simulaciju, optimizaciju, modeliranje dinamičkih sustava, te problema vezanih uz razvoj današnjih brodskih turbina i turbogeneratora.

Prema dostupnoj literaturi: iz knjiga, časopisa, zbornika radova sa znanstvenih simpozija, te članaka dobivenih preko internet mreže, kao i na temelju prisustvovanja i sudjelovanja na znanstvenim skupovima, može se uočiti da se metoda Sustavna dinamika sve više koristi u različitim područjima istraživanja.

Pionir Sustavne dinamike bio je, ustvari, i njezin autor J.W. Forrester koji je u knjizi *Industrial Dynamics*, MIT Press, Cambridge, Mass., 1961. vrlo opširno objasnio osnovne elemente metodologije sustavne dinamike i primjenio ih na modeliranje i simulaciju ponašanja niza aspekata industrijskih sustava. Dalje to nastavlja u sljedećim knjigama *Urban Dynamics* i *Principles of Systems*.

Vrlo brzo nakon uvođenja pojma "sustavna dinamika", ona se počinje primjenjivati i na probleme vezane uz sustave brodskih turbinskih pogona, dizel generatora i samih pogonskih Diesel motora.

Tako je već koncem pedesetih godina D. R. Olsen objavio rad *Simulation of a free piston engine with digital computer* u kojem je predstavljen razvoj simulacijskog modela motora slobodnog klipa, a 1959. H.A. Cook objavio je rad *Analysis and interpretation of turbocharged Diesel engine performance* u kojem su dati rezultati dobiveni simulacijom rada brodskog dizelskog motora s nabijanjem.

A. Fowler je 1988. objavio rad *Microcomputer-based Simulation of Marine Propulsion Systems* u kojem razmatra mogućnost kompjutorske simulacije CODOG

propulzijskog sustava.

U radu *Simulation of Diesel engine performance* grupa autora K. Banisoleiman, L.A. Smith, Z. Bazari i N. Mathieson dana je simulacija rada dizelskog motora u svrhu dijagnosticiranja kvarova (trošenja košuljice i prstenova, propuštanje ispušnih ventila...). Poseban je osvrt dan na projekt MERLIN, Lloyd's Register of Shipping, koji prikazuje velike mogućnosti uporabe simulacije dizelskih motora u njihovom razvoju i eksploataciji.

U mnogobrojnim radovima sustav-dinamičko modeliranje koristi se i za istraživanje ponašanja toplinskih turbina.

Na hrvatskim sveučilištima simulacijsko modeliranje sve se više koristi za istraživanje dinamike ponašanja složenih brodskih sustava i simulaciju raznih pogonskih stanja.

A. Munitić napisao je 1989. knjigu *Kompjuterska simulacija uz pomoć systemske dinamike*, koja predstavlja cjeloviti metodološki priručnik za korištenje sustavne dinamike i odgovarajućih simulacijskih jezika.

V. Medica je 1988. godine obranio doktorsku disertaciju pod nazivom *Simulacija dinamičkih uvjeta rada dizel motora s prednabijanjem kod pogona električnog generatora*. Rad opisuje kompleksni nultodimenzionalni model realnog procesa za simulaciju stacioniranih i dinamičkih uvjeta rada dizelskih motora s prednabijanjem kod pogona sinkronog generatora. Simulacija se u tom radu odnosi na start motora, opterećenje motora, rasterećenja motora te granicu naglog opterećenja koji motor prihvaća, a da pritom ne ispada iz pogona. Na kraju su analizirani čimbenici dizelskog motora koji utječu na dinamičke uvjete rada pri pogonu sinkronog generatora.

L. Milić obranio je 1996. na Pomorskom fakultetu u Rijeci, doktorsku dizertaciju *Dinamičko kontinuirani simulacijski model brodskog dizelmotornog porivnog sustava* u kojoj je izrađen model brodskoga dizelskoga motornoga propulzijskog sustava metodom Sustavne dinamike. Program za simuliranje modela izrađen je u DYNAMO programskom jeziku.

A. Munitić i L. Milić u svojim kasnijim radovima razrađuju probleme vezane uz simulaciju brodskih dizelskih sustava, pa iz njihovih istraživanja, zajedničkih, zasebnih ili u suradnji s drugim autorima, proizlaze znanstveni radovi prezentirani na međunarodnim simpozijima i skupovima.

V. Tomas obranio je 2003. godine doktorsku disertaciju *Model distribuiranog dijagnostičkog sistema brodskih elektroenergetskih postrojenja* na Pomorskom fakultetu u Rijeci, u kojoj je cjelovito definirao distribuirani dijagnostički sistem brodskih elektroenergetskih postrojenja.

J. Dvornik obranio je 2004. godine magisarski rad *Simulacijsko modeliranje brodskog*

*Diesel motora pod opterećenjem* na FESB-u u Splitu, u kojem je skupom nelinearnih diferencijalnih jednadžbi predstavio sustav brodskog Diesel motora, te brodskog sinkronog generatora. U radu su izrađeni kvalitativni i kvantitativni simulacijski modeli Diesel generatora i u konačnici se simulirala dinamika ponašanja složenog sustava brodskog Diesel generatora uz scenarij vrlo složenog kratkog spoja brodske električne mreže.

A. Munitić i J. Dvornik u suradnji s drugim autorima, izradili su niz znanstvenih radova koji su prezentirani na međunarodnim simpozijima i skupovima, i to baš iz područja simulacijskog modeliranja brodskih Diesel i turbinskih sustava, a u kojima su determinirali relevantne uzročno-posljedične veze i dominirajuće krugove povratnog djelovanja i to radove [37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46].

#### **1.4. Metoda znanstvenoga istraživanja**

U ovoj disertaciji koristit ćemo se znanstvenom metodom istraživanja dinamike ponašanja pod nazivom: *Sustavna dinamika (System Dynamics, Forrester /28/)*, koja je razvijena i primjenjena u znanstvenoj praksi upravo u cilju simulacije najsloženijih sustava, kao što su to društveni, ekonomski, ekološki, hidrološki, poslovni, proizvodni, biološki, energetski, proizvodni, transportni, tehnološki, strojo - tehnološko - termodinamički, elektromagnetski, hidraulični i pneumatski sustavi.

Premda Sustavna dinamika, kao znanstvena disciplina, postoji već nekoliko desetljeća, tek je povećanje brzine rada suvremenih digitalnih računala, što je povećalo preciznost simulacijskog modeliranja, omogućilo praktičnu i jednostavnu primjenu kompjutorske simulacije nelinearnih dinamičkih sustava višeg reda (čiji su modeli od više tisuća diferencijalnih jednadžbi), tj. ekstremne složenosti, te posljednjih godina dolazi do značajnije uporabe sustav-dinamičke simulacije na istraživanju dinamike ponašanja svih vrsta složenih sustava.

Duboko vjerujem da je Sustavna dinamika izvanredno znanstveno sredstvo za istraživanje dinamike ponašanja složenih strojarskih sustava i podsustava, pa i elemenata, i nadam se da ću to i dokazati ovom disertacijom

Sustavna dinamika kao znanstvena disciplina je zapravo matematičko- kompjutorsko-simulacijski metodološki alat koji služi kao podloga općoj teoriji sustava i općoj teoriji upravljanja.

Numerička simulacija na elektroničkom računalu osnovna je metoda koja se koristi gotovo u svim projektima izgradnje tehničkih sustava, sustava automatizacije i regulacije.

Povećanjem brzine rada računala povećava se preciznost i točnost ovakvih metoda, čime je omogućena precizna i jednostavna simulacija nelinearnih matematičkih modela.

Metodologija Sustavne dinamike predstavlja višestruko modelsko predstavljanje simuliranog realiteta, te razlikuje:

1. kvalitativno modeliranje (mentalno verbalni, strukturni modeli i dijagrami toka )
2. kvantitativno modeliranje (matematički i kompjutorski modeli).

U ovoj će disertaciji turbogeneratorski sustav biti definiran kao "cjelina", tj. njegovi sustav-dinamički kvantitativni i kvalitativni modeli u interakcijskom uzročno-posljedičnom međusobnom djelovanju pojedinačnih dijelova BTGS-a, kao i u odnosu s "relevantnom" okolinom.

Osim Sustavne dinamike u ovoj disertacije upotrijebit će se još niz klasičnih i relativno novijih znanstvenih metoda:

1. Teorija sustava
2. Teorija upravljanja
3. Teorija regulacijskih sustava
4. Nauka o toplini
5. Operacijska istraživanja
6. Induktivna, deduktivna, komparativna, genetička, matematička, statistička i empirijska metodologija
7. Metoda apstrakcije, generalizacije i agregacije.

### **1.5. Metodološki prikaz disertacije**

Disertacija ima u sedam poglavlja.

U prvom dijelu je postavljen problem, funkcija cilja i osnovne hipoteze, a također je dat i osvrt na dosadašnja znanstvena istraživanja i metode znanstvenoga istraživanja.

U drugom dijelu predstavljene su osnovne karakteristike brodskih plinskih i brodskih parnih turbina. Također su dati matematički modeli brodskih plinskih i parnih turbina, tj. jednadžbe stanja (skup nelinearnih diferencijalnih jednadžbi).



U trećem dijelu dan je matematički model brodskoga sinkronoga generatora. Koristeći se već determiniranim modelom brodskoga sinkronoga generatora (trofaznoga samouzbuđenoga brodskoga sinkronoga generatora) predstavljen je eksplicitni oblik skupa diferencijalnih jednadžbi koje u potpunosti determiniraju dinamiku ponašanja sinkronoga generatora. Isti generator napaja brodsku elektroenergetsku mrežu te će poslužiti kao dinamičko promjenjivo opterećenje brodskih plinskih i parnih turbina za različite slučajeve mogućih pogonskih stanja.

U četvrtom dijelu dane su teorijske karakteristike brodskih regulatora broja okretaja, počevši od najjednostavnijih do najsloženijih, te su determinirani njihovi sustav - dinamički simulacijski modeli. Model univerzalnoga PID-a je implementiran u glavni model u obliku Macro funkcija što omogućuje njihovo višestruko korištenje i aktiviranje.

U petom dijelu predstavljena je znanstvena metodologija Sustavne dinamike (*System Dynamics* – Forrester /28/), a i iznesene su karakteristične definicije metode Sustavne dinamike, koje se odnose na kvalitativno i kvantitativno simulacijsko modeliranje tehničkih, prirodnih i organizacijskih sustava. Također je predstavljena konkretna primjena sustav-dinamičke metodologije pri izradi kvalitativnih mentalno-verbalnih, strukturno dijagramskih simulacijskih modela te kvantitativnih, tj. matematičkih i kompjutorskih simulacijskih modela brodskih plinskih i parnih turbina te brodskog sinkronog generatora.

Determinirali su se i dominantni krugovi povratnoga djelovanja (KPD), kojima protječu mnogobrojni materijalni i informacijski tokovi između relevantne "okoline" i promatranoga sustava. Na kraju su predstavljeni dijagram toka u DYNAMO simbolici, tj. u POWERSIM programskom simulacijskom paketu, brodskog plinskog i parnog turbogeneratora.

U šestom dijelu predstavljeni su rezultati sustav -dinamičkoga simuliranja i optimiranja predloženih modela, provedena je tzv. "heuristička optimizacija", tj. optimirani su parametri regulatora broja okretaja brodskih plinskih i parnih turbina.

Sedmi dio sadrži zaključke.

## **2. MATEMATIČKI MODELI BRODSKIH PLINSKIH I PARNIH TURBINA**

### **2.1. Simulacijski model brodske plinske turbine**

#### **2.1.1. Jednadžbe stanja brodske plinske turbine**

Prema konstruktivnoj shemi plinsko-turbinska postrojenja (PTP) se dijele na:

1. Blok-turbine (Sl.1.), jednoosovinske i dvoosovinske, i
2. Turbine slobodne snage, dvoosovinske i troosovinske.

Kod blok-turbinskih jednoosovinskih PTP-a kompresor, turbina i potrošači spajaju se na zajedničku osovinu (Sl. 1.), a kod dvoosovinskih blok-turbinskih PTP-a potrošač se spaja na osovinu niskotlačne turbine dok su visokotlačna turbina i kompresor visokog tlaka mehanički odvojeni i rotiraju s većim brojem okretaja.

Kod dvoosovinskih PTP-a slobodne snage kompresor je spojen s visokotlačnom turbinom, a potrošači s nezavisnom niskotlačnom turbinom. U troosovinskih uređaja kompresija se odvija u dva, a ekspanzija u tri stupnja. Potrošač je spojen na nezavisnu turbinu niskog tlaka.

Statičke i dinamičke karakteristike blok-turbinskih PTP-a ovise o promjeni opterećenja jer postoji mehanička veza između generirajućeg broja okretaja i opterećenja, što djeluje na stupanj komprimiranja i potrošnju zraka kompresora, broj okretaja kompresora, temperaturu plina i druge parametre. Kod PTP-a slobodne snage parametri plina na ulazu praktički se ne mijenjaju promjenom opterećenja, tako da parametri plina na ulazu ostaju konstantni za širok raspon promjena opterećenja.

Proces rada PTP-a karakterizira kontinuirana predaja i akumulacija raznih oblika energije u nizu uređaja, agregata i mehanizama.

Dva osnovna oblika akumulirane energije su:

1. Akumulator toplinske energije (radni medij, metalne cijevi, komora izgaranja, lopatice turbine, rotor, itd.)
2. Akumulator kinetičke energije (kompresor, osovine, mehanizmi, i sl.).

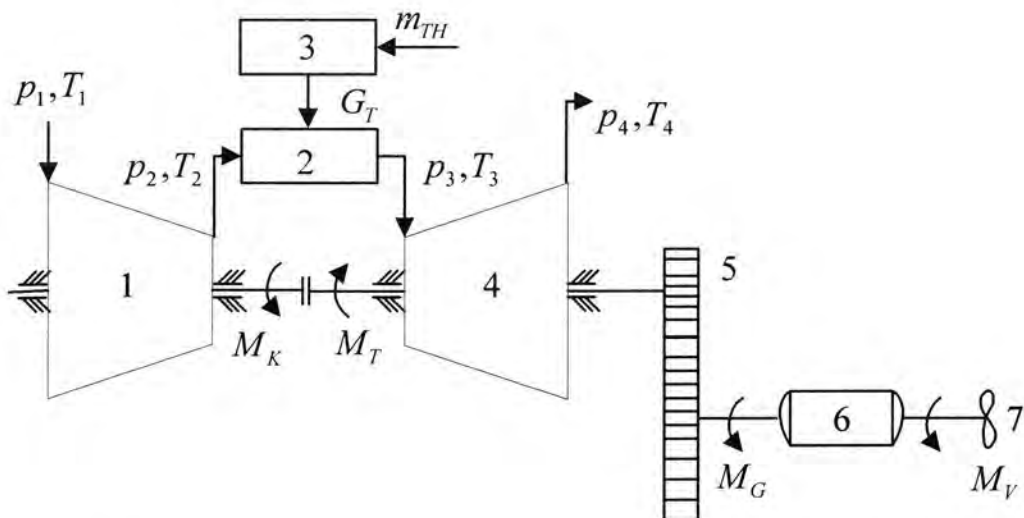
Parametri toplinske energije određuju se temperaturom radnog medija (goriva, zraka i plina), a parametri kinetičke energije brojem okretaja vlastitog rotora.

Stabilnost PTP-a kao akumulatora kinetičke energije (prema [1]) određuje statički karakter turbokompresora - moment kompresora  $M_K$  i turbine  $M_T$  u ovisnosti o frekvenciji okretanja pri konstantnom stanju regulirajućeg organa pumpe goriva. Ako potrošnja goriva ovisi o frekvenciji okretanja turbokompresora, tada PTP ima *negativno* samoreguliranje (nestabilno) u zoni malih kutnih brzina  $\omega_2$  i nešto bolje samoreguliranje u zoni većih brzina  $\omega_4$  (Sl. 4.).

Nulto samoreguliranje ima položaj pri kutnoj brzini  $\omega_3$ , a obuhvaća područje 40-65 % nominalne vrijednosti. Ako potrošnja goriva ne ovisi o kutnoj brzini rotora turbokompresora, PTP ima samoreguliranje (negativno - stabilno), uz daleko veće područje brzina turbokompresora (Sl. 5.). Porastom broja stupnjeva turbine, stabilnost PTP-a smanjuje se u zoni većih i povećava u zoni malih vrijednosti kutne brzine. Povećanjem stupnja kompresije pogoršava se stabilnost PTP-a. Snaga dvoosovinskih i troosovinskih PTP-a uvijek je stabilna po kutnoj brzini  $\omega$  (to se objašnjava karakterom momenta potrošnje (Sl. 6.).

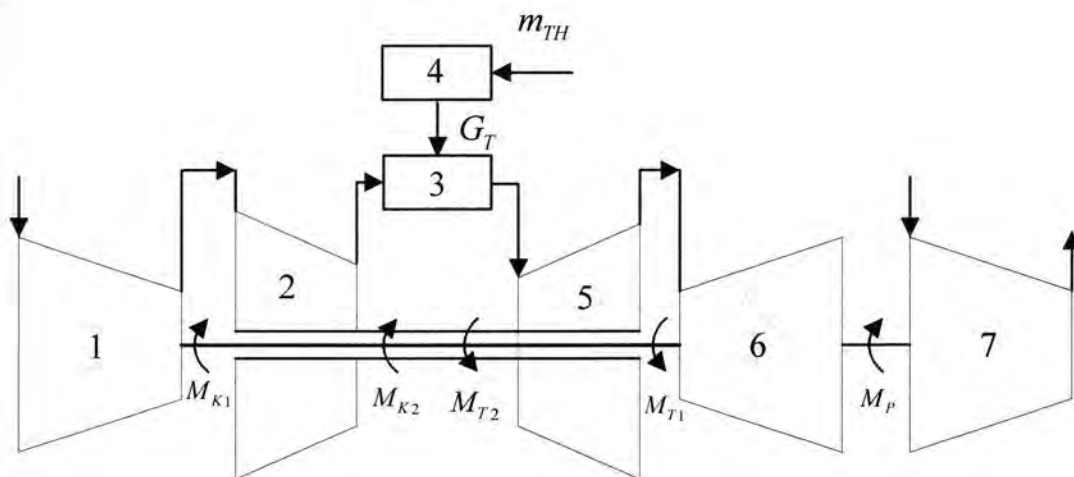
Vlastitu stabilnost po kutnoj brzini ocjenjujemo numeričkim znakom koeficijenta reguliranja. Pri pozitivnom koeficijentu samoreguliranja PTP je stabilan, pri negativnom je nestabilan, a pri nultom je neutralan. Koeficijent samoreguliranja ovisi uglavnom o predznaku i veličini kuta između tangente karakteristike  $M_K$  i  $M_T$  u točki u kojoj se one sijeku i o odgovarajućem stanju statičke ravnoteže turbokompresora. Zbog toga on ovisi o tipu uređaja i stupnju djelovanja kompresora i turbine, stanju akumulatora toplinske energije, kvaliteti i stanju drugih faktora, od kojih neke nije moguće definirati. U području malih i srednjih iznosa kutnih brzina turbokompresora, uređaji dovoda goriva reguliraju se pomoću regulatora konstantne potrošnje goriva, počevši s  $\omega = (0,65-0,70) \omega_n$  regulatora brzine.

U posljednje vrijeme za sva pogonska stanja primjenjuje se "regulator potrošnje goriva" odgovarajuće stabilnosti PTP-a u svim pogonskim stanjima. Nestabilnost PTP-a kao akumulatora energije pojavljuje se za vrijeme prednabijanja kompresora. Promjena tlaka u tom akumulatoru provodi se praktički trenutačno po odnosu izmjena kutne brzine, što otežava automatsko reguliranje tlaka blizu granice predtlaka ili pak onemogućuje automatsko reguliranje. Zbog nestabilnosti komore izgaranja PTP-a, pojavljuje se povećanje plamena ili njegovo smanjenje pri nedostatku zraka ili višku goriva, a također i ako je nekvalitetna smjesa goriva i zraka.



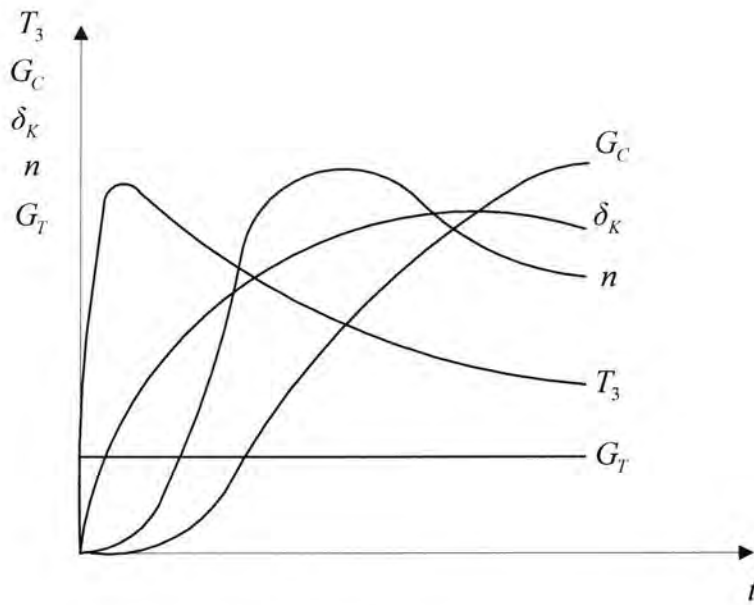
Sl. 1. Principijelna shema sustava jednoosovinske plinske blok-turbine

1- kompresor; 2- komora izgaranja; 3- pumpa goriva; 4- turbina;  
5-reduktor; 6- generator; 7- vijak

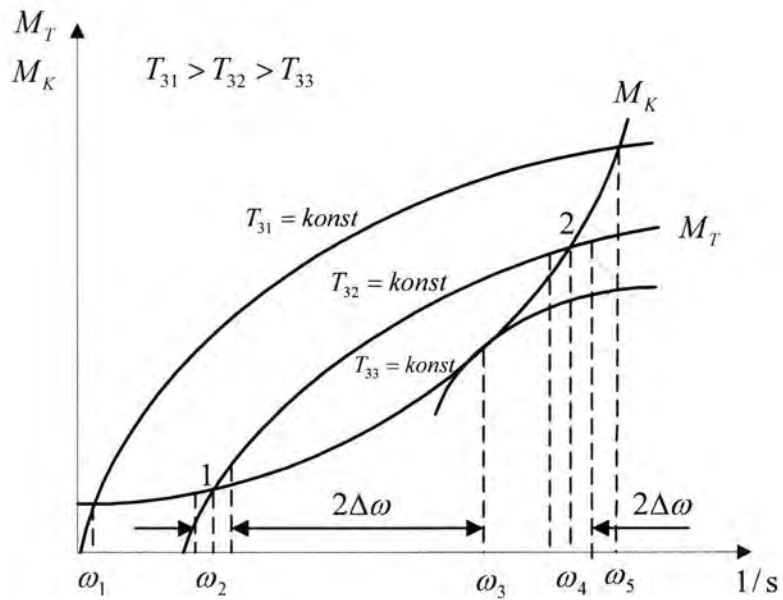


Sl. 2. Principijelna shema sustava dvoosovinske plinske blok-turbine

1- kompresor niskog tlaka; 2- kompresor visokog tlaka; 3- komora izgaranja,  
4- pumpa goriva; 5- turbina visokog tlaka; 6- turbina niskog tlaka;  
7- potrošači

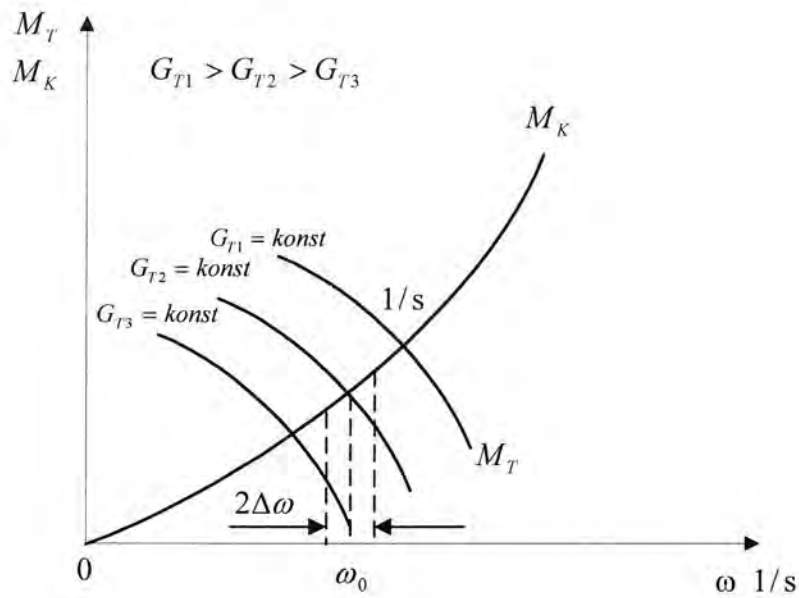


Sl. 3. Dinamičke karakteristike PTP-a pri skokovitom poremećaju potrošnje goriva  $G_T$ - apsolutna potrošnja goriva,  $G_C$  - potrošnja goriva,  $\delta_k$  - stupanj komprimiranja kompresora,  $T_3$  - temperatura plina,  $n$  - broj okretaja rotora turbine.



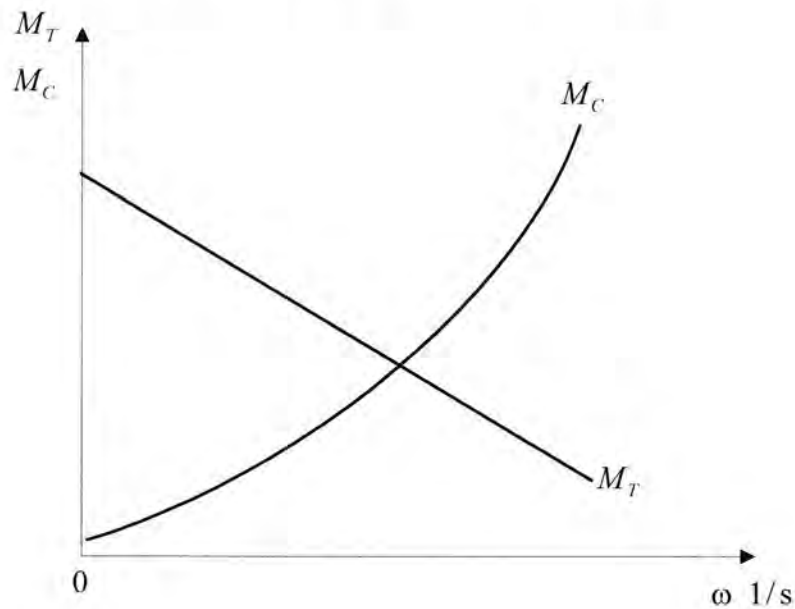
Sl. 4. Statičke karakteristike turbokompresora  $\omega_{1-5}$  - kutne brzina rotora turbine,  $M_K$ - moment kompresora,  $M_T$ - moment turbine,  $T_3$ - temperatura plina pri određenom tlaku

UNIVERSITETNA KNJIŽNICA  
RIJEKA



Sl. 5. Statičke karakteristike turbokompresora

$\omega$  - kutna brzina turbine,  $M_K$ - moment kompresora,  $M_T$ - moment turbine,  $G_{T1-3}$ - apsolutna potrošnja goriva pri odgovarajućoj kutnoj brzini  $\omega_{1-3}$



Sl. 6. Statičke karakteristike radnoga dijela PTP-a

$M_C$  - moment potrošnje,  $M_T$  - moment turbine,  $\omega$  - kutna brzina turbine

Najčešća dinamička analiza plinske turbine temelji se na promatranju postrojenja kao akumulatora kinetičke energije, dok se dinamika toplinske energije može uvjetno zanemariti. Proces izgaranja goriva smatra se trenutačnim, stanje tlaka u turbini konstantnim, potrošnja zraka jednaka je potrošnji plina, parametri atmosferskog zraka relativno su nepromijenjeni, a prijelaz topline idealiziran.

Linearizirano ponašanje postrojenja vrijedi za slučaj kada potrošnja goriva ne ovisi o kutnoj brzini rotora turbokompresora.

Matematički model dinamičkog ponašanja PTP-a za taj slučaj izgleda ovako:

$$T_a \dot{\varphi}_\omega + \varphi_\omega = k_G \mu_G - k_B \mu_B - f(t) \quad (1)$$

gdje je:

$\dot{\varphi}_\omega = \frac{d\varphi_\omega}{dt}$  - brzina relativne promjene kutne brzine

$\varphi_\omega$  - relativna promjena kutne brzine

$\omega$  - nazivna kutna brzina turbine

$\mu_G$  - relativna promjena potrošnje goriva

$\Delta G_T$  - apsolutna potrošnja goriva .

Napominjemo da su  $\varphi_\omega$ ,  $\mu_G$  i  $\mu_B$  - relativne promjene malih promjena varijabli prilikom  $\Delta t \rightarrow 0$ , te se tretiraju kao konstante i iznose:

Vrijednosti koeficijenata preuzeti su iz [1].

$$\varphi_\omega = \frac{\omega}{\omega_\sigma} ; \quad \mu_G = \frac{\Delta G_T}{G_{T\sigma}} ; \quad \mu_B = \frac{\Delta H}{H_\sigma},$$

gdje je:

$\mu_B$  - relativna promjena nagiba osovine

$\Delta H$  - apsolutna pogreška pomaka osovine

$H_\sigma$  - bazni iznos pomaka osovine.

$T_a$  - Vremenska konstanta koja karakterizira utjecaj inercije rotiranja masa u ovisnosti o kutnoj brzini osovine pri promjeni potrošnje goriva ili opterećenja, iznosi:

$$T_a = \frac{J}{\left(\frac{\partial M_K}{\partial \omega}\right)_0 + \left(\frac{\partial M_G}{\partial \omega}\right)_0 + \left(\frac{\partial M_B}{\partial \omega}\right)_0 - \left(\frac{\partial M_T}{\partial \omega}\right)_0}$$

$k_G$  - koeficijent povećanja kutne brzine uređaja po potrošnji goriva je:

$$k_G = \frac{\left(\frac{\partial M_T}{\partial G_T}\right)_0 G_{T\sigma}}{\left[\left(\frac{\partial M_K}{\partial \omega}\right)_0 + \left(\frac{\partial M_G}{\partial \omega}\right)_0 + \left(\frac{\partial M_B}{\partial \omega}\right)_0 - \left(\frac{\partial M_T}{\partial \omega}\right)_0\right] \omega_\sigma}$$

$k_B$  - koeficijent povećanja kutne brzine PTP-a po nagibu vijka je:

$$k_B = \frac{\left(\frac{\partial M_B}{\partial H}\right)_0 H_\sigma}{\left[\left(\frac{\partial M_K}{\partial \omega}\right)_0 + \left(\frac{\partial M_G}{\partial \omega}\right)_0 + \left(\frac{\partial M_B}{\partial \omega}\right)_0 - \left(\frac{\partial M_T}{\partial \omega}\right)_0\right] \omega_\sigma}$$

$f(t)$  - relativna promjena vanjskih smetnji je:

$$f(t) = \frac{\Delta M_G [I(t)] + \Delta M_B [F(t)]}{\left[\left(\frac{\partial M_K}{\partial \omega}\right)_0 + \left(\frac{\partial M_G}{\partial \omega}\right)_0 + \left(\frac{\partial M_B}{\partial \omega}\right)_0 - \left(\frac{\partial M_T}{\partial \omega}\right)_0\right] \omega_\sigma}$$

gdje je:

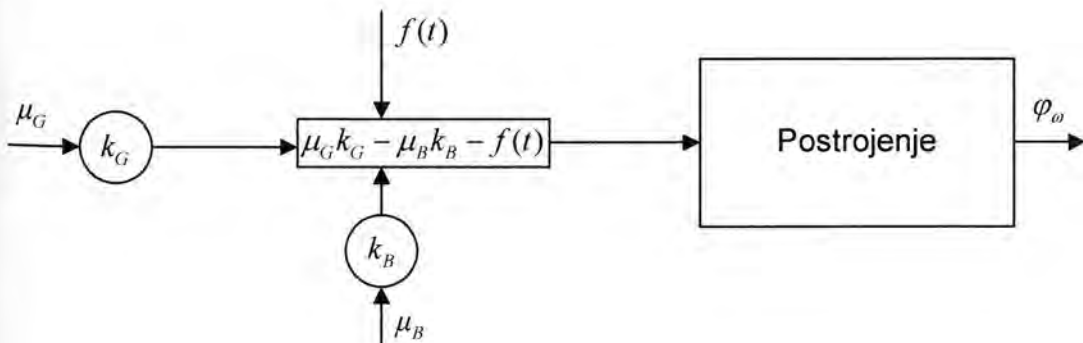
$M_x$ ;  $x \in \{K, G, B, T\}$  - momenti

$\Delta M_G [I(t)] + \Delta M_B [F(t)]$  - varijable koje utječu na promjene momenata  $M_G$  i  $M_B$ , a ovise o opterećenju generatora  $I(t)$  i smetnji  $F(t)$  (šumu) koja djeluje na vijak;

$J$  - moment inercije svih rotirajućih masa i pripadnih masa voda koje se odnose na os rotacije PTP-a.

Na ovom mjestu moramo istaknuti da indeks 0 kod parcijalnih derivacija označava trenutak kada je nastao statički režim, tj. da je vrijednost  $\omega = \omega_0$  kod svih parcijalnih derivacija u prethodnim formulama.

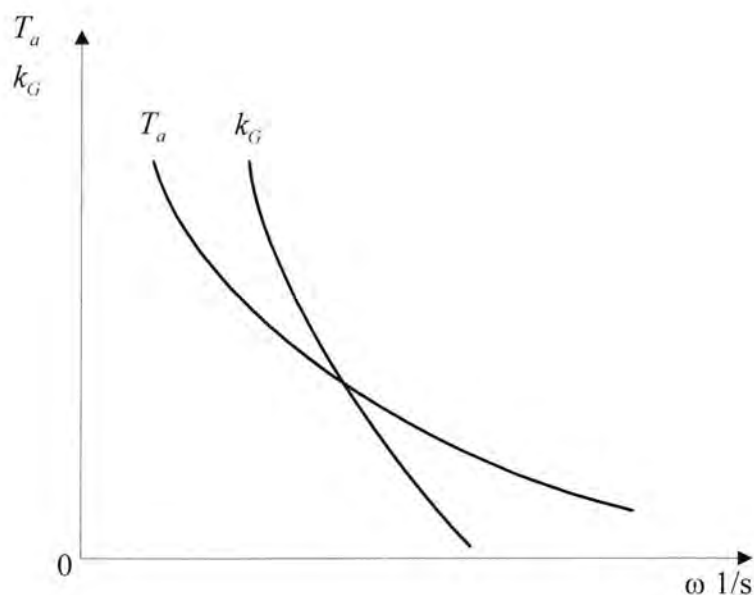
Strukturna shema PTP-a je:



Sl. 7. Strukturna shema PTP-a



Vremenska konstanta  $T_a$  i koeficijent povećanja  $K_G$  s porastom kutne brzine smanjuju se jer povećanje brzine prati porast rada. (Sl.8.)



Sl.8. Ovisnost koeficijenata  $T_a$  i  $k_G$  o kutnoj brzini

Funkcionalna ovisnost momenata PTP-a je

$$M + M_T = M_K + M_G + M_B,$$

tj.

$$M = M_K + M_G + M_B - M_T.$$

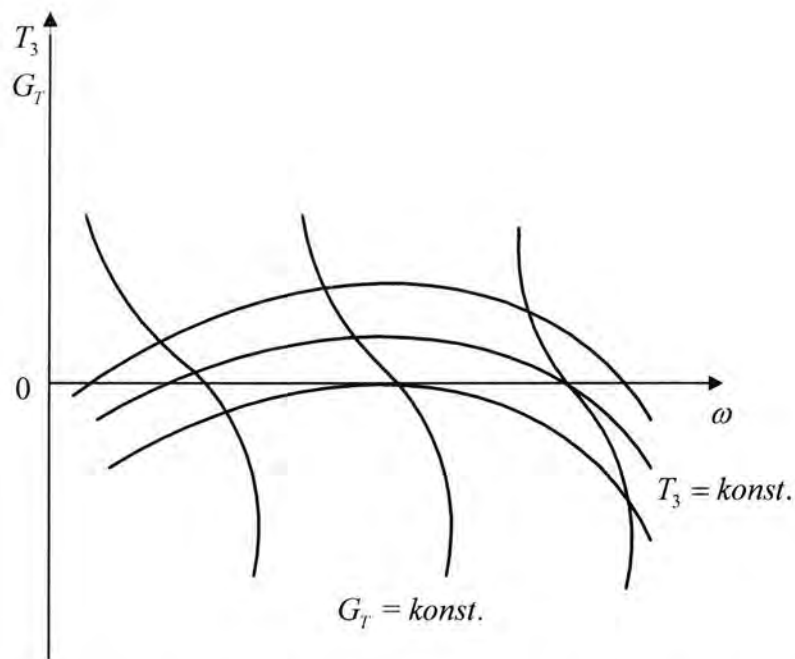
Lineariziranjem te funkcionalne ovisnosti (Taylorov razvoj) oko početnog (baznog) stanja  $\omega = \omega_0$  je:

$$\left(\frac{\partial \Delta M}{\partial \omega}\right)_0 \Delta \omega = \left(\frac{\partial M_K}{\partial \omega}\right)_0 \Delta \omega + \left(\frac{\partial M_G}{\partial \omega}\right)_0 \Delta \omega + \left(\frac{\partial M_B}{\partial \omega}\right)_0 \Delta \omega - \left(\frac{\partial M_T}{\partial \omega}\right)_0 \Delta \omega,$$

tj.

$$\left(\frac{\partial \Delta M}{\partial \omega}\right)_0 = \left(\frac{\partial M_K}{\partial \omega}\right)_0 + \left(\frac{\partial M_G}{\partial \omega}\right)_0 + \left(\frac{\partial M_B}{\partial \omega}\right)_0 - \left(\frac{\partial M_T}{\partial \omega}\right)_0$$

pri čemu se sigurnosni moment PTP-a mijenja kako je prikazano na slici 9.:



Sl.9. Ovisnost između momenata i kutne brzine (prema [1])

Svođenjem jednadžbe dinamike (1) na bilo koji oblik dijeleći sve njezine dijelove s  $k_G$  dobivamo:

$$T'_a \dot{\varphi}_\omega + k \varphi_\omega = \mu_G - k'_B \mu_B - f_1(t) \quad (2)$$

gdje je:

$$T'_a = \frac{J \omega_\sigma}{\left( \frac{\partial M_T}{\partial G_T} \right)_0 G_{T\sigma}} \quad \text{- vrijeme zaleta (upućivanje i isključivanje);}$$

$$k = \frac{\left[ \left( \frac{\partial M_K}{\partial \omega} \right)_0 + \left( \frac{\partial M_G}{\partial \omega} \right)_0 + \left( \frac{\partial M_B}{\partial \omega} \right)_0 - \left( \frac{\partial M_T}{\partial \omega} \right)_0 \right] \omega_\sigma}{\left( \frac{\partial M_T}{\partial G_T} \right)_0 G_{T\sigma}} \quad \text{- koeficijent samoreguliranja}$$

PTP-a;

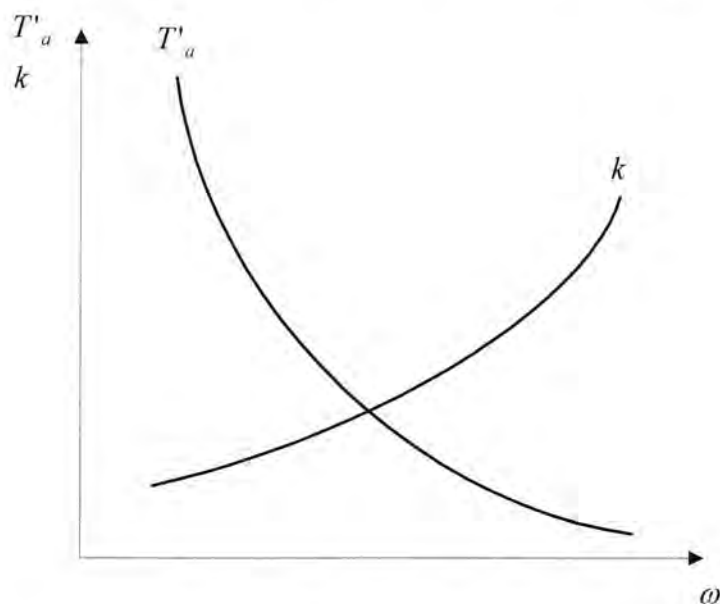
$$k'_B = \frac{\left( \frac{\partial M_B}{\partial H} \right)_0 H_\sigma}{\left( \frac{\partial M_T}{\partial G_T} \right)_0 G_{T\sigma}} \quad \text{- koeficijent povećanja kutne brzine po nagibu vijka;}$$

$$f_1(t) = \frac{\Delta M_G [I(t)] + \Delta M_B [F(t)]}{\left( \frac{\partial M_T}{\partial G_T} \right)_0 G_{T\sigma}} \quad - \text{ relativna promjena vanjskih smetnji.}$$

Pri konstantnoj kutnoj brzini  $\omega$  ovisnost  $M_T$  o  $G_T$  je linearna pa je:  $T'_a = \frac{J\omega_\sigma}{M_{T\sigma}}$ .

$T'_a$ , kao vrijeme zaleta PTP-a (veoma kratkog trajanja) ovisi o kutnoj brzini  $\omega_\sigma$  ako kočenje nedjeluje i pri konstantom  $M_{T\sigma}$ . Ovako izražena kutna brzina PTP-a ovisi o potrošnji goriva, ali ne ovisi o brzini izmjene potrošnje goriva. Prema tome, brzina izmjene goriva ne djeluje na vrijeme  $T'_a$ . U svim pogonskim stanjima koeficijent samoreguliranja  $k$  je pozitivan.

Na slici 10. prikazan je karakter zavisnosti koeficijenata  $k$  i  $T'_a$  o kutnoj brzini  $\omega$ .



Sl. 10. Zavisnosti koeficijenata  $k$  i  $T'_a$  o kutnoj brzini  $\omega$

Brojne vrijednosti  $\omega$  mogu se odrediti empirijski iz  $T_a$ ,  $T'_a$ ,  $k_B$ ,  $k'_B$ ,  $k_G$  i  $k$ . Mogu se odrediti tako da se odredi energija. Proračunska metoda temelji se na jednakosti između osovinskih parametara rada procesa PTP-a koji su zadani analitički ili grafički. Ako potrošnja goriva ovisi o kutnoj brzini  $\omega$  rotora turbokompresora (tj. uređaj se razmatra skupa s crpkom goriva), dobivamo jednadžbu dinamike crpke:

$$\mu_G = k_{G\omega} \varphi_\omega + k_{GH} \mu_{TH} \quad (3)$$

gdje je:

$k_{G\omega} = \left( \frac{\partial G_T}{\partial \omega} \right)_0 \frac{\omega_\sigma}{G_{T\sigma}}$  - koeficijent povećanja potrošnje goriva po kutnoj brzini;

$k_{GH} = \left( \frac{\partial G_T}{\partial m_{TH}} \right)_0 \frac{m_{TH\sigma}}{G_{T\sigma}}$  - koeficijent povećanja potrošnje goriva po koordinatama regulirajućeg organa crpke.

Koeficijent  $k_{G\omega} > 0$  i  $k_{GH} > 0$ , s rastom  $\omega$  i  $m_{TH}$  raste i potrošnja goriva.

Eliminiranjem  $\mu_G$  iz (2) pomoću (3) dobiva se jednačba dinamike turbine s crpkom goriva:

$$T'_a \dot{\varphi}_\omega + (k - k_{G\omega})\varphi_\omega = k_{GH}\mu_{TH} - k'_B\mu_B - f_1(t) \quad (4)$$

gdje je:

$$k - k_{G\omega} = k'$$

$k'$  - koeficijent samoreguliranja PTP-a pri potrošnji goriva koji ovisi o kutnoj brzini  $\omega$ ,  $k' < k$ , upravo kako je  $k_{G\omega} > 0$ , pri maloj brzini  $k' \leq 0$ .

Koeficijent samoreguliranja (prema [1]) iznosi:

$$k = 2-3,5$$

$$k' = 1,5-2.$$

Kod jednoosovinskih i dvoosovinskih uređaja PTP-a s nezavisnom snagom turbine,  $k$  i  $k'$  su manji nego kod dvoosovinskih blok-turbina i troosovinskih PTP-a. To se objašnjava djelovanjem i drugih faktora, kao i sličnim karakteristikama  $M_t$  i  $M_k$  pri malim veličinama kompresora i turbine i značajno ih se umanjuje smanjenjem kutne brzine turbokompresora.

Jednačba dinamike PTP-a, po temperaturi plina ispred turbine, je oblika:

$$\varphi_T = k_{T\omega}\varphi_\omega + k_{TG}\mu_G \quad (5)$$

gdje je:

$\varphi_T = \frac{\Delta T_3}{T_{3\sigma}}$  - relativna promjena prirasta temperature plina;

$k_{T\omega} = \left( \frac{\partial T_3}{\partial \omega} \right)_0 \frac{\omega_\sigma}{T_{3\sigma}}$  - koeficijent porasta temperature po kutnoj brzini;

$k_{TG} = \left( \frac{\partial T_3}{\partial G_T} \right)_{\theta} \frac{G_{T\sigma}}{T_{3\sigma}}$  - koeficijent porasta temperature po potrošnji goriva;

$T_3$  - temperatura plina.

Kako temperatura plina opada s porastom kutne brzine  $\omega$  i povećava se porast potrošnje goriva, tako je  $k_{T\omega} < 0$  i  $k_{TG} > 0$ , zamjenom  $\varphi_\omega$  iz (1) u (5) dobivamo:

$$T_a \dot{\varphi}_T + \varphi_T = T_a k_{TG} \dot{\mu}_G + (k_{TG} + k_G k_{T\omega}) \mu_G + k_{T\omega} [k_B \mu_B - f(t)] \quad (6)$$

Ovakav način rada u ovisnosti o kutnoj brzini i temperaturi plina ovisi ne samo o potrošnji goriva nego i o brzini promjene potrošnje goriva. Pri brzini promjene potrošnje goriva, temperatura plina mijenjat će se veoma brzo. Mijenja se i koeficijent viška zraka ako potrošnja zraka ne ovisi o brzini izmjene potrošnje goriva. Zato je pri brzom promjeni potrošnje goriva moguće pregrijavanje PTP-a koje dovodi do eksplozije plamena u komori izgaranja.

Rješenje (6) pri  $\mu_B = f(t) = 0$  pri skokovitoj promijeni potrošnje goriva je oblika:

$$\varphi_T = \left[ k_{TG} + k_{T\omega} k_G (1 - e^{-\frac{t}{T_a}}) \right] \mu_G \quad (7)$$

Iz (7) vidljivo je da je rast temperature plina proporcionalan  $k_{TG} \mu_G$ , a nastavak rasta temperature i intenzitet ovise o vremenskoj konstanti  $T_a$ . Čim je viša  $T_a$ , tim se sporije snižava temperatura plina.

Naravno, uvjet  $k_B \mu_B = f(t)$  je mnogo općenitiji. Pišući (6) u normiranom obliku, dobivamo

$$\dot{\varphi}_T + T_a^{-1} \varphi_T = k_{TG} (\dot{\mu}_G + T_a^{-1} \mu_G) + T_a^{-1} k_G k_{T\omega} \mu_G,$$

a to je linearna diferencijalna jednačba po  $\varphi_T = \varphi_T(t)$ , u kojoj, zbog skokovitih promjena temperature  $\mu_G = \mu_G(t)$  ne utječe bitno na ponašanje PTP-a. Slijedi:

$$(e^{t/T_a} \varphi_T)' = k_{TG} (e^{t/T_a} \mu_G)' + T_a^{-1} k_G k_{T\omega} \mu_G e^{t/T_a}$$

što nakon integriranja na  $[0, t]$ , budući da je  $\varphi_T(0) = \mu_G(0) = 0$ , daje

$$e^{t/T_a} \varphi_T = e^{t/T_a} k_{TG} \mu_G + k_G k_{T\omega} \int_0^{t/T_a} e^x dx$$

Odmah je jasno da vrijedi

$$\varphi_T = \mu_G (k_{TG} + k_G k_{T\omega} (1 - e^{-t/T_a}))$$

Zaista, uzimajući da je  $\mu_G(t) \approx \text{const.}$  na  $[0, t]$ , vrijedi

$$\frac{1}{T_a} \int_0^t \mu_G e^{t'/T_a} dt \approx (e^{t/T_a} - 1) \mu_G$$

što daje (7).

Nadalje, pod uvjetom:

$$k_B \mu_B = f(t)$$

vrijedi

$$H(\omega) = C e^{g(t)\Delta\omega}$$

kao što će poslije biti pokazano.

Zaključujemo: *Ako brzina pomaka osovine eksponencijalno ovisi o kutnoj brzini  $\omega$ ,  $\varphi_T$  je oblika (7).*

Komentirajmo sada uvjet

$$k_B \mu_B = f(t) \tag{8}$$

Relacija (8) se lako transformira u:

$$\frac{\Delta H}{H_\sigma} = g(t) \tag{9}$$

gdje je:

$$g(t) = \frac{\Delta M_G [I(t)] + \Delta M_B [F(t)]}{\left( \frac{\partial M_B}{\partial H} \right)_0 H_\sigma}$$

Ovdje je nazivnik konstantan, jer se radi o parcijalnoj derivaciji u  $\omega_0$ , dok je  $H_\sigma$  fiksirana inicijalna vrijednost jedna varijable, dakle desna strana (9) ne ovisi o  $\omega$ . Fizičko tumačenje jednadžbe (9) je *relativna promjena pomaka osovine jednaka je relativnoj promjeni vanjskih smetnji sustava PTP-a.*

Iz (9) dobivamo:

$$\frac{\partial}{\partial \omega} (\ln H) d\omega = g(t)$$

Integriramo li ovu relaciju od nekog  $\omega_0 \geq 0$  do nekog  $\omega > \omega_0$ , dobivamo

$$\ln H = g(t)(\omega - \omega_0) = g(t)\Delta\omega,$$

tj.

$$H(\omega) = Ce^{g(t)\Delta\omega}$$

ZAKLJUČAK: Pod uvjetom iz jednadžbe (8) vrijedi

$$H(\omega) = e^{g(t)\omega} \quad (10)$$

Na ovom smo mjestu birali da je

$$C = e^{g(t)\omega_0}$$

U Tablici br.1. dane su vrijednosti koeficijenata jednadžbi dinamike jednoosovinske PTP-a za različita pogonska stanja (prema [1]).

U Tablici br.2. dane su vrijednosti koeficijenta jednadžbi dinamike po temperaturi plina za dva jednoosovinska sustava (prema [1]).

Tablica br. 1. Vrijednosti koeficijenata jednadžbi dinamike jednoosovinske PTP-a za različita pogonska stanja

$n_1$ o/min	$T_a$	$T'_a$	$k_{GH}$	$k$
3000	1,77	0,70	2,54	0,25
4000	1,45	0,96	1,51	0,67
5000	1,23	1,64	0,75	1,33
6000	0,99	2,89	0,35	3,00
6500	0,59	3,00	0,205	5,00

Tablica br. 2. Vrijednosti koeficijenta jednadžbi dinamike po temperaturi plina za dva jednoosovinska sustava

$n_1$ o/min	$T_a$	$T'_a$	$k_{GH}$	$k$	$k_{TG}$	$k_{T\omega}$
8000	0,65	1,1	0,59	1,52	0,4446	-0,419
	0,56	1,24	0,45	2,2	0,517	-0,415

Osnovne jednadžbe dvoosovinske plinske turbine (prema [1]):

Jednadžba (vratilo turbokompresora niskog tlaka - potrošača)

$$T'_{a1} \varphi_{\omega 1} + k_1 \varphi_{\omega 1} = \mu_G + k'_{\omega 2} \varphi_{\omega 2} \quad (11)$$

Jednadžba (vratilo turbokompresora visokog tlaka)

$$T'_{a2} \varphi_{\omega 2} + k_2 \varphi_{\omega 2} = \mu_G + k'_{\omega 1} \varphi_{\omega 1} \quad (12)$$

Pri čemu je:

vrijeme zaleta 1. i 2. vratila

$$T'_{a1} = \frac{J_1 \omega_{1n}}{\left( \frac{\partial M_{T1}}{\partial G_T} \right)_0 G_{T\sigma}}; \quad T'_{a2} = \frac{J_2 \omega_{2n}}{\left( \frac{\partial M_{T2}}{\partial G_T} \right)_0 G_{T\sigma}} \quad (13)$$

koeficijent samoregulacije 1. vratila

$$k_1 = \frac{\left[ \left( \frac{\partial M_{K1}}{\partial \omega_1} \right)_0 - \left( \frac{\partial M_{T1}}{\partial \omega_1} \right)_0 \right] \omega_{1\sigma}}{\left( \frac{\partial M_{T1}}{\partial G_T} \right)_0 G_{T\sigma}} \quad (14)$$

koeficijent samoregulacije 2. vratila

$$k_2 = \frac{\left[ \left( \frac{\partial M_{K2}}{\partial \omega_2} \right)_0 - \left( \frac{\partial M_{T2}}{\partial \omega_2} \right)_0 \right] \omega_{2\sigma}}{\left( \frac{\partial M_{T2}}{\partial G_T} \right)_0 G_{T\sigma}} \quad (15)$$

koeficijent povećanja kutne brzine  $\omega_2$  po kutnoj brzini  $\omega_1$

$$k'_{\omega 1} = \frac{\left[ \left( \frac{\partial M_{T2}}{\partial \omega_1} \right)_0 - \left( \frac{\partial M_{K2}}{\partial \omega_1} \right)_0 \right] \omega_{1\sigma}}{\left( \frac{\partial M_{T2}}{\partial G_T} \right)_0 G_{T\sigma}} \quad (16)$$



koeficijent povećanja kutne brzine  $\omega_1$  po kutnoj brzini  $\omega_2$

$$k'_{\omega_2} = \frac{\left[ \left( \frac{\partial M_{T1}}{\partial \omega_2} \right)_0 - \left( \frac{\partial M_{K1}}{\partial \omega_2} \right)_0 \right] \omega_{2\sigma}}{\left( \frac{\partial M_{T1}}{\partial G_T} \right)_0 G_{T\sigma}} \quad (17)$$

relativna promjena vanjskih mogućih djelovanja tereta

$$f(t) = \frac{\Delta M_B [f(t)]}{\left( \frac{\partial M_{TC}}{\partial G_T} \right)_0 G_{T\sigma}} \quad (18)$$

relativna kutna brzina  $\omega_1$  i  $\omega_2$

$$\varphi_{\omega_1} = \frac{\omega_1}{\omega_{1\sigma}}; \quad \varphi_{\omega_2} = \frac{\omega_2}{\omega_{2\sigma}} \quad (19)$$

relativna promjena potrošnje goriva

$$\mu_G = \frac{\Delta G_T}{G_{T\sigma}} \quad (20)$$

gdje je:

- $\omega_1$  - kutna brzina prvog vratila
- $\omega_2$  - kutna brzina drugog vratila
- $\omega_{1\sigma}$  - nominalna kutna brzina prvog vratila
- $\omega_{2\sigma}$  - nominalna kutna brzina drugog vratila
- $\Delta G_T$  - apsolutna promjena potrošnje goriva
- $G_{T\sigma}$  - nominalna potrošnja goriva
- $J_1$  - moment inercije rotirajućih masa prvog vratila
- $J_2$  - moment inercije rotirajućih masa drugog vratila
- $M_{K1}$  - moment niskotlačnog kompresora
- $M_{K2}$  - moment visokotlačnog kompresora
- $M_{T1}$  - moment niskotlačne turbine
- $M_{T2}$  - moment visokotlačne turbine.

## 2. 2. Simulacijski model brodske parne turbine

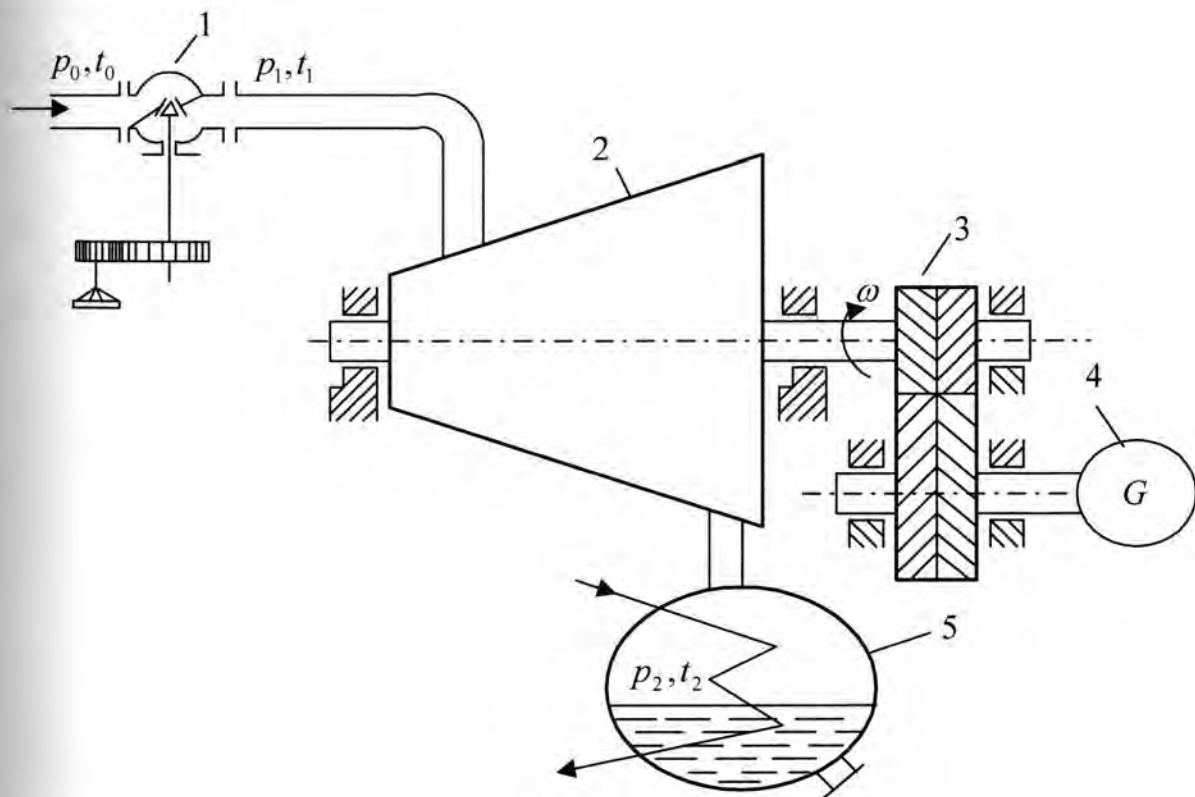
### 2. 2. 1. Jednadžbe stanja brodske parne turbine

Na Slici 11. prikazan je model parnog broskog turbinskog postrojenja parne turbine koja pokreće brodski električni sinkroni generator. U ovom slučaju imamo dvije suštinske pojave, sposobnost akumulacije energije:

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



Sl. 11. Kondenzacijsko parno postrojenje broskog turbogeneratorsa  
1- regulacijski ventil, 2- turbina, 3- reduktor, 4- generator, 5- kondenzator

### Jednadžba stanja dinamike parnog volumena brodske parne turbine:

Označimo da je:

- $G_{KL}$  - tijek potrošnje pare u manevarskom ventilu
- $G_T$  - tijek potrošnje pare kroz turbinu
- $g_{AKK}$  - količina pare koja je akumulirana u parnom volumenu.

Ako je  $G_{KL} \neq G_T$ , što je posljedica promjene položaja manevarskog ventila, tada se mijenja masa akumulirane energije u parnom volumenu turbine za vrijeme  $dt$ , te važi:

$$(G_{KL} - G_T)dt = dg_{aKK} \quad (21)$$

Jednadžba (21) može se podijeliti sa  $dt$  te u statičnom slučaju važi:

$$G_{OKL} - G_{OT} = 0$$

što je posljedica činjenice da je u tom slučaju:

$$\frac{dg_{AKK}}{dt} = 0$$

$G_{OKL}$  i  $G_{OT}$  - predstavljaju početne vrijednosti stacionarnog stabilnog stanja, pomoću kojih možemo jednadžbu (21) napisati na sljedeći način:

$$\Delta G_{KK} - \Delta G_T = \frac{dg_{aKK}}{dt} \quad (22)$$

Moguće je determinirati sljedeću jednakost:

$$g_{aKK} = V_p \rho_1 \quad (23)$$

gdje su:

- $V_p$  - volumen prostora ispunjenog parom između manevarskog ventila i turbinskih lopatica
- $\rho_1$  - gustoća pare u parnom volumenu između ventila i lopatica turbine.

Približno je moguće pretpostaviti da proces u parnom volumenu brodske parne turbine ima izentropski karakter s koeficijentom politrope  $n$ , tako da važi:

$$p_1 \rho_1^{-n} = konst.,$$

a  $\rho_1 = f(p_1)$

Ako lineariziramo i definiramo te funkcije, dobivamo:

$$\frac{d\rho_1}{dt} = \frac{\partial\rho_1}{\partial p_1} \frac{dp_1}{dt} \quad (24)$$

a sukladno jednadžbama (23) i (24) važi sljedeći matematički model:

$$\frac{dg_{akK}}{dt} = V_p \frac{\partial\rho_1}{\partial p_1} \frac{dp_1}{dt} \quad (25)$$

gdje se  $G_{KL}$  i  $G_T$  teoretski ili eksperimentalno mogu odrediti iz sljedećih nelinearnih vrijednosti:

$$\begin{aligned} G_{KL} &= f_1(p_0, T_0, p_1, T_1, m) \\ G_T &= f_2(p_1, T_1, p_2) \end{aligned} \quad (26)$$

gdje je:

$m$  - veličina otvora manevarskog ventila.

Prema [1] uzeli smo da je temperatura u funkciji tlaka. Ovisnost se temelji na jednadžbi stanja idealnog plina, a prikazuje se dijagramski ( $p$ - $T$ ).

Ako usvojimo da je:

$$T_0 = f_3(p_0)$$

$$T_1 = f_4(p_1)$$

$$p_2 \ll p_1$$

te ako zanemarimo promjenu  $p_2$  na veličinu  $G_T$ , tada umjesto jednadžbe (26) možemo zapisati oblik:

$$\begin{aligned} G_{KL} &= f_5(p_0, p_1, m) \\ G_T &= f_6(p_1) \end{aligned} \quad (27)$$

Jednadžbe (26) i (27) su nelinearizirane, a u slučaju lineariziranja dobivamo:

$$\begin{aligned} \Delta G_{KL} &= \frac{\partial G_{KL}}{\partial p_0} \Delta p_0 + \frac{\partial G_{KL}}{\partial p_1} \Delta p_1 + \frac{\partial G_{KL}}{\partial m} \Delta m \\ \Delta G_T &= \frac{\partial G_T}{\partial p_1} \Delta p_1 \end{aligned} \quad (28)$$

Dovodeći u vezu jednadžbe (22), (25) i (28) dobivamo sljedeći model:

$$V_p \frac{\partial\rho_1}{\partial p_1} \frac{dp_1}{dt} = \frac{\partial G_{KL}}{\partial p_0} \Delta p_0 + \frac{\partial G_{KL}}{\partial m} \Delta m - \left( \frac{\partial G_T}{\partial p_1} - \frac{\partial G_{KL}}{\partial p_1} \right) \Delta p_1 \quad (29)$$

Prelazeći na relativne veličine, iz jednadžbe (29) dobivamo jednadžbu dinamike parnog volumena brodske parne turbine:

$$\frac{d\psi_1}{dt} = \frac{\mu}{R_\mu} + \frac{\Psi_0}{R_{\psi 0}} - \frac{\Psi_1}{R_{\psi 1}} \quad (30)$$

iz koje se vidi da se relativni prirast tlaka pare u parnom volumenu turbine povećava prilikom otvaranja manevarskog ventila, te da se povećava i tlak pare ispred njega,

gdje je:

$$\psi_1 = \frac{\Delta p_1}{p_{1N}} \quad - \text{ relativni prirast tlaka pare u parni volumen turbine}$$

$$\psi_0 = \frac{\Delta p_0}{p_{0N}} \quad - \text{ relativni prirast tlaka pare ispred manevarskog ventila}$$

$$\mu = \frac{\Delta m}{m} \quad - \text{ relativna promjena položaja manevarskog ventila}$$

$$R_{\psi 0} = \frac{V_P \frac{\partial \rho_1}{\partial p_1} p_{1N}}{\frac{\partial G_{KL}}{\partial p_0} p_{0N}} \quad - \text{ vremenska konstanta rotora turbine}$$

$$R_\mu = \frac{V_P \frac{\partial \rho_1}{\partial p_1} p_{1N}}{\frac{\partial G_{KL}}{\partial m} m_N} \quad - \text{ vremenska konstanta volumena pare}$$

$$R_{\psi 1} = \frac{V_P \frac{\partial \rho_1}{\partial p_1}}{\frac{\partial G_T}{\partial p_1} - \frac{\partial G_{KL}}{\partial p_1}} \quad - \text{ vremenska konstanta volumena pare}$$

gdje je:

- $\Delta p_1$  - apsolutni prirast tlaka pare u parnom volumenu
- $p_{1N}$  - nominalni prirast tlaka pare u parnom volumenu
- $\Delta p_0$  - apsolutni prirast tlaka ispred manevarskog ventila
- $p_{0N}$  - nominalni prirast tlaka ispred manevarskog ventila
- $\Delta m$  - apsolutna promjena položaja manevarskog ventila
- $m$  - veličina otvora manevarskog ventila
- $m_N$  - nominalna veličina otvora manevarskog ventila

- $\Delta G_{KL}$  - promjena tijeka potrošnje pare u manevarskom ventilu  
 $G_T$  - tijek potrošnje pare kroz turbinu  
 $\Delta G_T$  - promjena tijeka potrošnje pare kroz turbinu  
 $V_p$  - volumen prostora ispunjenog parom  
 $\rho_1$  - gustoća pare u parnom volumenu  
 $\Delta \rho_1$  - prirast gustoće pare u parnom volumenu  
 $\rho_0$  - gustoća pare ispred manevarskog ventila  
 $\Delta \rho_0$  - prirast gustoće pare ispred manevarskog ventila.

### Jednadžba stanja dinamike rotora brodske parne turbine:

Sukladno Drugom zakonu mehanike važi jednadžba:

$$J \frac{d\omega}{dt} = \sum M$$

gdje je:

$J$  - moment inercije rotora

$\omega$  - kutna brzina

$\sum M$  - suma momenata sila koje djeluju na rotor turbine,

a vrijedi i:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_D - M_C - M_N \quad (31)$$

gdje je:

$M_D$  - pogonski moment

$M_C$  - moment otpora

$M_N$  - moment opterećenja.

U stacionarnom režimu vrijedi da su sve vremenske promjene varijabli jednake nuli, pa je:

$$0 = M_{0D} - M_{0C} - M_{0N}$$

tj. dobivamo:

$$J \frac{d\omega}{dt} = \Delta M_D - \Delta M_C - \Delta M_N \quad (32)$$

Pogonski je moment  $M_D$  za parnu turbinu moguće odrediti pomoću sljedećeg izraza:

$$M_D = \frac{419 G_T N_a \eta_e}{\omega}$$

gdje je:

$N_a$  - pad toplinskog kapaciteta

$\eta_e$  - stupanj iskoristivosti parne turbine.

Uvrštenjem da je prema (27)  $G_T = f_6(p_1)$  vrijedi:

$$\begin{aligned}N_a &= f_7(p_1, T_1, p_2) \\ \eta_e &= f_8(\omega, p_1, T_1, p_2)\end{aligned}$$

pa je pogonski moment moguće determinirati u ovisnosti o više varijabli, tj:

$$M_D = f_9(p_1, T_2, \omega)$$

Ako uvažimo da je:

$$T_1 = f_4(p_1),$$

jednadžbu pogonskog momenta možemo napisati u obliku:

$$M_D = f_{10}(p_1, p_2, \omega) \quad (33)$$

Moment otpora  $M_C$  za parne turbine se može predstaviti funkcionalnom ovisnošću o kutnoj brzini rotora turbine:

$$M_C = f_{11}(\omega) \quad (34)$$

Moment otpora  $M_N$  se predstavlja u funkcionalnoj ovisnosti frekvencije (brzine) turbine:

$$M_N = f_{12}(\omega) \quad (35)$$

Lineariziranjem funkcija (33) i (34) dobivamo sljedeći skup jednadžbi (prema [1]):

$$\begin{aligned}\Delta M_D &= \frac{\partial M_D}{\partial p_1} \Delta p_1 + \frac{\partial M_D}{\partial p_2} \Delta p_2 + \frac{\partial M_D}{\partial \omega} \Delta \omega \\ \Delta M_C &= \frac{\partial M_C}{\partial \omega} \Delta \omega \\ \Delta M_N &= \frac{\partial M_N}{\partial \omega} \Delta \omega\end{aligned} \quad (36)$$

Ako skup jednadžbi (36) uvrstimo u jednadžbu (32) dobivamo:

$$J \frac{d\omega}{dt} = -\left(\frac{\partial M_C}{\partial \omega} + \frac{\partial M_N}{\partial \omega} - \frac{\partial M_D}{\partial \omega}\right)\Delta\omega + \frac{\partial M_D}{\partial p_1}\Delta p_1 - \left|\frac{\partial M_D}{\partial p_2}\right|\Delta p_2 \quad (37)$$

U izrazu (37) uočavamo da je:

$$\frac{\partial M_D}{\partial p_2} = -\left|\frac{\partial M_D}{\partial p_2}\right| < 0$$

Ako lineariziramo jednadžbu (37) dobivamo jednadžbu dinamike rotora turbine:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\psi_1}{T_{\psi 1}} - \frac{\psi_2}{T_{\psi 2}} - \frac{\varphi}{T_\varphi} \quad (38)$$

Napomena: *Vidimo da kutna brzina rotora turbine raste pri porastu tlaka pare u glavnom kondenzatoru.*

gdje je:

$$\psi_1 = \frac{\Delta p_1}{p_{1N}} \quad - \text{ relativni prirast tlaka pare u parni volumen turbine}$$

$$\psi_2 = \frac{\Delta p_2}{p_{2N}} \quad - \text{ relativni prirast tlaka pare u glavnom kondenzatoru}$$

$$\varphi = \frac{\omega}{\omega_N} \quad - \text{ relativna kutna brzina rotora turbine}$$

$$T_{\psi 1} = \frac{\omega_N J}{\frac{\partial M_D}{\partial p_1} p_{1N}} \quad - \text{ vremenska konstanta rotora turbine}$$

$$T_{\psi 2} = \frac{\omega_N J}{\left|\frac{\partial M_D}{\partial p_2}\right| p_{2N}} \quad - \text{ vremenska konstanta kotla}$$

$$T_\varphi = \frac{J}{\frac{\partial M_C}{\partial \omega} + \frac{\partial M_N}{\partial \omega} - \frac{\partial M_D}{\partial \omega}} \quad - \text{ vremenska konstanta rotora turbine}$$

$\Delta p_2$  - apsolutni prirast tlaka pare u glavnom kondenzatoru

$p_{2N}$  - nominalni prirast tlaka pare u glavnom kondenzatoru

$\Delta p_\theta$  - apsolutni prirast tlaka ispred manevarskog ventila

$\Delta\omega$  - apsolutni prirast kutne brzine rotora turbine



- $\omega_N$  - nominalna kutna brzina rotora turbine
- $\omega$  - kutna brzina
- $\Delta p_l$  - apsolutni prirast tlaka pare u parnom volumenu
- $p_{lN}$  - nominalni tlak pare u parnom volumenu
- $J$  - moment inercije rotora turbine
- $M_D$  - pogonski moment
- $M_C$  - moment otpora
- $M_N$  - moment opterećenja
- $\Delta M_D$  - apsolutna promjena pogonskog momenta
- $\Delta M_C$  - apsolutna promjena momenta otpora
- $\Delta M_N$  - apsolutna promjena momenta opterećenja.

Kako bi smo razmotrili dinamički proces u parnoj turbini, potrebno je riješiti jednadžbe (30) i (38), koje predstavljaju jednadžbe dinamike ponašanja brodske parne turbine.

Također je važno napomenuti da se akumulacija topline u dijelovima turbine smatra zanemarivom imajući u vidu ukupni tok, a određuje se tek eksperimentom na modelu, čime se utvrđuje utjecaj na konačne parametre turbine (debljina stjenke, izolacije i sl.).

Ako pretpostavimo da je:

$$p_0 = konst.$$

$$p_2 = konst.$$

$$\psi_0 = 0$$

$$\psi_2 = 0$$

i pri vanjskom djelovanju  $\mu = \mu(t)$ , tada važi sljedeći pojednostavljeni model dinamike brodske parne turbine:

### 1. Jednadžba parnog volumena turbine

$$\frac{d\psi_1}{dt} = \frac{\mu}{R_\mu} - \frac{\Psi_1}{R_{\psi_1}} \quad (39)$$

### 2. Jednadžba dinamike rotora turbine

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\psi_1}{T_{\psi_1}} - \frac{\varphi}{T_\varphi} \quad (40)$$

gdje je:

$\psi_1$  - relativni prirast tlaka pare u parnom volumenu

$\varphi$  - relativna kutna brzina rotora turbine

- $T_{\psi_1}$  - vremenska konstanta rotora turbine  
 $T_{\varphi}$  - vremenska konstanta rotora turbine  
 $R_{\mu}$  - vremenska konstanta volumena pare  
 $R_{\psi_1}$  - vremenska konstanta volumena pare.

Međutim, jednačba stanja parnog volumena turbine (30) i jednačba stanja dinamike rotora turbine (38) glase:

### 1. Jednačba parnog volumena turbine

$$\frac{d\psi_1}{dt} = \frac{\mu}{R_{\mu}} + \frac{\Psi_0}{R_{\psi_0}} - \frac{\Psi_1}{R_{\psi_1}} \quad (41)$$

### 2. Jednačba dinamike rotora turbine

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\psi_1}{T_{\psi_1}} - \frac{\psi_2}{T_{\psi_2}} - \frac{\varphi}{T_{\varphi}} \quad (42)$$

### 3. MATEMATIČKI MODEL BRODSKOGA SINKRONOG GENERATORA

#### 3.1. Jednadžbe stanja broskog sinkronog generatora

Prijelazni procesi u sinkronim generatorima mogu se opisati sljedećim nizom, eksplicitnim oblikom nelinearnih diferencijalnih jednadžbi, [prema 4], a prikaz pripadnih osi na temelju kojih se izvode jednadžbe prikazan je u [23]:

$$\frac{d\psi_d}{dt} = -\frac{r_s}{x_s} \psi_d + A \psi_q \omega + \frac{r_s}{x_s} \psi_{ad} + u_d$$

brzina magnetskoga toka kruga statora po osi  $d$ ; (43)

$$\frac{d\psi_q}{dt} = -\psi_d \omega - \frac{r_s}{x_s} \psi_q + \frac{r_s}{x_s} \psi_{aq} + u_q$$

brzina magnetskoga toka kruga statora po osi  $q$ ; (44)

$$\frac{d\psi_f}{dt} = -\frac{r_f}{x_f} \psi_f + \frac{r_f}{x_f} \psi_{ad} + u_f$$

brzina magnetskoga toka omotača uzbude; (45)

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

brzina magnetskoga toka prigušnih krugova po osi  $d$ ; (46)

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

brzina magnetskoga toka prigušnih krugova po osi  $q$ ; (47)

$$\psi_{aq} = X_2 \left( \frac{1}{x_s} \psi_q + \frac{1}{x_{1q}} \psi_{1q} \right)$$

magnetski tok uzajamne indukcije kontura po osi  $q$ ; (48)

$$u_d = r_L i_d + x_L \frac{di_d}{dt} - x_L i_q \omega$$

napon u konturama statora po osi  $d$ ; (49)

$$u_q = r_L i_q + x_L \frac{di_q}{dt} - x_L i_d \omega$$

napon u konturama statora po osi  $q$ ; (50)

$$u = \sqrt{u_d^2 + u_q^2}$$

napon u konturama statora; (51)

$$M_e = \frac{1}{x_s} (\psi_d \psi_{aq} - \psi_q \psi_{ad})$$

električni moment sinkronoga generatora; (52)

$$X_1 = \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_s} + \frac{1}{x_f} + \frac{1}{x_{1d}}} \quad \text{reaktancija u uzdužnoj osi;} \quad (53)$$

$$X_2 = \frac{1}{\frac{1}{x_{aq}} + \frac{1}{x_s} + \frac{1}{x_{1q}}} \quad \text{reaktancija u poprečnoj osi;} \quad (54)$$

$$i_d = -\frac{1}{x_s} (\Psi_d - \Psi_{ad}) \quad \text{jakost struje po osi } d; \quad (55)$$

$$i_q = -\frac{1}{x_s} (\Psi_q - \Psi_{aq}) \quad \text{jakost struje po osi } q; \quad (56)$$

$$i = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad \text{ukupna jakost;} \quad (57)$$

$$i_f = \frac{1}{x_f} (\Psi_f - \Psi_{ad}) \quad \text{jakost struje u uzbudnom krugu;} \quad (58)$$

gdje je:

$\Psi_d$  - magnetski tok kruga statora po osi  $d$

$r_s$  - aktivni otpor kruga statora

$x_s$  - induktivni otpor rasipanja kruga statora

$\Psi_q$  - magnetski tok kruga statora po osi  $q$

$\omega$  - kutna brzina

$\Psi_{ad}$  - magnetski tok uzajamne indukcije kontura po osi  $d$

$u_d$  - napona u konturama statora po osi  $d$

$\Psi_{aq}$  - magnetski tok uzajamne indukcije kontura po osi  $q$

$u_q$  - napona u konturama statora po osi  $q$

$u$  - napon u konturama statora

$\Psi_f$  - magnetski tok omotača uzbude

$r_f$  - aktivni otpor omotača uzbude

$u_f$  - napon uzbude

$\Psi_{1d}$  - magnetski tok prigušnih krugova po osi  $d$

- $r_{ld}$  - aktivni otpor prigušnih krugova po osi  $d$   
 $x_{ld}$  - induktivni otpor prigušnih krugova po osi  $d$   
 $\Psi_{lq}$  - magnetski tok prigušnih krugova po osi  
 $r_{lq}$  - aktivni otpor prigušnih krugova po osi  $q$   
 $x_{lq}$  - induktivni otpor prigušnih krugova po osi  $q$   
 $M_e$  - električni moment sinkronoga generatora  
 $i_d$  - jakost struje po osi  $d$   
 $i_q$  - jakost struje po osi  $q$   
 $i_f$  - jakost struje u uzbudnom krugu  
 $i$  - ukupna jakost struje.

## 4. REGULACIJA BROJA OKRETAJA BRODSKIH TOPLINSKIH TURBINA

### 4.1. Osnovne karakteristike regulatora

Za održavanje određenoga broja okretaja nekoga stroja, bilo s konstantnim ili s promjenjivim režimom rada, koristi se uređaj koji se naziva regulator.

Regulatore broja okretaja možemo podijeliti na:

- regulatore direktnoga djelovanja
- regulatore indirektnoga djelovanja.

Regulatori indirektnoga djelovanja mogu se podijeliti na regulatore:

- bez čvrste povratne veze
- sa čvrstom povratnom vezom
- sa elastičnom povratnom vezom
- sa kombiniranom povratnom vezom.

Prema izvedbi razlikujemo sljedeće regulatore:

1. proporcionalni regulator direktnoga djelovanja (P – regulator)
2. integralni regulator (I – regulator) i to:
  - bez čvrste povratne veze
  - s čvrstom povratnom vezom
  - s elastičnom povratnom vezom
3. derivabilni regulator (D – regulator).

Svi navedeni regulatori mogu biti nultoga, I. reda i II. reda, a u praksi se koriste sve moguće njihove kombinacije, prema [58].

## 4.2. Proporcionalni regulator direktnog djelovanja (P- regulator)

Regulator direktnog djelovanja računa se preko proporcionalnoga elementa (P – element) i to preko prijenosne funkcije nultoga reda, prema [58]:

$$0 \text{ reda} \quad G_0(p) = K_0 = K$$

$$I \text{ reda} \quad G_1(p) = \frac{K}{1 + pT}$$

$$II \text{ reda} \quad G_2(p) = \frac{K}{(1 + pT_1)(1 + pT_2)}$$

$$G(p) = K_p$$

$$G(p) = \frac{K_p}{1 + pT}$$

$$G(p) = \frac{K_p}{(1 + pT_1)(1 + pT_2)}$$

$$G(p) = \frac{y}{x}; \quad y = G_p x$$

Linearni element čija prijenosna funkcija nema ni jedan pol niti nulu, u koordinatnom početku  $p$  ravnine, naziva se proporcionalni element (skraćeno: P – element).

Faktor prijenosa  $K_p$  naziva se faktor proporcionalnosti P – elementa.

Dinamika ponašanja P elementa nultoga, prvoga i drugoga reda opisana je jednadžbama.

$$1) \quad y = K_p x$$

$$2) \quad T \frac{dy}{dt} + Y = K_p x$$

$$3) \quad T_1 T_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dy}{dt} + y = K_p x \quad (59)$$

$$\text{gdje je: } p = \frac{d}{dt}, \text{ a } G(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{L\text{-transformacija izlaza}}{L\text{-transformacija ulaza}}$$

Proporcionalni elementi imaju različite prijelazne karakteristike, ali jednake konačne stacionarne vrijednosti  $K_p$ .

#### 4.2.1. Proporcionalni element nultog reda

Najjednostavniji proporcionalni element je P – element nultoga reda koji glasi:

$$y(t) = K x(t) \quad (K = K_p)$$

$K$  – faktor proporcionalnosti ili faktor pojačanja

$$x(t) = x_0 q(t) .$$

Odskočna funkcija kao ulazna veličina.

P – element nultoga reda naziva se statički element.

#### 4.2.2. Proporcionalni element prvog reda

Proporcionalni element prvoga reda naziva se aperiodički element prvoga reda.

$$T \dot{y} + y = Kx$$

gdje je:

$T$  - vremenska konstanta

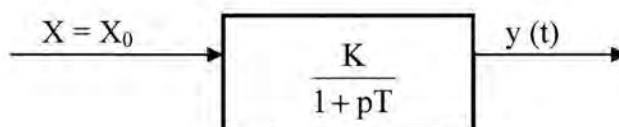
$K$  - faktor ili koeficijent pojačanja.

Homogeno rješenje dobivamo iz jednadžbe:

$$T \dot{y} + y = 0$$

dok partikularno rješenje glasi:

$$Y_p = Kx_0 = \text{const.}$$



Sl. 12. Prikaz prijenosne funkcije

Prijenosna funkcija se dobiva Laplaceovom transformacijom:

$$G(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{K}{1 + pT} \lim_{x \rightarrow \infty}, \quad \text{gdje je } p = \frac{d}{dt}$$



### 4.2.3. Proporcionalni element drugog reda

Element drugoga reda između ulazne i izlazne veličine naziva se oscilatorni element, a određuje ga diferencijalna jednačina drugoga reda.

$$T_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + 2 DT \frac{dy}{dt} + y = Kx \quad (60)$$

gdje je:

- $T$  - vremenska konstanta
- $D$  - koeficijent relativnoga prigušenja
- $K$  - faktor (koeficijent) pojačanja elementa

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{Kp}{T_1 T_2} x - \frac{dy}{dt} \frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2} - \frac{y}{T_1 T_2} \quad (61)$$

Međutim, za slučaj da je  $0 < D < 1$  jednačina glasi, prema [58]:

$$Y(p) = \frac{Kx_0 \omega_0^2}{p(p^2 + 2D\omega_0 p + \omega_0^2)},$$

a prijelazna funkcija izgleda ovako:

$$y(t) = \frac{h(t)}{K}$$

### 4.3. D- regulator

Stacionarno ponašanje određeno je prijenosnom funkcijom, prema [58]:

$$G_I(p) = K_I p = K_D p$$

Linearni elementi čija prijenosna funkcija ima u koordinatnom početku  $p$  ravnine jednu nulu nazivaju se elementi diferenciranja ili D- elementi, a faktor  $K_D$  prijenosni faktor

D- elementa.

Za prijenosne funkcije  $G(p) = K_D p$  i  $G(p) = \frac{K_D p}{1 + pT}$  odgovarajuće diferencijalne jednačbe

glase:

$$y = K_D \frac{dy}{dt} \quad \text{idealni D - element}$$

$$T \frac{dy}{dt} + y = K_D \frac{dx}{dt} \quad \text{realni D - element}$$

#### 4.4. I- regulator

Klasu elemenata određuju elementi kod kojih parcijalna prijenosna funkcija ima oblik, prema [58]:

$$G_I(p) = \frac{K_I}{p}$$

Element čija prijenosna funkcija ima jedan pol u koordinatnom početku  $p$  – ravnine, naziva se element integriranja ili I – element.  $K_I$  nazivamo prijenosni faktor integriranja.

Međutim, na ulazu elementa integriranja mogu djelovati odskočne funkcije, te se tada dobiva jednačba koja glasi:

$$Y = K_I \int_0^t x dt$$

$$x(t) = x_0 q(t) = x_0 \quad (za t > 0)$$

Na izlazu iz elementa bit će:

$$Y(t) = K_I x_0 t, \text{ što se može prikazati:}$$



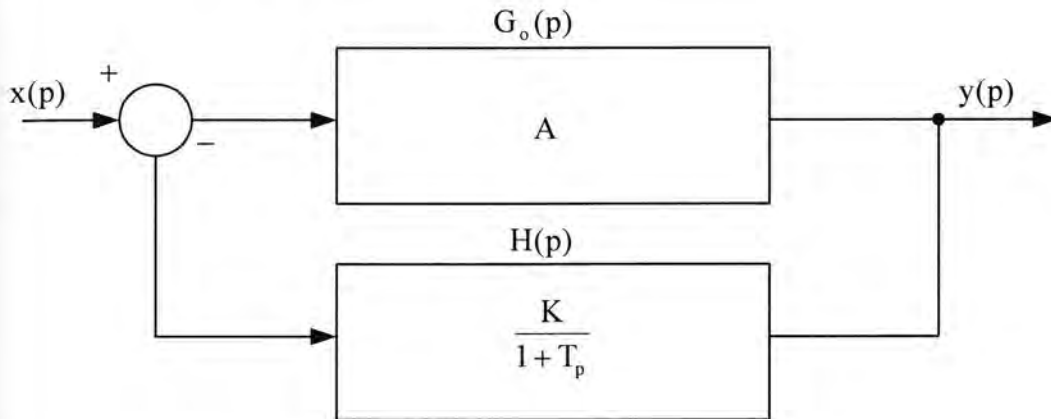
Sl. 13. Prikaz prijenosne funkcije

## 4.5. Kombinirani elementi

### 4.5.1. PD element

Na slici 14. prikazana je elementarna regulacijska petlja s prijenosnim funkcijama

$$G_0(p) = A \text{ i } H(p) = \frac{K}{1+Tp}$$



Sl. 14. PD – element (P – element sa elementom kašnjenja u povratnom krugu).

Prijenosna funkcija sustava glasi:

$$G(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{G_0(p)}{1 + G_0(p)H(p)} = \frac{1}{\frac{1}{G_0(p)} + H(p)}$$

$$G(p) \frac{1}{H(p)} = \frac{1}{K} (1 + Tp) = A_r (1 + Tp)$$

gdje je  $A_r = \frac{1}{K}$  - faktor pojačavanja, a odgovarajuća diferencijalna jednažba glasi:

$$Y = A_r \left( x + T \frac{dx}{dt} \right)$$

### 4.5.2. PI – element

Za elementarnu regulacijsku petlju sa prijenosnim funkcijama  $G_0(p) = A$  i

$$H(p) = \frac{KTp}{1+Tp} \text{ slijedi:}$$

$$G(p) \frac{1}{H(p)} = \frac{1}{K} \frac{1+Tp}{Tp} = A_R \left( 1 + \frac{1}{Tp} \right)$$

Ova relacija definira prijenosnu funkciju PI-elementa. Odgovarajuća diferencijalna jednadžba glasi:

$$\frac{dy}{dt} = A_R \left( \frac{x}{T} + \frac{dx}{dt} \right)$$

#### 4.5.3. PID – element

Za elementarnu regulacijsku petlju s prijenosnim funkcijama odgovarajuća diferencijalna jednadžba glasi:

$$\frac{dy}{dt} = A_R \left( \frac{x}{T_n} + \frac{dx}{dt} + T_V \frac{d^2x}{dt^2} \right)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{1}{T_V A_R} \frac{dy}{dt} - \frac{x}{T_V T_n} - \frac{1}{T_V} \frac{dx}{dt} \quad (62)$$

#### 4.6. Kompjutorski simulacijski model P, I, D, PI i PID regulatora

Model je predstavljen u DYNAMO simulacijskom jeziku, i to verzija DYNAMO 4.0, Pugh- Roberts Associates, University of Toronto, 1996.

##### MATEMATIČKI MODEL

P – član:  $y = K_p x$

I – član:  $y = K_I \int x dt$

D – član:  $y = K_D \frac{dx}{dt}$

PID – član:  $y = K_p x + K_I \int x dt + K_D \frac{dx}{dt}$

Model idealnoga P – člana u DYNAMO simulacijskom jeziku:

MACRO PREG (X, KPP)

A PREG.K = X.K\*KPP

MEND

gdje je:

$X$  = ulazna varijabla na koju djeluje P – regulator

$KPP$  = faktor pojačanja P – regulatora, ili koeficijent proporcionalnosti P – regulatora.

Model idealnoga I – člana u DYNAMO simulacijskom jeziku:

MACRO IREG (X,KPI)

INTRN ID

L ID.K = ID.J + DT\*X.J

N ID = X

A IREG.K = KPI\*ID.K

MEND

gdje je:

$X$  = ulazna varijabla u I – regulator

$KPI$  = prijenosni faktor integriranja

$IREG$  = izlazna varijabla iz I – regulatora.

Model idealnoga D – člana u DYNAMO simulacijskom jeziku:

MACRO DREG (X,KPD)

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

MEND

gdje je:

$X$  = ulazna varijabla u derivator

$KPD$  = prijenosni faktor D – elementa

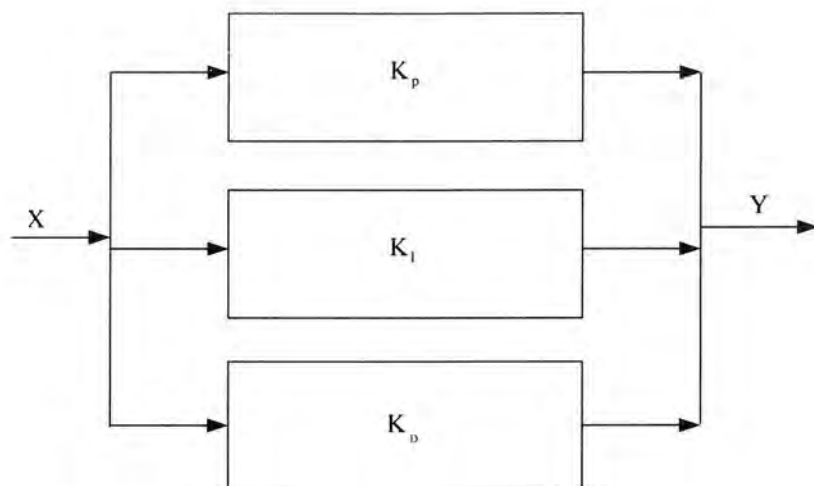
$DREG$  = izlazna varijabla iz derivatora.

Budući da su definirani matematički modeli regulatora P, I i D u pojedinačnom obliku (svaki regulator ima svoju posebnu MACRO funkciju), možemo predstaviti i univerzalni PID – regulator, pomoću kojega se može simulirati bilo koji pojedinačni ili kombinirani regulator.

Model univerzalnoga PID – regulatora:

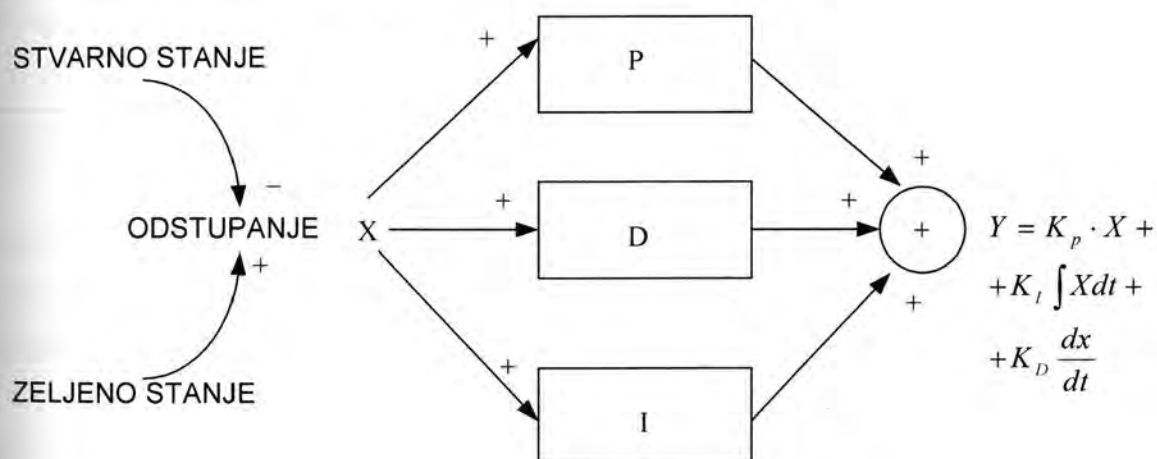
$X = \text{ODSTUPANJE} =$  (željeno stanje regulirane varijable) – (stvarno stanje regulirane varijable);

$Y = \text{ODSTUPANJE}$  ( $K_p$  ili  $K_I$  ili  $K_D$ );



Sl. 15. Prikaz prijenosne funkcije

Strukturni model UNIREG PID regulatora prikazan je na Slici 16.



Sl. 16. Strukturni model UNIREG PID regulatora u paralelnoj vezi

Model regulatora u DYNAMO simulacijskom jeziku:

MACRO UNIREG (X, KPP, KPI, KPD)

INTRN ID, PREG, IREG, DREG

A PREG.K = KPP\*X.K

L ID.K = ID.J + DT\*X.J

N ID = X

A IREG.K = KPI\*ID.K

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

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

MEND

## 5. SUSTAV - DINAMIČKO SIMULACIJSKO MODELIRANJE BRODSKIH TURBINSKIH POGONA SINKRONIH GENERATORA

### 5.1. Općenitost i povijesnost Sustavne dinamike [prema 28]

Za Sustavnu dinamiku se kaže da je to, zapravo, odgovarajući matematičko-filozofski put rješavanja dinamičkih problema u teoriji sustava, zapravo predstavlja logički slijed razvoja:

- opće teorije upravljanja (kibernetika)
- opće teorije regulacije sustava
- opće teorije sustava
- opće teorije informacija
- ubrzanoga razvoja digitalnih kompjutora.

S druge strane, Sustavna dinamika je metodologija istraživanja, modeliranja, simuliranja i optimizacije složenih dinamičkih sustava. Ona je i konkretna primjena "sustavnoga mišljenja" (sustavni pristup) i kibernetike na probleme upravljanja složenim dinamičkim sustavima.

Kako bi dobili što bolji uvid u Sustavnu dinamiku, ukratko ćemo iznijeti povijest te znanstvene discipline. Ludwig von Bertalanffy (1930.g.) bio je jedan od pionira *sustavnoga razmišljanja*. Proučavao je biološke organizme kao sustave, što znači da je primijenio principe strukture sustava na proučavanje bioloških sustava i njihova funkcioniranja.

Norbert Wiener (1948.) objavljuje svoj rani rad *Cybernetics* koji ujedinjuje rezultate istraživanja o kontroli, tj. upravljanju biološkim, tehničkim, društvenim i ekonomskim sustavima. Wiener je prikazao neke opće principe koji su zajednički za procese regulacije konstantne temperature tijela, konstantne visine aviona, ravnoteže ponude i potražnje na tržištu ekonomskih sustava, donošenju odluka kod političkih sustava i saznanja o mehanizmima psiholoških sustava.

Međutim, Jay Forrester prvi je aplicirao široke principe kibernetike na istraživanje funkcioniranja industrijskih sustava, te je svojim djelom *Industrial Dynamics*, 1961. godine inicirao rađanje nove znanstvene discipline koja je u samom početku imala naziv

"*Industrijska dinamika*", no poslije, je zbog proširivanja područja primjene, dobila novi naziv: *SUSTAVNA DINAMIKA (SYSTEM DYNAMICS)*, odnosno *Dinamika sustava*.

Sustavna dinamika kao filozofija, metodologija, tj. znanstvena disciplina počela se razvijati na Massachusetts Institute of Technology (Cambridge, Boston, USA) pod rukovođenjem Jaya Forrestera. Četiri godine poslije, 1956. godine, Alfred P. Sloan, School of Management pri M.I.T.-u, uz osobnu podršku J. Forrestera (koji je dobro poznao tehničke upravljačke sustave s povratnom vezom, računala i praksu upravljanja) počeo je razvijati ideju o analognoj vezi između inženjerstva, tj. upravljanja tehničkim sustavima i upravljanja poslovnim sustavima.

U današnje vrijeme Sustavnu dinamiku karakterizira intenzivno znanstveno istraživanje, te primjena postavljenih sustav-dinamičkih teza na rješavanje različitih sustavnih problema te daljnja edukacija kadrova. U području računalnoga simulacijskoga modeliranja uvode se sve kompleksnije matematičke jednadžbe, a u primjeni računala koristi se, osim osnovnoga simulacijskoga algoritma DYNAMO i veći broj pomoćnih.

## **5.2. Osnovni pristup Sustavne dinamike**

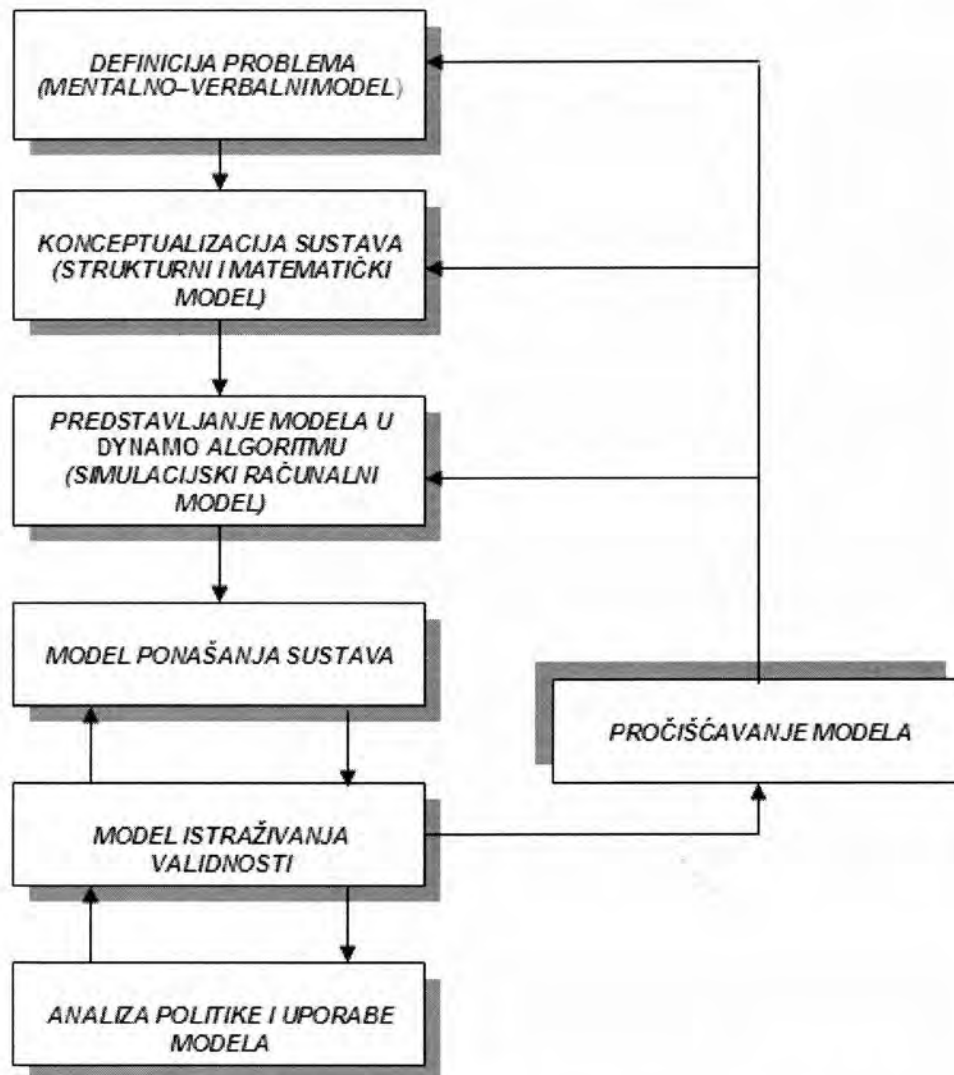
Sustavna se dinamika u svom metodološkom pristupu zasniva na osnovama:

- uzročno-posljedični funkcionalni pristup razmatranju strukturnih modela;
- jednadžbe povratnih veza (*feedback loops*);
- jasno utvrđene granice sustava, jednadžbe stanja i jednadžbe promjene stanja sustava, promatranje strukture, kašnjenja u materijalnim i informacijskim tokovima, pojačanje i fazni pomak;
- procesima donošenja odluka;
- učinkovitosti, točnosti i brzine digitalnih računala.



### 5.2.1. Sustav-dinamičko modeliranje

Proces sustav-dinamičkoga računalnoga simulacijskoga modeliranja moguće je postaviti prema shemi na slici 17.



Sl. 17. Shematski prikaz sustav-dinamičkoga računalnoga simulacijskoga modeliranja

Definicija problema – prepoznavanje i definiranje promatranoga sustava uz pomoć sustavnih termina.

Konceptualizacija sustava - uočavanje i ucrtavanje najvažnijih uzročno–posljedičnih elemenata za koje smo uvjereni da egzistiraju u promatranom sustavu.

Predstavljanje modela u Dynamo algoritmu – prijevod (kompiliranje) matematičkoga modela na Dynamo računalni jezik.

Model istraživanja validnosti – provedba testova radi utvrđivanja kvalitete i validnosti modela.

Analiza politike i uporaba modela – testiranje alternativnih politika koje bi se mogle ugraditi u model. Zapravo se u ovoj fazi provjeravaju i konačno determiniraju najpovoljniji scenariji, tj. politike upravljanja promatranim sustavom, tj. modelom koji je apstrakt promatranoga realiteta.

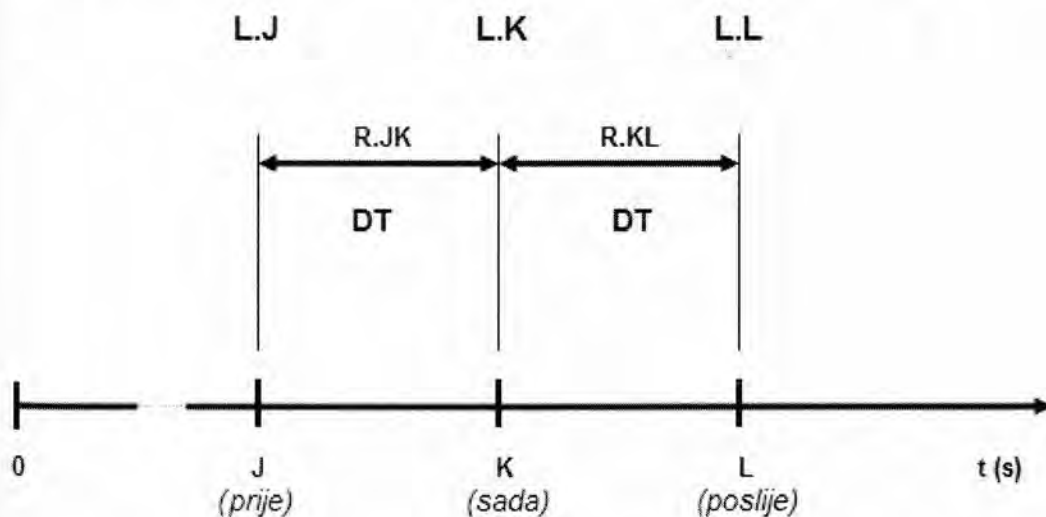
### 5.2.2. Osnovni elementi Sustavne dinamike

S gledišta Sustavne dinamike tokove (brzine promjene varijabli) možemo podijeliti u dvije skupine:

- a) materijalne
- b) informacijske tokove.

Materijalne tokove označavamo punom linijom, dok informacijske označavamo iscrtanom linijom.

Vremenska se os u Sustavnoj dinamici obilježava na način prikazan na slici 18.



Sl. 18. Vremenska os u Sustavnoj dinamici

Vremenska os je promjenjiva i vrijeme se mijenja u ritmu  $DT$  ( $dt$ ). Kompjutor pamti isključivo dva posljednja stanja: ono što je bilo prije ( $J$ ) i ono što je sada ( $K$ ), vremenska os

napreduje iz točke K ( sada ) u točku L (poslije) i «zaboravlja» stanje J , te trenutak vremena K postaje J , a L postaje K.

Za određivanje vremenskoga perioda simulacijskoga vremenskoga koraka vrijedi pravilo:

$$DT < T/2 \quad (63)$$

gdje je:

L.J – stanje (*level*) varijable L prije početka računanja J

L.K – stanje varijable L poslije računanja K (sada)

L.L – stanje varijable L za slijedeće računanje L (poslije)

DT(dt) – vremenski interval između dva susjedna proračuna

R.JK – R je promjena stanja varijable (RATE) koja se dogodila u vremenskom intervalu DT

T – vremenski period eksponencijalnog kašnjenja I. reda.

### 5.2.3. Osnovne jednadžbe sustava

U Sustavnoj dinamici, odnosno Dynamo simulacijskom jeziku razlikujemo pet osnovnih tipova jednadžbi, tj. naredbi:

1. Jednadžbe stanja sustava (*L – Level Equations*).
2. Jednadžbe promjene stanja sustava (*R – Rate Equations*).
3. Pomoćne jednadžbe (*A – Auxiliary Equations*).
4. Jednadžbe konstanti (*C, K – Constant Equations*).
5. Jednadžbe početnih vrijednosti (*N – Initial Value Equations*).

Jednadžbe stanja sustava – L – predstavljaju akumulaciju u kojima su akumulirane sve promjene stanja tokova koji ulaze ili izlaze iz akumulacije, a stanja i promjene stanja mogu se promatrati na tokovima materije, energije ili informacija. U diskretnim sustavima one predstavljaju ukupnu sumu svih promjena stanja kao i početnoga stanja sustava (kumulativ

prošlih događanja), dok kod kontinuiranih sustava one predstavljaju integral od trenutka početka promatranja pa do vremena  $t$ .

Jednadžbu stanja sustava s obzirom na verbalnu definiciju možemo predstaviti:

$$NVSS = PVSS + VIR*(IPS - OPS)$$

- NVSS – nova vrijednost stanja sustava
- PVSS – prethodna vrijednost stanja sustava
- VIR – vremenski interval računanja
- IPS – inputne promjene stanja
- OPT – outputne promjene stanja

U sustav-dinamičkoj literaturi, jednadžba stanja se uobičajeno prikazuje kao diferencijalna jednadžba I. reda:

$$L.K = L.J + (DT)*(RA.JK - RS.JK)$$

- $L = NVSS$  – stanje sustava (jedinica mjere)
- $L.K$  – novo stanje sustava izračunato u trenutku  $K$  vremenske osi  $t$
- $L.J$  – prethodno stanje sustava u trenutku  $J$  vremenske osi  $t$
- $DT=VIR$  – vremenski interval između trenutka  $J$  i  $K$  vremenske osi  $t$
- $RA=IPS$  – inputna promjena stanja koja će biti dodana stanju  $L$  (jedinica/vrijeme)
- $RA.JK$  – iznos promjene stanja koja će biti sumirana u intervalu  $JK$  stanju  $L$  (jedinica/vrijeme)
- $RS=OPS$  – promjena stanja koja će biti odbijena (output) stanju  $L$
- $RS.JK$  – iznos promjene stanja koji će biti oduzeta u intervalu  $JK$  od stanja  $L$  (jedinica/vrijeme).

Jednadžbe stanja sustava predstavljaju proces integracije (kontinuirani sustavi) te je prethodnu jednadžbu moguće prikazati na sljedeći način:

$$L = L_0 + \int_0^t (RA - RS) dt$$

$L$  - iznos stanja u bilo kojem vremenskom trenutku  $t$  (jedinica mjere)

$L_0$  - početno stanje u trenutku  $t = 0$  (jedinica)

$RA$  - inputna promjena stanja toka

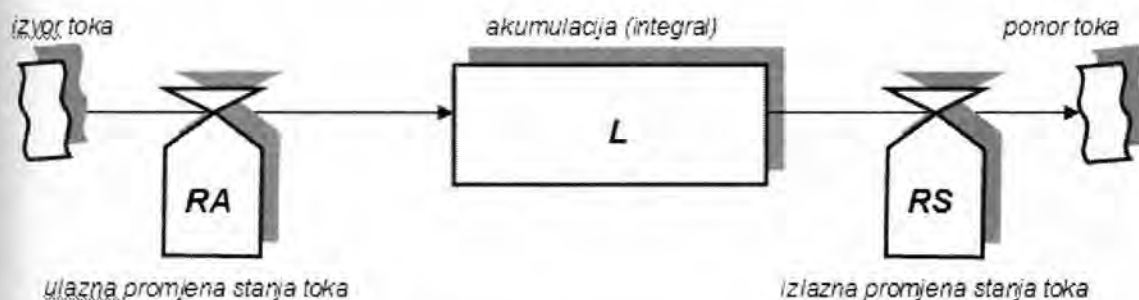
$RS$  - outputna promjena stanja toka

$dt$  - diferencijalni operator – "beskonačno" mali interval vremena

$\int_0^t$  - matematički operator koji označava integraciju u periodu  $t=0$  do  $t=t$   
kojim se množe promjene stanja sustava.

Posljednje dvije jednačbe poznate su kao diferencijalne jednačbe prvoga reda koje se matematički rješavaju tzv. metodom numeričke integracije "korak po korak" (*step by step*). Ovakve jednačbe sustava omogućuju nam determiniranje bilo kojeg sustava, ma koliko on bio složen.

Grafički simbol za varijablu stanja sustava  $L$  prema Dynamo metodologiji prikazujemo na način kao prema slici 19.



Sl. 19. Grafički simbol za varijablu stanja sustava  $L$

Jednačbe promjene stanja sustava – R – (Rate equations) pokazuju na koji se način sustav kontrolira, te su oni posljedica upravljačkih politika odlučivanja. Ulaz u element promjene stanja sustava (Rate funkcija – ventil) su informacijski tokovi koji dolaze od elemenata stanja ili konstanti.

$$R.KL = f(\text{stanja, konstante})$$

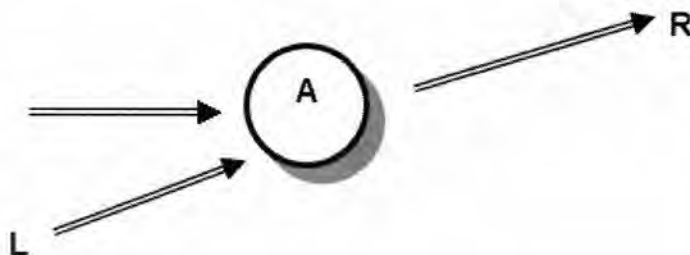
Jednadžba stanja je izračunata u trenutku K vremenske osi t, upotrebljavajući informaciju o stanju u trenutku K i izračunava izlazni promjenjivi tok za period KL vremenske osi t. Rate funkcija predstavlja promjenu stanja u jedinici vremena, to se u fizici naziva brzina promjene stanja. Rate funkcija -R(t) je vremenski ovisna i matematički je jednaka 1. derivaciji stanja sustava - L(t) po vremenu.

$$R(t) = d(\text{stanja sustava}) / dt$$

Pomoćne jednadžbe - A - (Auxiliary Equations) koriste se radi pojednostavljenja jednadžbi promjena stanja. Postavljaju se poslije jednadžbi stanja sustava o kojima one ovise i prije jednadžbi promjene stanja čiji su one dio. Pomoćnim jednadžbama moguće je unijeti tabelarni prikaz varijabli, tj. nelinearnih funkcionalnih ovisnosti.

$$AA.K = \text{TABLE}(TAA, \text{TIME.K}, \text{MINV}, \text{MAX}, \text{KA})$$

Grafička oznaka za pomoćne jednadžbe prema slici 20. je krug:



Sl. 20. Grafička oznaka pomoćnih jednadžbi

U pomoćne jednadžbe ulaze informacijski tokovi LEVEL-a (jednadžbe stanja), iz njih izlaze informacijski tokovi RATE-a (jednadžbe promjene stanja).

Jednadžbe konstanti – C – (Constants) – su izrazi koji definiraju brojčane vrijednosti koje nisu funkcije vremena, npr:

$$A = 20 .$$

Jednadžbe početnih vrijednosti – N – (Initial Value Equations) su jednadžbe koje definiraju inicijalne (početne) vrijednosti. Te su vrijednosti nužne da bi računalo moglo započeti proračune za simulacijski model Sustavne dinamike, npr.:

$$L \quad L.K = L.J + (DT) * (RA.JK - RS.JK)$$

$$N \quad L = 5 .$$

Početnu vrijednost možemo zadati i na način:

$$N \quad L = B ,$$

ali prethodno B mora biti determinirana jednadžbom konstanti JK, npr. B=5.

#### **5.2.4. Raspoloživi softverski paketi Sustavne dinamike**

Sustavna dinamika raspolaže s većim brojem varijanti programskih paketa:

1. PUGH-ROBERTS ASSOCIATES, Inc. Five Lee Street Cambridge, Massachusetts 02139 USA
  - 1.1. DYNAMO III/F (CDC under NOS, DEC System 10, DEC System 20; Honeywell under GCOS; IBM under CMS; PRIME, all Siemens; Telefunken Tr44=; UNIVAC under EXEC 8; VAX. ( Also available in FORTRAN 77.)
  - 1.2. Gaming DYNAMO II/F (DEC System 10, DEC System 20; IBM under CMS, TSO)
  - 1.3. DYNAMO II/F (DEC System 10, DEC System 20)
  - 1.4. DOCUMENTOR/F (CDC under NOS; DEC System 10, DEC System 20; IBM. under OS, TSO, CMS, and CSS, PRIME, VAX, Data General MV-8000; UNIVAC 1100)
  - 1.5. Mini DYNAMO (CDC under NOS; DEC System 10, DEC System 20; Data-General under RDOS; HP-3000; IBM under OS, TSO, CMS, and DOS; MULTICS;

- PDP 11 under RSX/11M, RSTS with floating or non-floating point hardware, UNIX, RT-11, under IAS; PRIME; UNIVAC; VAX)
- 1.6. Micro-DYNAMO (Apple II, Apple IIe, plus with 48k,Pascal language system,and two disk drives. Printer and color monitor are recommended)
  2. GEORGE P. RICHARDSON, , WHEATON COLLEGE, Norton, Massachusetts 02766 USA
    - 2.1.SYSDYN predstavlja kompajler DYNAMO jezika u BASIC jezik
  3. FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA, Beograd
    - 3.1. SDS jezik za kontinuiranu simulaciju
  4. SALFORD UNIVERSITY ENGLAND Department of Business and Management Studies Salford, M5 4WT, England
    - 4.1. DYSMAP2 predstavlja jezik za kontinuiranu simulaciju posebno na IBM-PC i kompatibilnim
  5. HIGH PERFORMANCE SYSTEMS 13 Dartmouth College Highway – Lyme NH 03768, USA.
    - 5.1. STELLA predstavlja jezik namijenjen kompjutorskoj simulaciji s posebno dobrom grafikom
  6. Ante Munitić, Pomorski fakultet, Split, Zrinjsko-Frankopanska 38, Split
 

SYSDYNS predstavlja kompajler DYNAMO jezika u Basic jeziku SPECTRUM verzije te omogućava kontinuiranu simulaciju na SPECTRUM-SINCLAIR-TIME osobnim računalima ( RAM manji od 48 K ) SYSDYNS,001 predstavlja kompajler za BASIC, GW BASIC i BASICA, te QBASIC i kompatibilnim sustavnim softverom za osobna računala
  7. Powersim i Powersim Studio, Powersim Corporation, PowersimAS, Promenaden Knarvik Senter, Po BOX 206,N-5100 Isdalsto, Norway
  8. Vensim 3.0, Ventama Systems, 60 Jacob Gates Road, Harvard, MA 01451,Inc. USA
  9. I'think Software, HPS,High Perfomance Systems,Inc,45 Lyme Road, Suite 200, Hanover NH 03755



## 5.2.5. Osnovni pojmovi potrebni za izvođenje simulacije - eksperimenta

U svakom simulacijskom modelu mora se definirati slijedeće:

- duljina vremenskog intervala osnovnog simulacijskog koraka DT. Potrebno je napomenuti da modelar mora u skladu s istom jednadžbom, a i vlastitim osjećajem odrediti DT. U krajnjem slučaju je DT rezultat kompromisa jednadžbe, iskustva, ukupnog vremena simulacije, cijene kompjutorskog vremena, tj. točnosti računanja;
- dužinu ukupnog trajanja simulacije LENGHT;
- veličinu intervala između memoriranja podataka za grafički prikaz, odnosno PLOT – PLOTPER;
- veličinu intervala između tabeliranja veličina za tiskani izlaz PRTPER.

Bilo koju varijablu simulacijskog modela moguće je prikazati na izlazu kao veličinu promjenjivu u vremenu, što znači dinamički, i to tabelarno naredbom PRINT (ime varijable) ili grafički (plotirano) naredbom PLOT (ime varijable). Broj istodobnih prikaza varijabli ovisi o veličini ekrana, to jest računala i varijante Dynamo jezika.

### SIMBOLIKA PROGRAMSKOG PAKETA POWERSIM

Kao što je prije rečeno, prilikom modeliranja sustava koje će biti prikazano u sljedećim poglavljima, zbog jednostavnosti korištenja, tj. "prijateljskog sučelja" (engl. *user friendly*), biti će korišten programski paket Powersim Studio 2000<sup>1</sup>. Zbog toga će u ovom poglavlju, sukladno vrstama jednadžbi, biti prikazana simbolika za njihovo opisivanje.

Kao što je prije rečeno u Sustavnoj dinamici postoji pet osnovnih tipova jednadžbi koje se koriste za modeliranje dinamike sustava.

1. *Jednadžba stanja razine sustava* (Level funkcija) predstavlja akumulaciju (integraciju) u kojima se akumuliraju (integriraju) sve promjene stanja tokova koje ulaze i izlaze s promatrane razine.

$$\frac{SS.K - SS.J}{DT} = UPS.JK - IPS.JK \quad (64)$$

<sup>1</sup> Više o tome, Powersim Studio 2003, User Guide, Powersim Software AS, Bergen, Norway,

Iz (64) moguće je primijetiti da je ukupna promjena stanja u promatranom intervalu  $DT$  jednaka ulaznoj promjeni stanja, minus izlaznoj promjeni stanja ostvarenoj u intervalu  $DT$ . Dopusti li se sada da se  $DT$  smanji tako da teži prema nuli dobiva se diferencijalna jednačba koju je moguće prikazati jednačbom.

$$\lim_{DT \rightarrow 0} \frac{SS.K - SS.J}{DT} = \frac{d(SS)}{dt} = UPS(t) - IPS(t) \quad (65)$$

Integrirajući posljednju jednačbu te uvrštavajući granice integriranja, ukupno stanje proizvoljne razine promatranog kontinuiranog sustava moguće je izreći matematičkom jednačbom:

$$SS = SS_0 + \int_0^t (UPS - IPS) dt \quad (66)$$

Dakle:

*Ukupno stanje sustava (SS) jednako je prošlom stanju sustava (SS<sub>0</sub>) promijenjeno za razliku ulazne promjene stanja toka (UPS) i izlazne promijene stanja toka (IPS) u beskonačno malom vremenskom periodu (dt)..*

Tablica br. 3. Značenje simbolike iz jednačbe (66) .

<b>Simbol</b>	<b>Značenje</b>
$SS$	iznos stanja u bilo kojem vremenskom trenutku $t$ ( jedinica mjere )
$SS_0$	početno stanje u trenutku $t = 0$ ( jedinica )
$\int_0^t$	matematički operator koji označava integraciju ili akumulaciju u periodu vremena $t = 0$ do $t = t$
$UPS$	ulazni tok promjene stanja
$IPS$	izlazni tok promjene stanja
$Dt$	diferencijalni operator koji predstavlja infinitesimalni (beskonačno mali ) interval vremena kojim se množe promjene stanja sustava

Grafički simbol jednađbe stanja koji se koristi u dijagramu toka prikazan je na Slici 21.



Sl. 21. Grafički simbol Level funkcije

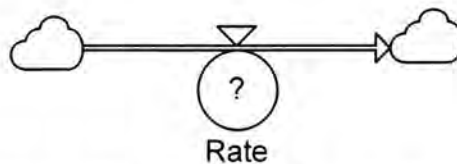
2. *Jednađba promjene stanja razine sustava* (Rate funkcija) predstavlja ulazno-izlazne stope relativne promjene promatrane razine. Ulaz u element promjene stanja sustava su tokovi koji dolaze od elemenata stanja ili konstanti, što je moguće prikazati jednađbom (67):

$$PS.KL=f(\text{stanje, konstante}) \quad (67)$$

Kao i kod jednađbe stanja, smanjenjem intervala DT može se zaključiti da u fizičkom smislu ona predstavlja brzinu promjene stanja, tj. prvu derivaciju:

$$R(t) = \frac{d(\text{stanje sustava})}{dt}$$

Grafički simbol ove funkcije prikazan je na slici 22.



Sl. 22. Grafički simbol Rate funkcije

3. *Pomoćne jednađbe* (Auxiliary funkcija) su jednađbe koje se upotrebljavaju radi pojednostavlivanja jednađbi promjene stanja. Grafički simbol ove funkcije prikazan je na Slici 23.



Sl. 23. Grafički simbol Auxiliary funkcije

4. *Jednadžbe konstanti (Constants)* su jednadžbe pomoću kojih se definiraju konstantne vrijednosti koje nisu u funkciji vremena. Grafički simbol ove funkcije prikazan je na slici 24.



Sl. 24. Grafički simbol Constants funkcije

5. *Jednadžbe početnih vrijednosti* koriste se pri definiranju početnih vrijednosti, potrebnih prilikom proračuna simulacijskih modela. Grafički simbol ovisi o načinu zadavanja početne vrijednosti (npr. jesu li početne vrijednosti date funkcijom tablice ili konstantom).

### 5.3. Jednadžbe stanja brodskog turbogeneratorskog sustava

Na temelju danih jednadžbi stanja (11, 12, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47 i 62) pojedinih dijelova brodskoga turbogeneratorskog sustava moguće je determinirati njegov sustav-dinamički matematički model predstavljen eksplicitnim oblikom skupa nelinearnih diferencijalnih jednadžbi:

$$\frac{d\varphi_{\omega 1}}{dt} = \frac{1}{T_{a1}} (\mu_G + k_{\omega 2} \varphi_{\omega 2} - f(t) - k_1 \varphi_{\omega 1}) \quad \text{I.}$$

$$\frac{d\varphi_{\omega 2}}{dt} = \frac{1}{T_{a2}} (\mu_G + k_{\omega 1} \varphi_{\omega 1} - \varphi_{\omega 2}) \quad \text{II.}$$

$$\frac{d\psi_1}{dt} = \frac{\mu}{R_\mu} + \frac{\Psi_0}{R_{\psi 0}} - \frac{\Psi_1}{R_{\psi 1}} \quad \text{III.}$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\psi_1}{T_{\psi 1}} - \frac{\psi_2}{T_{\psi 2}} - \frac{\varphi}{T_\varphi} \quad \text{IV.}$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{1}{T_V A_R} \frac{dy}{dt} - \frac{x}{T_V T_n} - \frac{1}{T_V} \frac{dx}{dt} \quad \text{V.}$$

$$\frac{d\Psi_d}{dt} = \frac{r_s}{x_s} \Psi_d + A \Psi_q \omega + \frac{r_s}{x_s} \Psi_{ad} + u_d \quad \text{VI.}$$

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

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

$$\frac{d\Psi_{1d}}{dt} = -\frac{r_{1d}}{x_{1d}} \Psi_{1d} + \frac{r_{1d}}{x_{1d}} \Psi_{ad} \quad \text{IX.}$$

$$\frac{d\Psi_{1q}}{dt} = -\frac{r_{1q}}{x_{1q}} \Psi_{1q} + \frac{r_{1q}}{X_{1q}} \Psi_{aq} \quad \text{X.}$$

## 5.4. Kompjutorsko simulacijski modeli brodske plinske turbine

### 5.4.1. Sustav-dinamički matematički modeli brodske plinske turbine

Sustav-dinamički matematički modeli brodske plinske turbine definiraju se eksplicitnim oblikom diferencijalnih jednažbi (11 i 12), tj. izrazima:

$$\frac{d\varphi_{\omega 1}}{dt} = \frac{k_1}{T_{a1}} \left[ \frac{\mu_G}{k_1} + \frac{k_{\omega 2} \varphi_{\omega 2}}{k_1} - \frac{f(t)}{k_1} - \varphi_{\omega 1} \right], \quad (68)$$

tj:

$$\frac{d\varphi_{\omega 1}}{dt} = \frac{1}{T_{a1}} (\mu_G + k_{\omega 2} \varphi_{\omega 2} - f(t) - k_1 \varphi_{\omega 1}) \quad (69)$$

te:

$$\frac{d\varphi_{\omega 2}}{dt} = \frac{k_2}{T_{a2}} \left[ \frac{\mu_G}{k_2} + \frac{k_{\omega 1} \varphi_{\omega 1}}{k_2} - \varphi_{\omega 2} \right], \quad (70)$$

tj.

$$\frac{d\varphi_{\omega 2}}{dt} = \frac{1}{T_{a2}} (\mu_G + k_{\omega 1} \varphi_{\omega 1} - \varphi_{\omega 2}) \quad (71)$$

### 5.4.2. Sustav-dinamički mentalno verbalni modeli brodske plinske turbine

Na temelju matematičkog modela, tj. eksplicitnog oblika jednažbe stanja brodske plinske turbine (69) moguće je determinirati mentalno-verbalni model brodske plinske turbine:

- Ako relativna promjena potrošnje goriva  $\mu_G$  raste, raste i brzina promjene relativne kutne brzine prvog vratila pa slijedi pozitivan predznak uzročno-posljedične veze UPV(+).
- Ako umnožak koeficijenta povećanja kutne brzine  $\omega_1$  raste po kutnoj brzini  $\omega_2$  i promjene kutne brzina drugog vratila ( $k_{\omega 2} \varphi_{\omega 2}$ ), raste i brzina promjene relativne kutne brzine prvog vratila pa slijedi pozitivan predznak promatrane uzročno-posljedične veze UPV(+).

- Ako relativna promjena vanjskih mogućih djelovanja tereta raste, smanjuje se brzina promjene relativne kutne brzine prvog vratila pa je promatrana UPV (-) negativna.
- Ukoliko umnožak koeficijenta povećanja kutne brzine  $\omega_2$  raste po kutnoj brzini  $\omega_1$  i promjena kutne brzine prvog vratila ( $k_{\omega 1} \varphi_{\omega 1}$ ), smanjuje se brzina promjene relativne kutne brzine prvog vratila pa je UPV (-) negativna.
- Ukoliko  $T_{a1}$ , vrijeme zaleta osovine, raste, smanjuje se brzina promjene relativne kutne brzine prvog vratila pa je promatrana UPV (-) negativna.

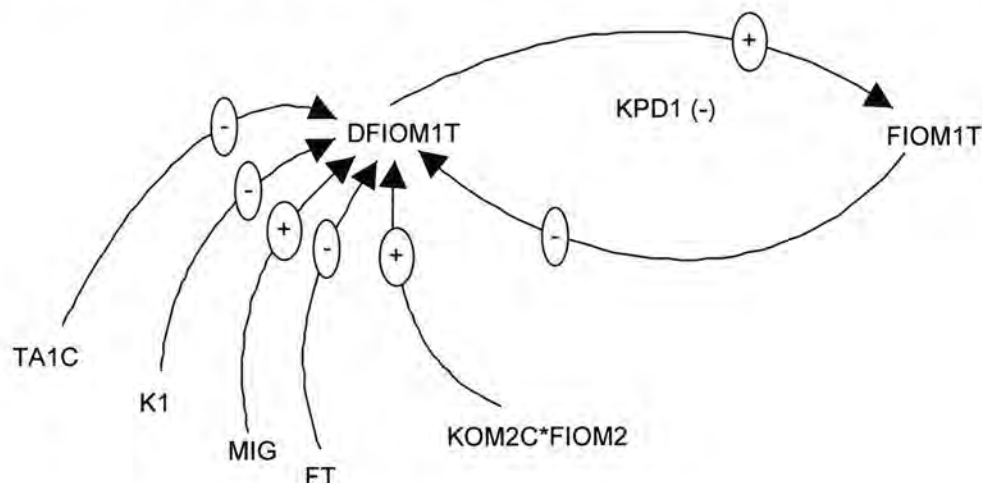
Na temelju matematičkog modela, tj. eksplicitnog oblika jednadžbe stanja brodske plinske turbine (70) moguće je determinirati mentalno-verbalni model brodske plinske turbine:

- Ako raste relativna promjena potrošnje goriva  $\mu_G$ , raste i brzina promjene relativne kutne brzine drugog vratila pa slijedi pozitivan predznak uzročno-posljedične veze UPV(+).
- Ako umnožak koeficijenta povećanja kutne brzine  $\omega_2$  raste po kutnoj brzini  $\omega_1$  i promjena kutne brzine prvog vratila ( $k_{\omega 1} \varphi_{\omega 1}$ ), raste i brzina promjene relativne kutne brzine drugog vratila pa slijedi pozitivan predznak uzročno-posljedične veze UPV(+).
- Ukoliko  $T_{a2}$ , vrijeme zaleta osovine, raste, smanjuje se brzina promjene relativne kutne brzine drugog vratila pa je promatrana UPV (-) negativna.
- Ukoliko raste promjena kutne brzine drugog vratila, smanjuje se brzina promjene kutne brzine drugog vratila pa je promatrana UPV (-) negativna.

Intuitivno-mentalno znači umnu zamisao koja može u početku biti maglovito, ali ipak dovoljno jasna, o karakteru i dinamici ponašanja promatranog realiteta.

### 5.4.3. Sustav-dinamički strukturni modeli brodske plinske turbine

Na temelju navedenih, mentalno-verbalnih modela, moguće je izraditi strukturne dijagrame koji su prikazani na slici 25., 26. i 27.



Sl.25. Strukturni dijagram turbokompresora niskog tlaka

U promatranom sustavu egzistira krug povratnog djelovanja (KPD1).

**KPD1(-):**  $FIOM1 \Rightarrow (-)DFIOM1T \Rightarrow (+)DFIOM1T \Rightarrow (+)FIOM1$ ; koji ima samoregulirajući dinamički karakter (-) jer je suma negativnih predznaka neparan broj.

#### Napomena:

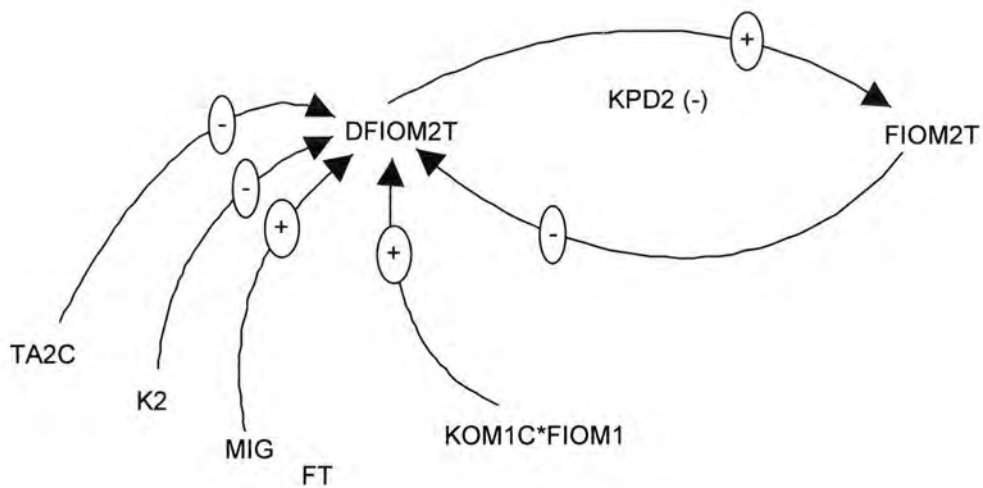
#### Vrijedi pravilo:

*Ako porast varijable izaziva rast druge varijable na koju ona djeluje, tada uzročno-posljedična veza (UPV) ima predznak (+), a ako izaziva pad, onda ista uzročno-posljedična (UPV) veza ima predznak (-).*

*Ukoliko je u promatranom krugu povratnog djelovanja (KPD), suma negativnih UPV-a neparan broj, tada je predznak promatranog KPD negativan (-), a ako je paran, onda je predznak KPD-a (+).*

*Negativni KPD-i su tzv. samoregulirajući, te sustav ima karakter samoreguliranja, što je kod tehničkih sustava i najčešći slučaj.*

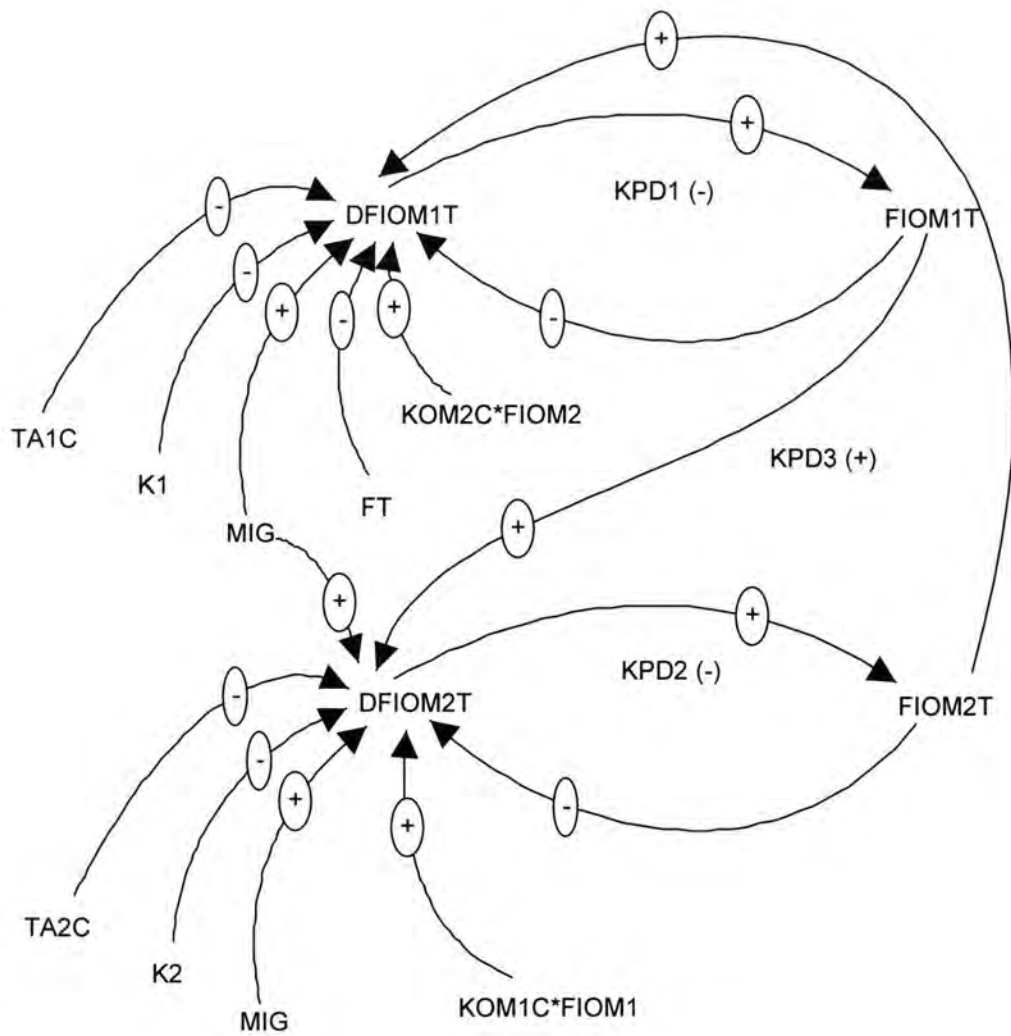




Sl.26. Strukturni dijagram turbokompresora visokog tlaka

U promatranom sustavu egzistira krug povratnog djelovanja (KPD2).

**KPD2(-):FIO2M2=>(-)DFIOM2T=>(+)DFIOM2T=>(+)FIO2M2**; koji ima samoregulirajući dinamički karakter (-) jer je suma negativnih predznaka neparan broj.



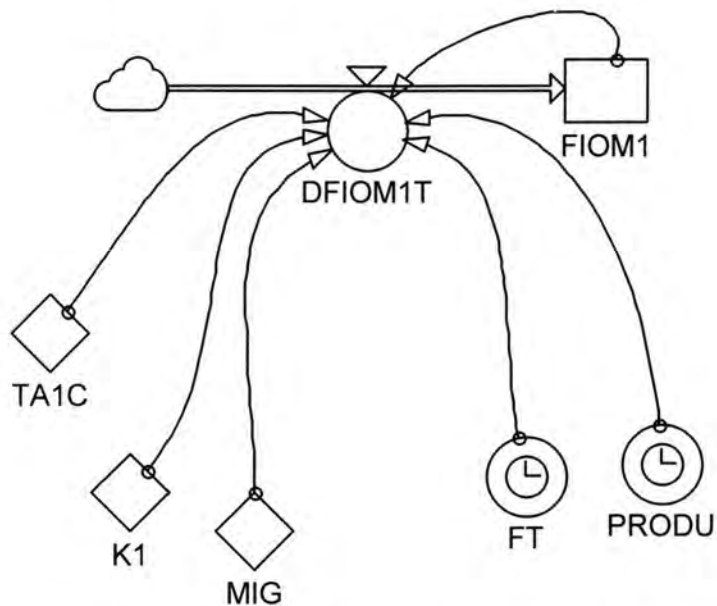
Sl. 27. Globalni strukturni model brodske plinske turbine

U promatranom sustavu egzistiraju krugovi povratnog djelovanja (KPD1, KPD2 i KPD3).

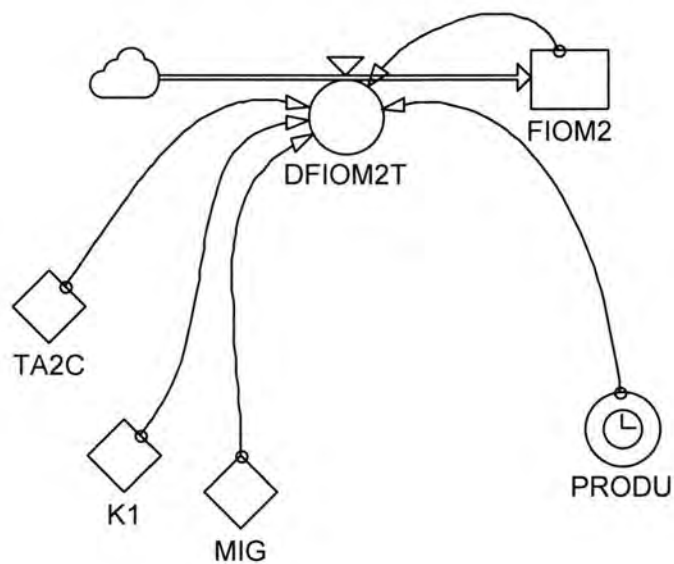
**KPD3(+):**  $FIOM2 \Rightarrow (+) DFIOM1T \Rightarrow (+) FIOM1T \Rightarrow (+) DFIOM2T \Rightarrow (+) FIOM2T$ ; koji ima dinamički karakter (+) jer je suma pozitivnih predznaka paran broj.

#### 5.4.4. Sustav-dinamički dijagrami toka brodske plinske turbine

Na temelju izrađenih mentalno-verbalnih i strukturnih modela izrađuju se dijagrami toka, koji su prikazani na slici 28, 29 i 30.

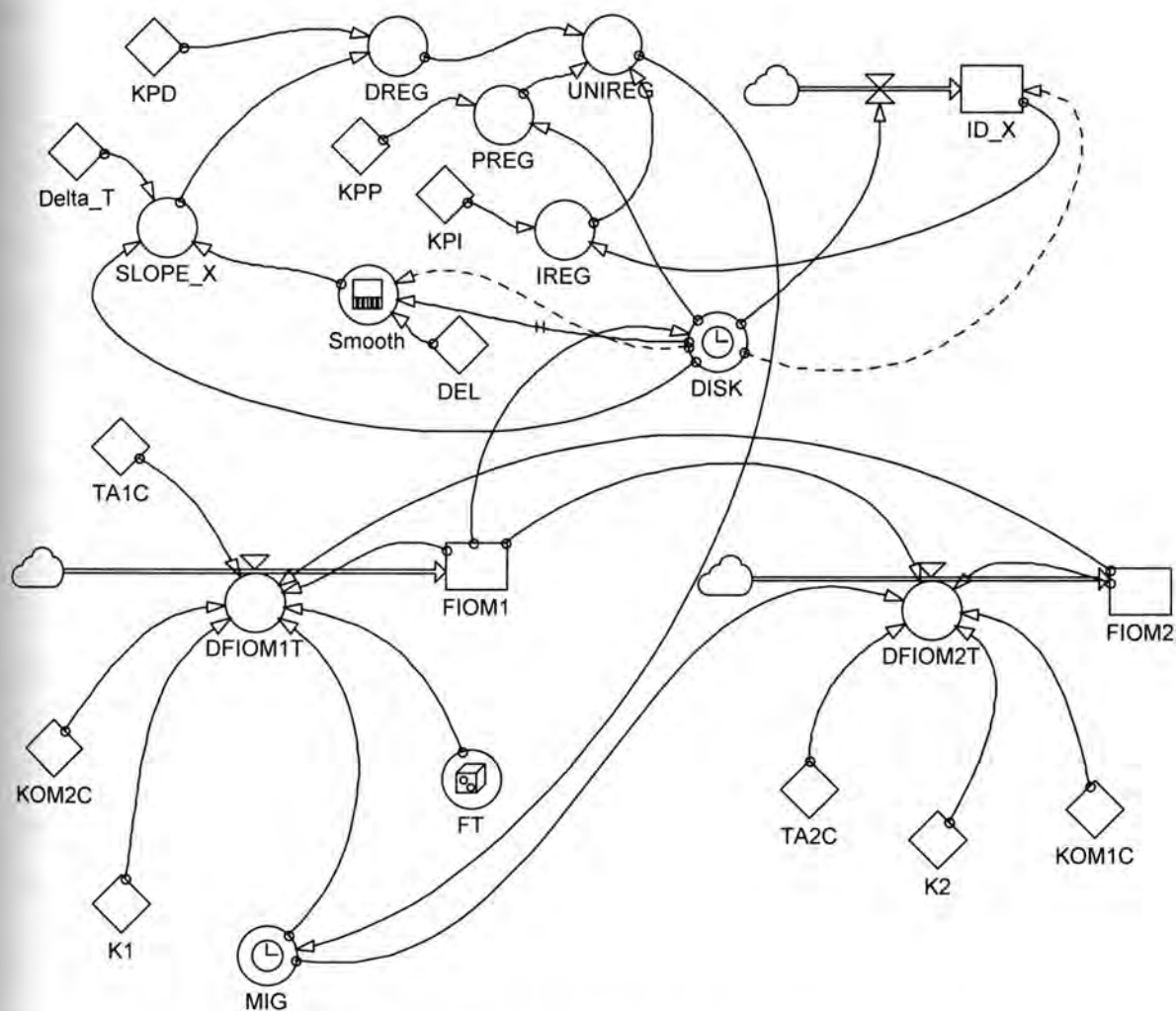


Sl.28. Dijagram toka turbokompresora niskog tlaka



Sl.29. Dijagram toka turbokompresora visokog tlaka

Na temelju izrađenih pojedinačnih modela, dijagram toka, tj. kvalitativnih modela brodske plinske turbine, moguće je determinirati globalni dijagram toka u POWERSIM (POWERSIM Version 2.5c, Norway, 1996) simulacijskom jeziku, i to s ugrađenim elektronskim PID regulatorom, koji djeluje na relativnu potrošnju goriva plinske turbine.



Sl. 30. Globalni dijagram toka u POWERSIM simbolici brodske plinske turbine s ugrađenim elektronskim PID regulatorom

MACRO DYNAMO funkcije koje su ugrađene u simulacijski model brodske plinske turbine:

*NOISE, CLIP, STEP, UNIREG*

#### 5.4.5. Kvantitativni simulacijski model brodske plinske turbine

Simulacijski model brodske plinske turbine u DYNAMO (verzija DYNAMO 4.0, Pugh-Roberts Associates, University of Toronto, 1996) simulacijskom jeziku, s koeficijentima sustava (jedadzbi konstanti) dobivenih iz [1]:

```

* -----
MACRO SLOPE(X,DEL)          X=ULAZNA VARIJABLA U DERIVATOR
*                          DEL=DT=VREMENSKI INTERVAL DERIVIRANJA
*
A SLOPE.K=(X.K-SMOOTH(X.K,DEL))/DT
*
MEND
*
* "UNIVERZALNI PID REGULATOR-UNIREG":
* -----
*
MACRO UNIREG(X,KPP,KPI,KPD)  X=ULAZNA VARIJABLA U REGULATOR,
*                          KPP=KOEFIJENT POJACANJA P-CLANA
*                          KPI=KOEFIJENT PROPORCIONALNOSTI I-CLANA
*                          KPD=KOEFIJENT PROPORCIONALNOSTI D-CLANA
INTRN ID,PREG,IREG,DREG
*
A PREG.K=KPP*X.K
*
L ID.K=ID.J+DT*X.J
*
N ID=X
*
A IREG.K=KPI*ID.K
A DREG.K=KPD*SLOPE(X.K,DT)
*
A UNIREG.K=PREG.K+IREG.K+DREG.K
*
MEND
*
R DF1OM1T.KL=(1/TA1C)*(MIG.K+KOM2C*FIOM2.K-FT.K-K1*FIOM1.K)
*                          BRZINA PROMJENE RELATIVNE KUTNE BRZINE
*
C TA1C=.65                  VREMENSKA KONSTANTA KOJA KARAKTERIZIRA
*                          INERCIJE ROTIRAJUCIH MASA U OVISNOSTI
*                          O PROMJENI KUTNE BRZINE OSOVINE
*
C KOM2C=.7                  KOEFICIJENT POJACANJA KUTNE BRZINE
*                          UREDAJA PO POTROSNJI GORIVA
*
C K1=1.128                  KOEFICIJENT SAMOREGULIRANJA PRVE
*                          OSOVINE
*
L FIOM1.K=FIOM1.J+DT*DF1OM1T.JK
*                          RELATIVNA KUTNA BRZINA PRVE OSOVINE
*
N FIOM1=0
*
A MIG.K=STEP(.1/6,1)+STEP(.25/6,5)+STEP(.65/6,10)+STEP(PIDREG.K,15)
*                          RELATIVNA PROMJENA POTROSNJE GORIVA

```

```

*
A DISK.K=CLIP(1-FIOM1.K,0,TIME.K,15)
*
A PIDREG.K=UNIREG(DISK.K,KPP,KPI,KPD)
*
C KPP=5
*
C KPI=4
*
C KPD=0
*
A FT.K=STEP(.5,15)*(.5+STEP(NOISE(),20))
*
*
*
*
R DFION2T.KL=(1/TA2C)*(MIG.K+KOM1C*FIOM1.K-K2*FIOM2.K)
*
*
*
C TA2C=.4
*
*
C KOM1C=1.616
*
*
C K2=1.2
*
*
L FIOM2.K=FIOM2.J+DT*DFION2T.JK
*
*
*
N FIOM2=0
*
SAVE FIOM1,DFION1T,FIOM2,DFION2T,MIG,FT
*
SPEC DT=.1,LENGTH=30,SAVPER=.1

```

RELATIVNA PROMJENA VANJSKIH MOGUĆIH  
DJELOVANJA TERETA

BRZINA PROMJENE  
RELATIVNE KUTNE BRZINE DRUGE OSOVINE  
VRIJEME ZAETA DRUGE OSOVINE

KOEFICIJENT POJACANJA KUTNE BRZINE

KOEFICIJENT SAMOREGULIRANJA  
DRUGE OSOVINE

RELATIVNA KUTNA BRZINA  
DRUGE OSOVINE

## 5.5. Kompjutorsko simulacijski modeli brodske parne turbine

### 5.5.1. Sustav-dinamički matematički modeli brodske parne turbine

Sustav-dinamički matematički model brodske parne turbine definira se eksplicitnim oblikom diferencijalnih jednadžbi, tj. izrazima:

$$\frac{d\psi_1}{dt} = \frac{\mu}{R_\mu} + \frac{\Psi_0}{R_{\psi_0}} - \frac{\Psi_1}{R_{\psi_1}} \quad (72)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\psi_1}{T_{\psi_1}} - \frac{\psi_2}{T_{\psi_2}} - \frac{\varphi}{T_\varphi} \quad (73)$$

### 5.5.2. Sustav-dinamički mentalno verbalni modeli brodske parne turbine

Na temelju matematičkog modela, tj. eksplicitnog oblika jednadžbe stanja brodske parne turbine (72.) moguće je determinirati mentalno-verbalni model brodske parne turbine:

- Ako relativni prirast tlaka pare u parnom volumenu turbine  $\psi_1$  raste, brzina relativnog prirasta tlaka pare u parnom volumenu turbine pada, iz čega slijedi negativan predznak promatrane uzročno-posljedične veze (-).
- Ako relativni prirast tlaka pare ispred manevarskog ventila  $\psi_0$  raste, rast će i brzina relativnog prirasta tlaka pare u parnom volumenu turbine, iz čega slijedi pozitivan predznak promatrane uzročno-posljedične veze (+).
- Ako relativna promjena položaja manevarskog ventila  $\mu$  raste, rast će i brzina relativnog prirasta tlaka pare u parnom volumenu turbine, iz čega slijedi pozitivan predznak promatrane uzročno-posljedične veze (+).
- Ukoliko vremenska konstanta volumena pare  $R_\mu$  raste, brzina relativnog prirasta tlaka pare u parnom volumenu turbine pada, iz čega slijedi negativan predznak promatrane uzročno-posljedične veze (-).
- Ako vremenska konstanta rotora turbine  $R_{\psi_0}$  raste, brzina relativnog prirasta tlaka pare u parnom volumenu turbine pada, iz čega slijedi negativan predznak promatrane uzročno-posljedične veze (-).

- Ako vremenska konstanta volumena pare  $R_{\psi_1}$  raste, rast će i brzina relativnog prirasta tlaka pare u parnom volumenu turbine, iz čega slijedi pozitivan predznak promatrane uzročno-posljedične veze (+).

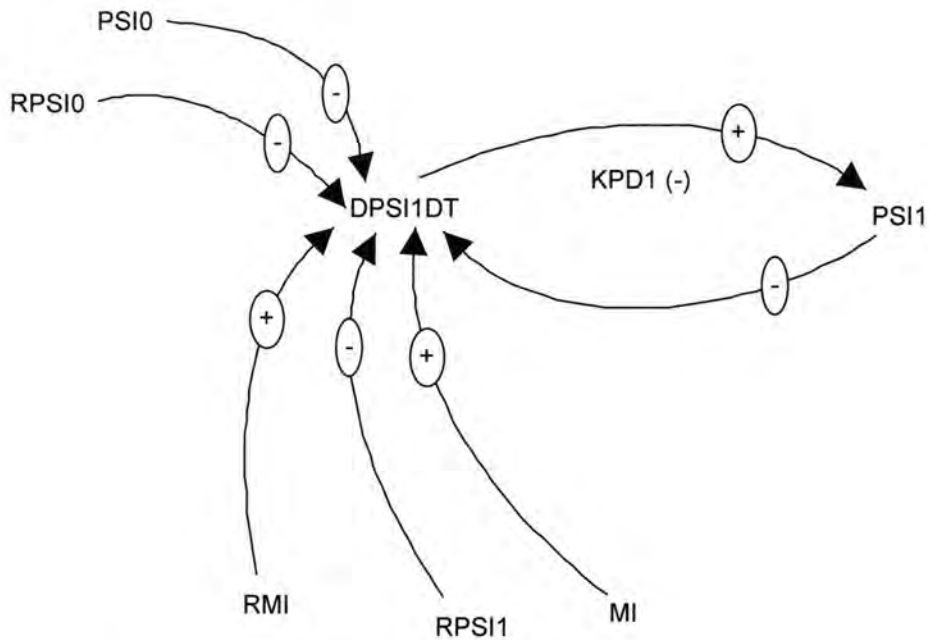
Na temelju matematičkog modela, tj. eksplicitnog oblika jednadžbe stanja brodske parne turbine (73) moguće je determinirati mentalno verbalni model brodske parne turbine:

- Ako relativni prirast tlaka pare u parnom volumenu  $\psi_1$  raste, rast će i brzina relativnog prirasta kutne brzine rotora turbine iz čega slijedi pozitivan predznak promatrane uzročno-posljedične veze (+).
- Ako relativni prirast kutne brzine rotora turbine  $\varphi$  raste, brzina relativnog prirasta kutne brzine rotora turbine pada, iz čega slijedi negativan predznak promatrane uzročno-posljedične veze (-).
- Ukoliko relativni prirast tlaka pare u glavnom kondenzatoru  $\psi_2$  raste, brzina relativnog prirasta kutne brzine rotora turbine pada, iz čega slijedi negativan predznak promatrane uzročno-posljedične veze (-).
- Ako vremenska konstanta rotora turbine  $T_{\psi_1}$  raste, brzina relativnog prirasta kutne brzine rotora turbine pada, iz čega slijedi negativan predznak promatrane uzročno-posljedične veze (-).
- Ukoliko vremenska konstanta rotora turbine  $T_{\varphi}$  raste, rast će i brzina relativnog prirasta kutne brzine rotora turbine, iz čega slijedi pozitivan predznak promatrane uzročno-posljedične veze (+).
- Ukoliko vremenska konstanta kotla  $T_{\psi_2}$  raste, rast će i brzina relativnog prirasta kutne brzine rotora turbine, iz čega slijedi pozitivan predznak promatrane uzročno-posljedične veze (+).



### 5.5.3. Sustav-dinamički strukturni modeli brodske parne turbine

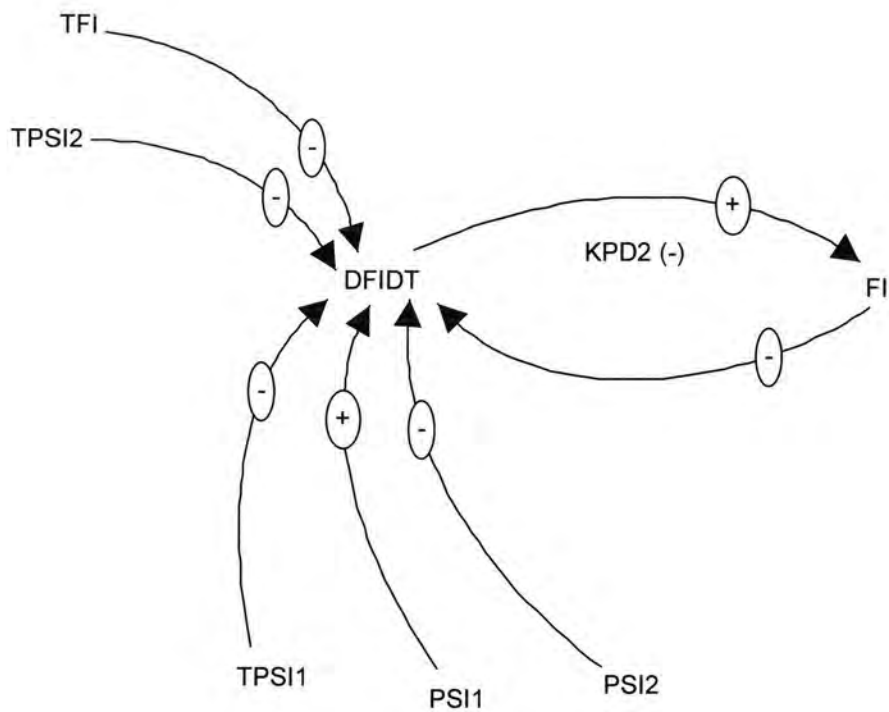
Na temelju navedenih mentalno-verbalnih modela moguće je izraditi strukturne dijagrame brodske parne turbine, koji su prikazani na slici 31., 32. i 33.



Sl. 31. Strukturni model brodske parne turbine-po volumenu pare

U promatranom sustavu egzistira krug povratnog djelovanja (KPD1).

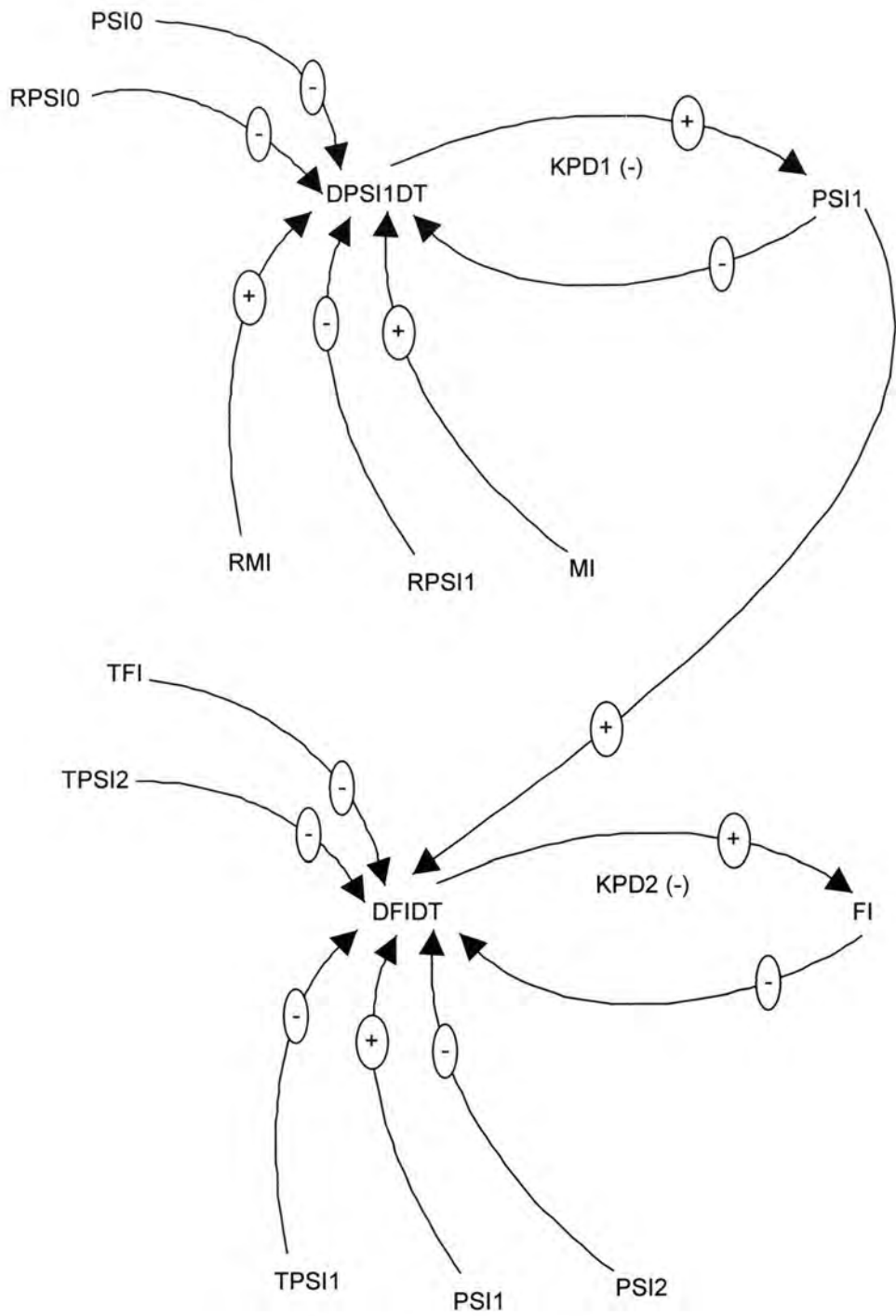
**KPD1(-):**  $PSI1 \Rightarrow (-) DPSI1DT \Rightarrow (+) DPSI1DT \Rightarrow (+) PSI1$ ; koji ima samoregulirajući dinamički karakter (-), jer je suma negativnih predznaka neparan broj.



Sl. 32. Strukturni model brodske parne turbine - po dinamici rotora

U promatranom sustavu egzistira krug povratnog djelovanja (KPD2).

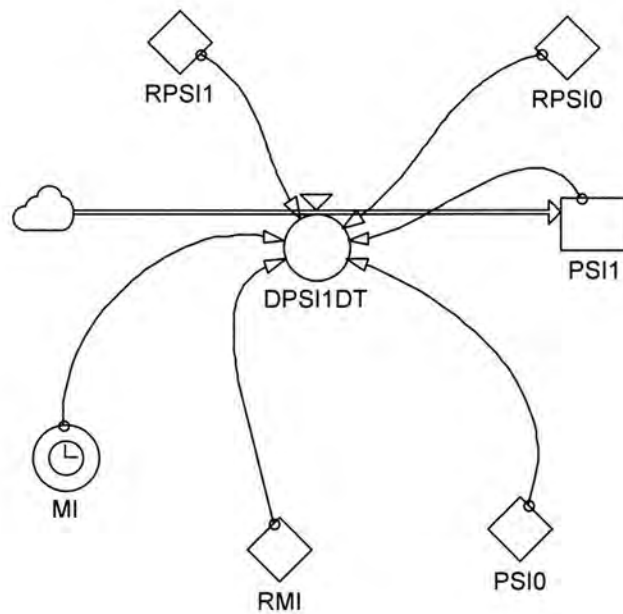
**KPD2(-): FI => (-)DFIDT => (+)DFIDT => (+)FI**; koji ima samoregulirajući dinamički karakter (-), jer je suma negativnih predznaka neparan broj.



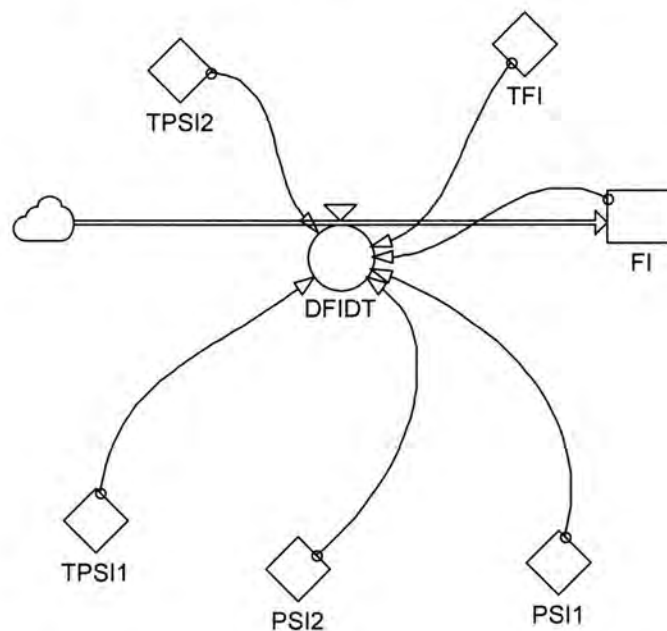
Sl. 33. Globalni strukturni model brodske parne turbine

#### 5.5.4. Sustav-dinamički dijagrami toka brodske parne turbine

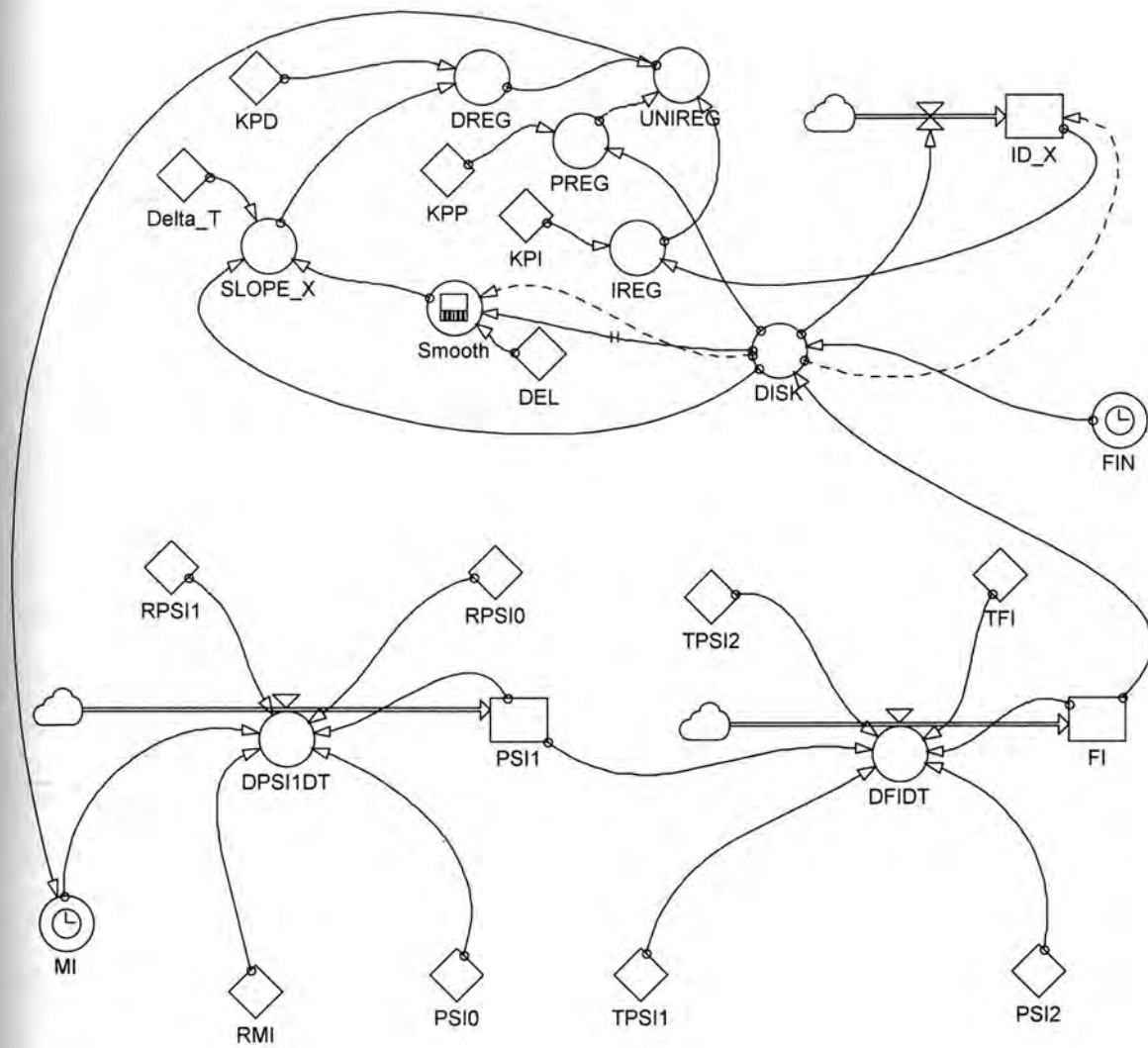
Na temelju izrađenih mentalno-verbalnih i strukturnih modela izrađuju se dijagrami toka, koji su prikazani na slici 34., 35. i 36.



Sl. 34. Dijagram toka brodske parne turbine - po volumenu pare



Sl. 35. Dijagram toka brodske parne turbine - po dinamici rotora



Sl. 36. 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*

### 5.5.5. Kvantitativni simulacijski model brodske parne turbine

Simulacijski model brodske plinske turbine u DYNAMO (verzija DYNAMO 4.0, Pugh-Roberts Associates, University of Toronto, 1996) simulacijskom jeziku s koeficijentima sustava (jednadžbi konstanti) dobivenih iz [1]:

```
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.K
*
N PSI1=0
*
A MI.K=CLIP(STEP(.05,10)+STEP(.95,50)+PIDFI.K,0,DELAY1(RE.K,2),1E-16)
*
*
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 FL.K=FLJ+DT*DFIDT.JK
*
N FI=0
*
A TPS11.K=5
*
A PSI2.K=0
*
A TPSI2.K=5
*
A TFLK=.1+MEL.K
*
* UNIREG-PID REGULATOR INSTALLING:
*
A DISK.K=FIN.K-FL.K
*
A FIN.K=STEP(.05,10)+STEP(.95,50)
*
A PIDFL.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 TPS11,PSI2,TPSI2,FI,TFI

```

## 5.6. Kompjutorsko simulacijski model broskoga sinkronoga generatora

### 5.6.1. Sustav-dinamički matematički model broskoga sinkronoga generatora

Matematički model broskoga sinkronoga generatora u eksplicitnom obliku predstavljen je jednadžbama:

$$\frac{d\psi_d}{dt} = -\frac{r_s}{x_s} \psi_d + A \psi_q \omega + \frac{r_s}{x_s} \psi_{ad} + u_d \quad (74)$$

$$\frac{d\psi_q}{dt} = -\psi_d \omega - \frac{r_s}{x_s} \psi_q + \frac{r_s}{x_s} \psi_{aq} + u_q \quad (75)$$

$$\frac{d\psi_f}{dt} = -\frac{r_f}{x_f} \psi_f + \frac{r_f}{x_f} \psi_{ad} + u_f \quad (76)$$

$$\frac{d\psi_{1d}}{dt} = -\frac{r_{1d}}{x_{1d}} \psi_{1d} + \frac{r_{1d}}{x_{1d}} \psi_{ad} \quad (77)$$

$$\frac{d\psi_{lq}}{dt} = -\frac{r_{lq}}{x_{lq}}\psi_{lq} + \frac{r_{lq}}{X_{lq}}\psi_{aq} \quad (78)$$

Na temelju osnovnih jednadžbi stanja moguće je izraditi mentalno verbalne modele, strukturne dijagrame i dijagrame toka broskog sinkronoga generatora.

### 5.6.2. Sustav-dinamički mentalno-verbalni modeli broskog sinkronoga generatora

Na temelju matematičkog modela, tj. eksplicitnog oblika jednadžbi stanja broskog sinkronog generatora moguće je determinirati mentalno-verbalne modele broskog sinkronog generatora.

Za prvu diferencijalnu jednadžbu stanja (74) vrijedi sljedeća uzročno-posljedična ovisnost:

- Ako magnetski tok kruga statora raste po osi  $d$   $\Psi_d$ , brzina promjene magnetskoga toka kruga statora po osi  $d$  će se smanjivati, iz čega slijedi "negativan" (-) predznak promatrane uzročno-posljedične veze.
- Ako induktivni otpor rasipanja kruga statora  $X_s$  raste, brzina promjene magnetskoga toka kruga statora po osi  $d$  će se smanjivati iz čega slijedi "negativan" (-) predznak promatrane uzročno-posljedične veze.
- Porastom napona po konturama statora po osi  $d$   $u_d$  raste brzina promjene magnetskoga toka kruga statora po osi  $d$ , iz čega slijedi "pozitivan" (+) predznak promatrane uzročno-posljedične veze.
- Porastom kutne brzine  $\omega$ , rast će brzina promjene magnetskoga toka kruga statora po osi  $d$ , iz čega slijedi "pozitivan" (+) predznak promatrane uzročno posljedične veze.
- Porastom magnetskoga toka kruga statora po osi  $q$  rast će brzina promjene magnetskoga toka kruga statora po osi  $d$ , iz čega slijedi "pozitivan" (+) predznak promatrane uzročno posljedične veze.
- Porastom magnetskoga toka uzajamne indukcije kontura po osi  $d$   $\psi_{ad}$ , brzina promjene magnetskog toka kruga statora po osi  $d$  raste, iz čega slijedi "pozitivan" (+) predznak promatrane uzročno-posljedične veze.
- Ukoliko aktivni otpor kruga statora  $r_s$  raste, smanjuje se brzina promjene magnetskoga toka kruga statora po osi  $d$ , iz čega slijedi "negativan" (-) predznak promatrane uzročno-posljedične veze.



Za drugu diferencijalnu jednadžbu stanja (75) vrijedi sljedeća uzročno-posljedična ovisnost:

- Ukoliko magnetski tok kruga statora raste po osi  $q$   $\Psi_q$ , brzina promjene magnetskoga toka kruga statora po osi  $q$  smanjivat će se, iz čega slijedi "negativan" (-) predznak promatrane uzročno-posljedične veze.
- Porastom napona po konturama statora po osi  $q$   $u_{q_s}$ , raste i brzina promjene magnetskoga toka kruga statora po osi  $q$ , iz čega slijedi "pozitivan" (+) predznak promatrane uzročno-posljedične veze.
- Porastom induktivnoga otpora rasipanja kruga statora  $X_s$ , raste brzina promjene magnetskoga toka kruga statora po osi  $q$ , iz čega slijedi "pozitivan" (+) predznak promatrane uzročno-posljedične veze.
- Ako magnetski tok kruga statora raste po osi  $d$   $\Psi_d$ , brzina promjene magnetskoga toka kruga statora po osi  $q$  smanjuje se, iz čega slijedi "negativan" (-) predznak promatrane uzročno-posljedične veze.
- Ukoliko kutna brzina  $\omega$  raste, brzina promjene magnetskoga toka kruga statora po osi  $q$  se smanjuje, iz čega slijedi "negativan" (-) predznak promatrane uzročno-posljedične veze.
- Ukoliko aktivni otpor kruga statora  $r_s$  raste, brzina promjene magnetskoga toka kruga statora po osi  $q$  se smanjuje, iz čega slijedi "negativan" (-) predznak promatrane uzročno-posljedične veze.

Za treću diferencijalnu jednadžbu stanja (76) vrijedi sljedeća uzročno-posljedična ovisnost:

- Ukoliko magnetski tok omotača uzbude  $\Psi_f$  raste, brzina promjene magnetskoga toka omotača uzbude će se smanjivati, iz čega slijedi "negativan" (-) predznak promatrane uzročno-posljedične veze.
- Ukoliko magnetski tok uzajamne indukcije kontura raste po osi  $d\Psi_{ad}$ , brzina promjene magnetskoga toka omotača uzbude će rasti, iz čega slijedi "pozitivan" (+) predznak promatrane uzročno-posljedične veze.

- Ako aktivni otpor omotača uzbude  $r_f$  raste, brzina promjene magnetskoga toka omotača uzbude će rasti iz čega slijedi "pozitivan" (+) predznak promatrane uzročno-posljedične veze.
- Porastom napona uzbude  $u_f$ , brzina promjene magnetskoga toka omotača uzbude raste, iz čega slijedi "pozitivan" (+) predznak promatrane uzročno-posljedične veze.
- Ako aktivni otpor omotača uzbude  $r_f$  raste, brzina promjene magnetskoga toka omotača uzbude će se smanjivati, iz čega slijedi "negativan" (-) predznak promatrane uzročno-posljedične veze.

Za četvrtu diferencijalnu jednadžbu stanja (77) vrijedi sljedeća uzročno-posljedična ovisnost:

- Ako magnetski tok prigušnih krugova raste po osi  $d \Psi_{ld}$ , brzina promjene magnetskoga toka prigušnih krugova po osi  $d$  će se smanjivati, iz čega slijedi "negativan" (-) predznak promatrane uzročno-posljedične veze.
- Ukoliko aktivni otpor prigušnih krugova raste po osi  $d r_{ld}$ , brzina promjene magnetskoga toka prigušnih krugova po osi  $d$  će se smanjivati iz čega slijedi "negativan" (-) predznak promatrane uzročno- posljedične veze.
- Ukoliko induktivni otpor prigušnih krugova raste po osi  $d x_{ld}$ , brzina promjene magnetskoga toka prigušnih krugova po osi  $d$  će rasti, iz čega slijedi "pozitivan" (+) predznak promatrane uzročno-posljedične veze.
- Ako magnetski tok uzajamne indukcije kontura raste po osi  $d \Psi_{ad}$ , brzina promjene magnetskoga toka prigušnih krugova po osi  $d$  će rasti, iz čega slijedi "pozitivan" (+) predznak promatrane uzročno-posljedične veze.

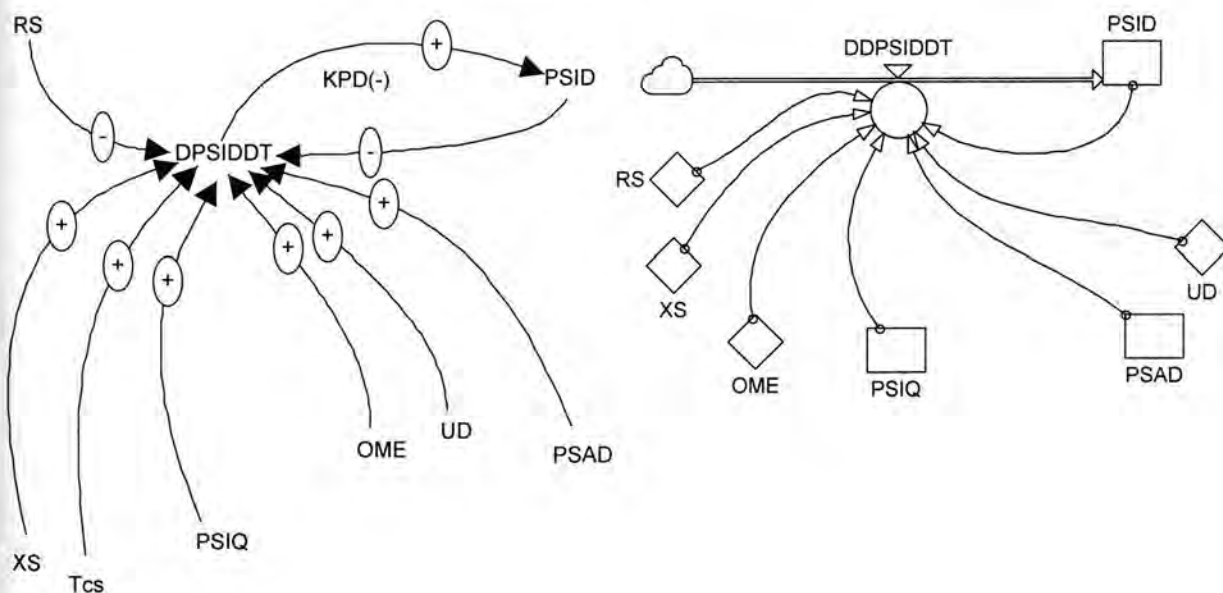
Za petu diferencijalnu jednadžbu stanja (78) vrijedi sljedeća uzročno-posljedična ovisnost:

- Ako raste magnetski tok prigušnih krugova po osi  $q \Psi_{lq}$ , brzina promjene magnetskoga toka prigušnih krugova po osi  $q$  će se smanjivati, iz čega slijedi "negativan" (-) predznak promatrane uzročno posljedične veze.
- Ako raste aktivni otpor prigušnih krugova po osi  $q r_{lq}$ , brzina promjene magnetskoga toka prigušnih krugova po osi  $q$  će se smanjivati, iz čega slijedi "negativan" (-) predznak promatrane uzročno-posljedične veze.

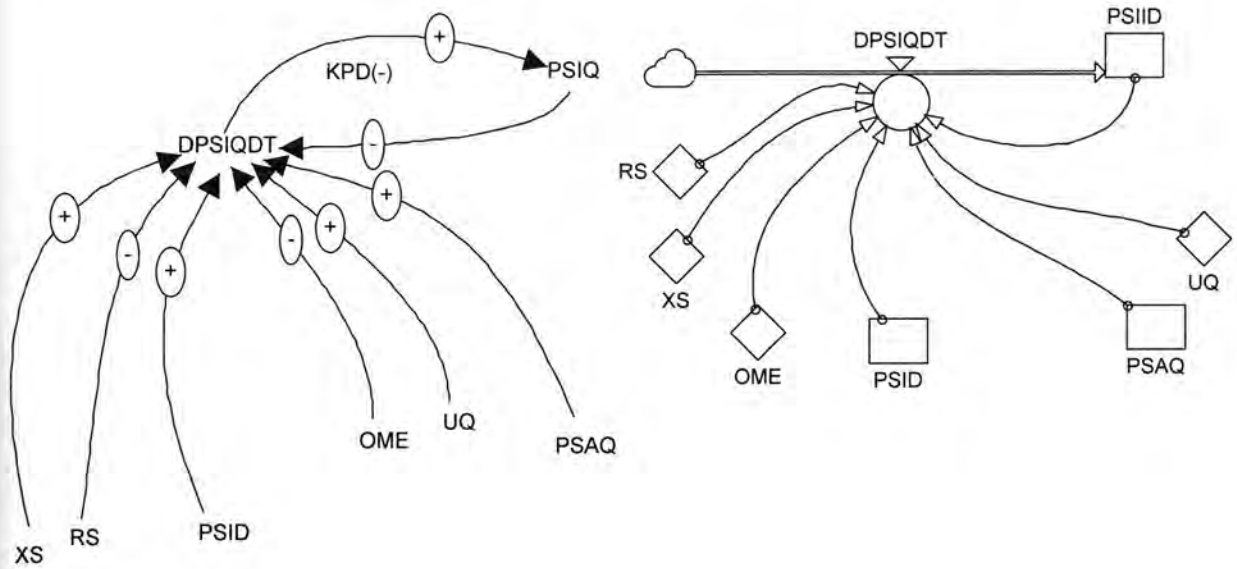
- Ukoliko raste induktivni otpor prigušnih krugova po osi  $q$   $x_l$ , brzina promjene magnetskoga toka prigušnih krugova po osi  $q$  će rasti, iz čega slijedi "pozitivan" (+) predznak promatrane uzročno-posljedične veze.
- Ukoliko raste magnetski tok uzajamne indukcije kontura po osi  $q$   $\Psi_{aq}$ , brzina promjene magnetskoga toka prigušnih krugova po osi  $q$  će rasti, iz čega slijedi "pozitivan" (+) predznak promatrane uzročno- posljedične veze.

### 5.6.3. Sustav-dinamički strukturni modeli i dijagrami toka brodskog sinkronoga generatora

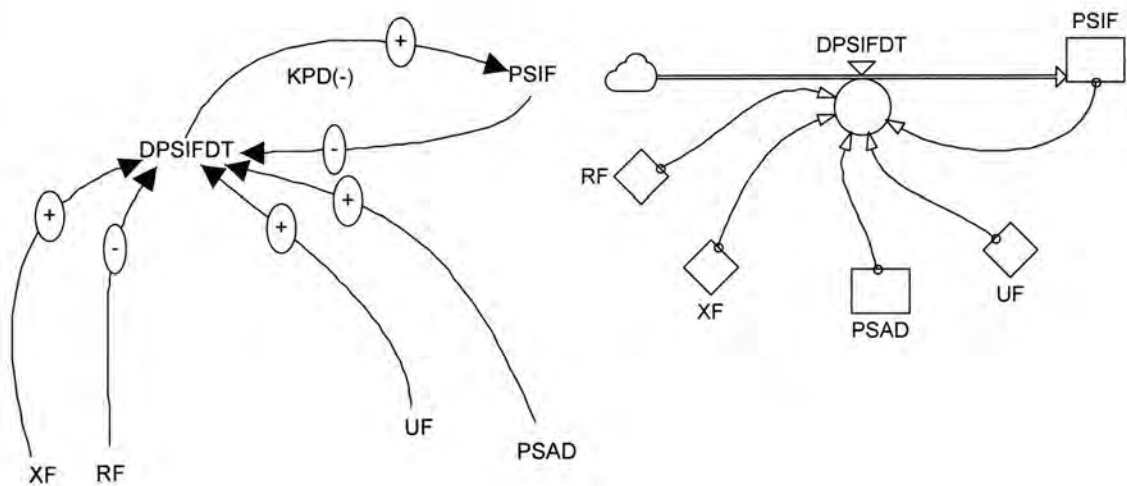
Na temelju navedenih mentalno-verbalnih modela moguće je izraditi strukturne dijagrame i dijagrame tokova koji su prikazani na Sl. 37.-43.



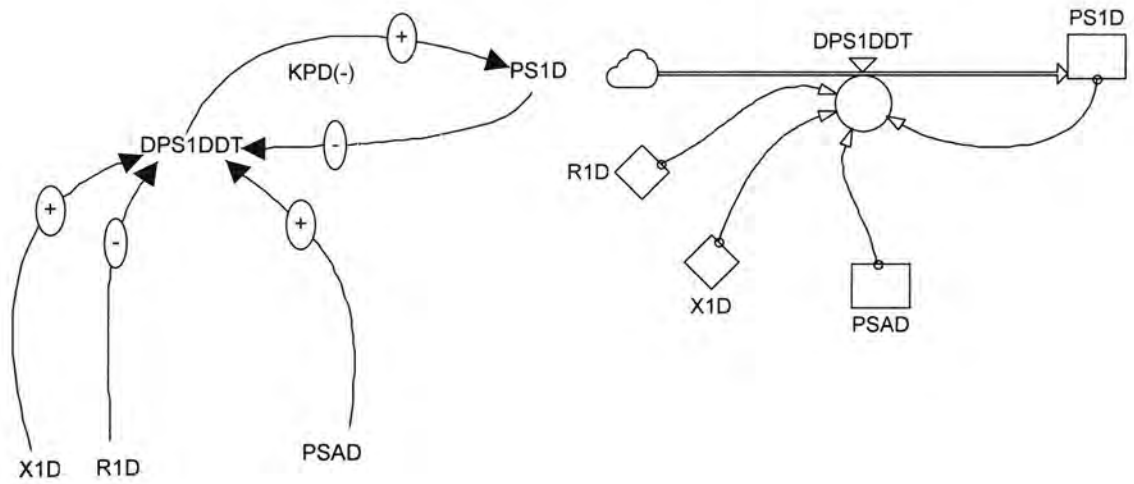
Sl. 37. Strukturni dijagram i dijagram toka prve diferencijalne jednadžbe stanja brodskog sinkronoga generatora



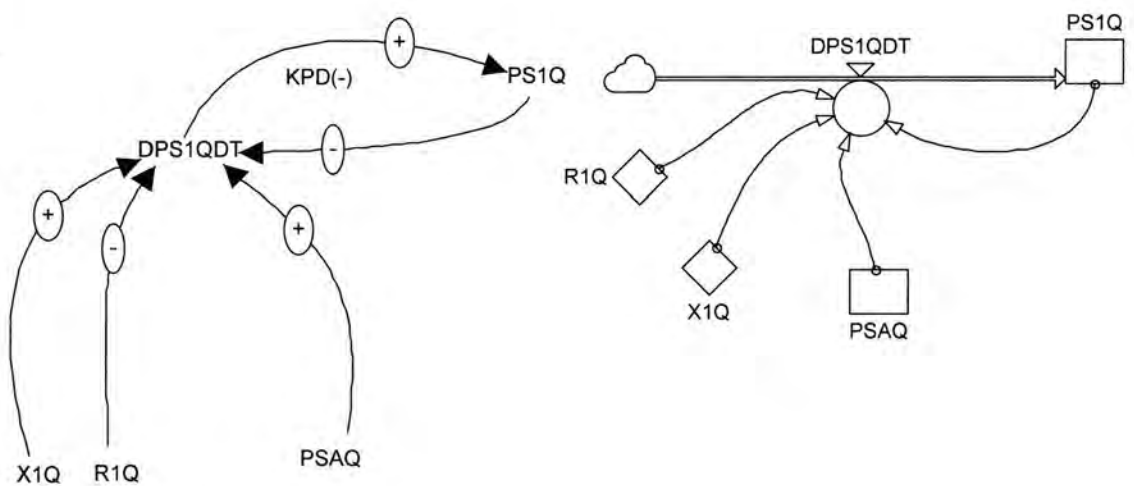
Sl. 38. Strukturni dijagram i dijagram toka druge diferencijalne jednačbe stanja brodskoga sinkronog generatora



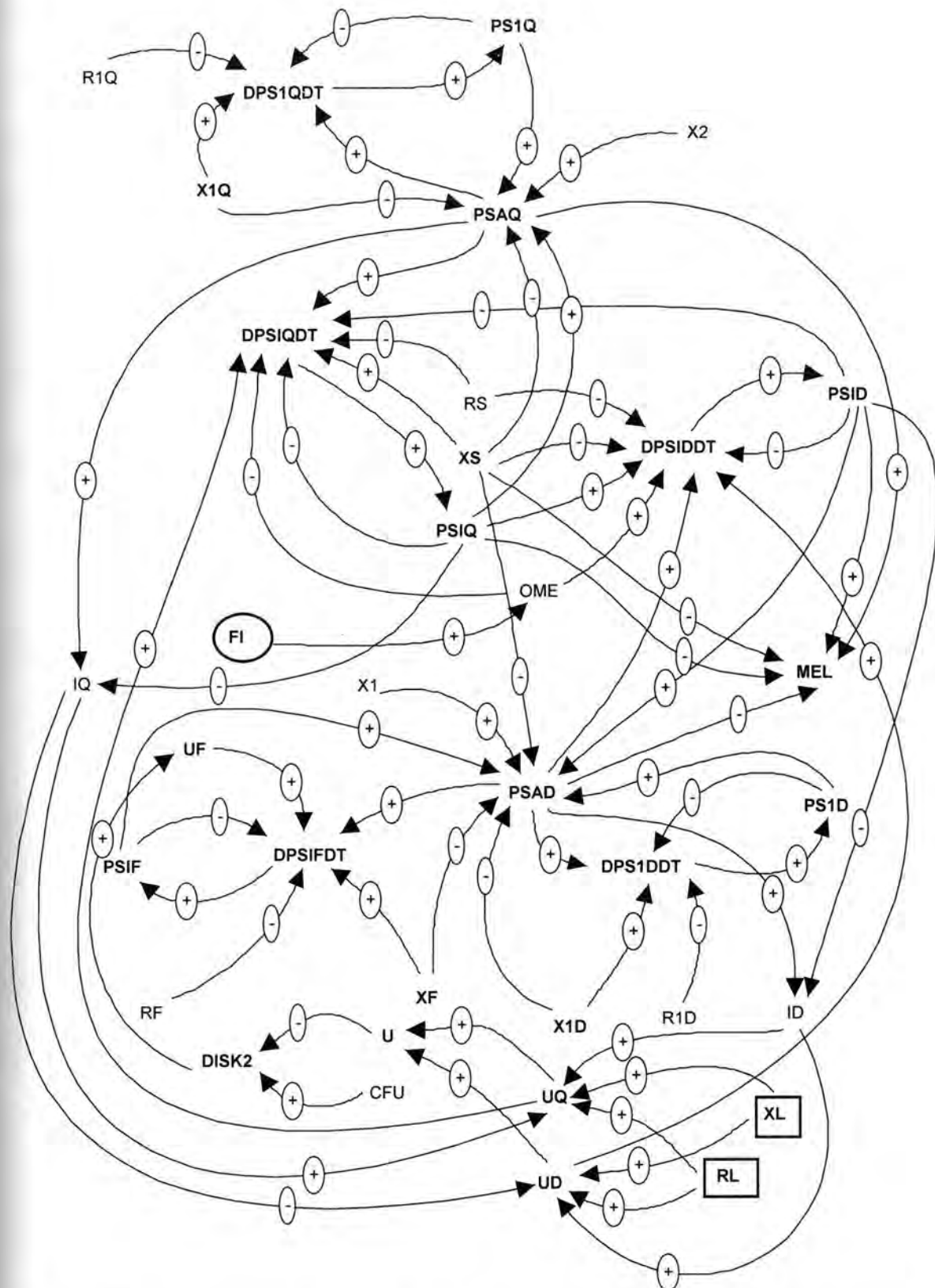
Sl. 39. Strukturni dijagram i dijagram toka treće diferencijalne jednačbe stanja brodskog sinkronog generatora



Sl. 40. Strukturni dijagram i dijagram toka četvrte diferencijalne jednačbe stanja broskog sinkronoga generatora



Sl. 41. Strukturni dijagram i dijagram toka pete diferencijalne jednačbe stanja broskog sinkronog generatora



Sl. 42. Globalni strukturalni dijagram brodskog sinkronog generatora s PID regulatorom

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

KPD 1.(-): DPSIDDT(+)=>PSID(-)=>DPSIDDT;

KPD 2.(-): DPSIQDT(+)=>PSIQ(-)=>DPSIQDT;

KPD 3.(-): DPSIFDT(+)=>PSIF(-)=>DPSIFDT;

KPD 4.(-): DPS1DDT(+)=>PS1D(-)=>DPS1DDT;

KPD 5.(-): DPS1QDT(+)=>PS1Q(-)=>DPS1QDT;

KPD 6.(-): U(-)=>DISK2(+)=>UF(+)=>DPSIFDT(+)=>PSIF(+)=>PSAD(+)=>ID(+)=>UQ(+)=>U;

KPD 7.(-): U(-)=>DISK2(+)=>UF(+)=>DPSIFDT(+)=>PSIF(+)=>PSAD(+)=>ID(+)=>UD(+)=>U;

KPD 8.(-): MEL(+)=>ALFAD(-)=>D2FIDT2(+)=>DFIDT(+)=>FI(+)=>OME(+)=>DPSIDDT(+)=>PSID(+)=>MEL;

KPD 9.(-): MEL(+)=>ALFAD(-)=>D2FIDT2(+)=>DFIDT(+)=>FI(+)=>OME(-)=>DPSIQDT(+)=>PSIQ(-)=>MEL;

KPD 10.(-): MEL(+)=>ALFAD(+)=>DALFADT(-)=>D2FIDT2(+)=>DFIDT(+)=>FI(+)=>OME(-)=>DPSIQDT(+)=>PSIQ(-)=>MEL;

KPD 11.(-): IQ(+)=>UQ(+)=>DPSIQDT(+)=>PSIQ(-)=>IQ;

KPD 12.(-): IQ(-)=>UD(+)=>DPSIDDT(+)=>PSID(-)=>DPSIQDT(+)=>PSIQ(-)=>IQ;

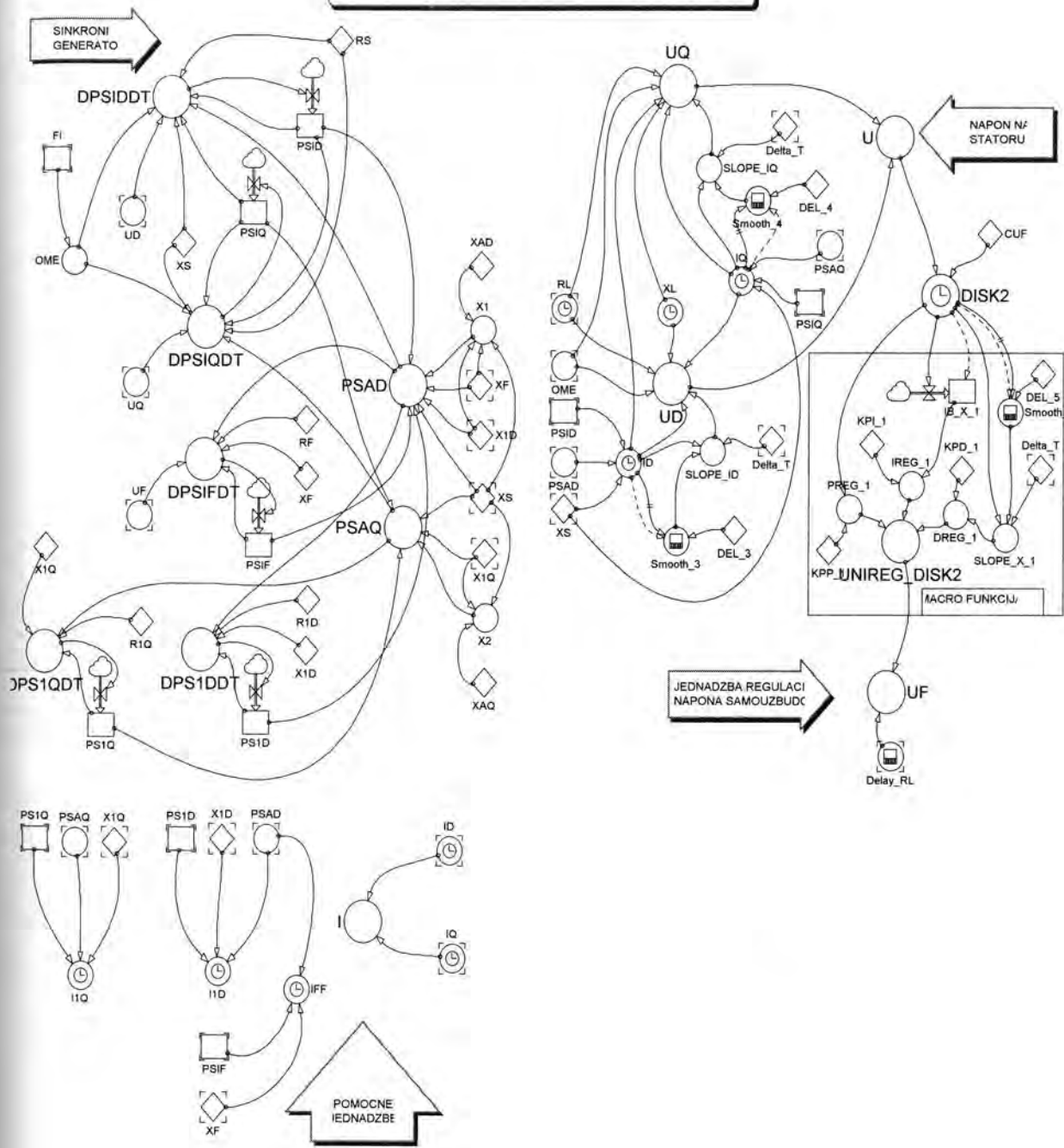
KPD 13.(-): ID(+)=>UD(+)=>DPSIDDT(+)=>PSID(-)=>ID;

KPD 14.(-): ID(+)=>UQ(+)=>DPSIQDT(+)=>PSIQ(+)=>DPSIDDT(+)=>PSID(-)=>ID;

KPD 15.(+): PSAQ(+)=>DPS1Q(+)=>PS1Q(+)=>PSAQ;

KPD 16.(+): PSAD(+)=>DPS1D(+)=>PS1D(+)=>PSAD;

SIMULACIJSKI MODEL BRODSKOG SINKRONOG GENERATORA



Sl. 43. Globalni dijagram toka broskog sinkronog generatora s ugrađenim PID regulatorom



#### 5.6.4. Kvantitativni simulacijski model brodskog sinkronog generatora

Simulacijski model brodskog sinkronog generatora u DYNAMO (verzija DYNAMO 4.0, Pugh- Roberts Associates, University of Toronto, 1996) simulacijskom jeziku s koeficijentima sustava (jednadžbi konstanti) dobivenih iz [23]:

```
* *****
* PRVA DIFERENCIJALNA JEDNADZBA STANJA SINKRONOG GENERATORA
* -----
R DPSIDDT.KL=((-RS*PSID.K)/XS)+PSIQ.K*OME.K+((RS*PSAD.K)/XS)+UD.K
*
L PSID.K=PSID.J+DT*DPSIDDT.JK
*
N PSID=0
*
C RS=1
*
A UD.K=ID.K*RE.K+XE.K*SLOPE(ID.K,DT)-XE.K*IQ.K*OME.K
*
A RE.K=STEP(150,0)+STEP(-140,150)+STEP(-9.5,200)+STEP(-.5,220)
*
A XE.K=STEP(1,150)+STEP(-1,200)
*
* .....
SAVE DPSIDDT,PSID,OME,UD,RE,XE
* *****
* DRUGA DIFERENCIJALNA JEDNADZBA STANJA SINKRONOG GENERATORA
* -----
R DPSIQDT.KL=-PSID.K*OME.K-((RS*PSIQ.K)/XS)+((RS*PSAQ.K)/XS)+UQ.K
*
L PSIQ.K=PSIQ.J+DT*DPSIQDT.JK
*
N PSIQ=0
*
A UQ.K=RE.K*IQ.K+XE.K*SLOPE(IQ.K,DT)+XE.K*ID.K*OME.K
*
* .....
SAVE DPSIQDT,PSIQ,UQ
* *****
* TRECA DIFERENCIJALNA JEDNADZBA STANJA SINKRONOG GENERATORA
* -----
R DPSIFDT.KL=(-(RF*PSIF.K)/XF)+((RF*PSAD.K)/XF)+UF.K
*
L PSIF.K=PSIF.J+DT*DPSIFDT.JK
*
N PSIF=0
*
C RF=1
*
* .....
SAVE DPSIFDT,PSIF
* *****
* CETVRTAB DIFERENCIJALNA JEDNADZBA STANJA SINKRONOG GENERATORA
* -----
R DPSIDDT.KL=(-(R1D*PSID.K)/X1D)+((R1D*PSAD.K)/X1D)
*
```

```

L PS1D.K=PS1D.J+DT*DPS1DDT.JK
*
N PS1D=0
*
C RID=1
*
* .....
SAVE DPS1DDT,PS1D
*****
* PETA DIFERENCIJALNA JEDNADZBA STANJA SINKRONOG GENERATORA
* -----
*
R DPS1QDT.KL=(-R1Q*PS1Q.K)/X1Q)+((R1Q*PSAQ.K)/X1Q)
*
L PS1Q.K=PS1Q.J+DT*DPS1QDT.JK
*
N PS1Q=0
*
C RIQ=1
* .....
SAVE DPS1QDT,PS1Q
*****
* PET POMOCNIH JEDNADZBI GENERATORA
* .....
* PRVA POMOCNA JEDNADZBA
* -----
*
A PSAD.K=X1*((PS1D.K/XS)+(PS1F.K/XF)+(PS1D.K/X1D))
*
C XAD=1
*
C XS=1
*
SAVE PSAD,PSAQ
* DRUGA POMOCNA JEDNADZBA
* -----
*
A PSAQ.K=X2*((PS1Q.K/XS)+(PS1Q.K/X1Q))
*
C XAQ=1
*
* TRECA POMOCNA JEDNADZBA
* -----
*
C XF=1
*
* CETVRTA POMOCNA JEDNADZBA
* -----
*
C X1D=1
*
* PETA POMOCNA JEDNADZBA
* -----
*
C X1Q=1
*
*
A OME.K=FI.K
*
A MEL.K=(PS1D.K*PSAQ.K-PS1Q.K*PSAD.K)/XS

```

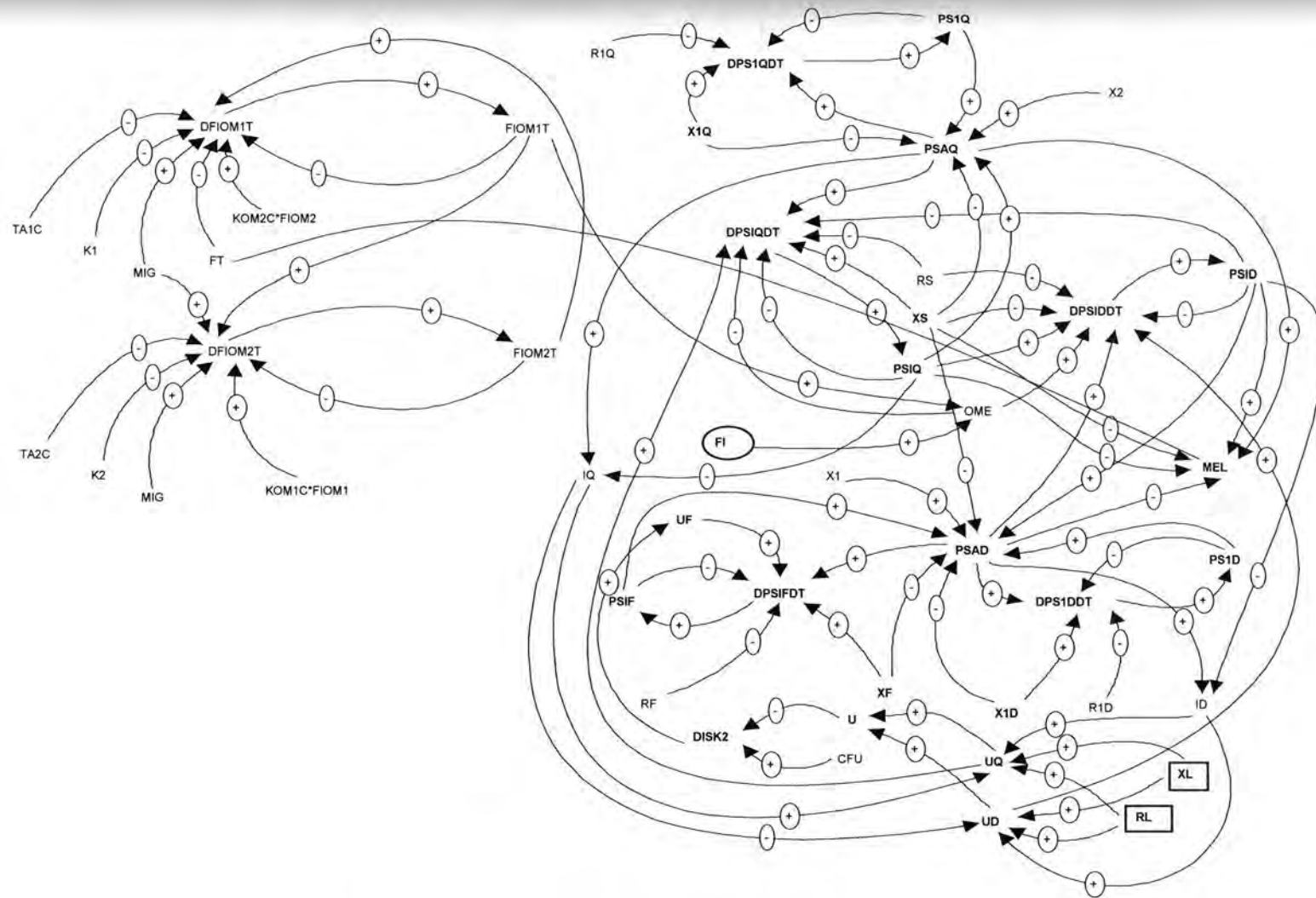
```

*-----
SAVE OME,MEL
* JEDNADZBA REGULACIJE NAPONA SAMOUZBUDOM PO SHEMI FAZNOG KOMPAUDIRANJA
*-----
*
A UF.K=CLIP(((RF+RK)/XAD)-(((RF+RK)*KI*KU.K*PSID.K)/(XAD*XS))-((RK*PSIF.K)/XF)^
+(((RF+RK)*KI*KU.K)/(XAD*XS))+RK/XF)*PSAD.K,0,TIME.K,100)
*
A KU1.K=(1-(KUMAX-KUMIN)*(U.K-1)/(UMAX-UMIN))*CLIP(1,0,U.K,1E-15+UMIN)^*
CLIP(1,0,UMAX,U.K)
*
A KU2.K=CLIP(KUMAX,0,UMIN,U.K)
*
A KU3.K=CLIP(KUMIN,0,U.K,UMAX)
*
A KU.K=KU1.K+KU2.K+KU3.K
*
A U.K=SQRT(UD.K*UD.K+UQ.K*UQ.K)
*
K KI=((RS+RN)*(RS+RN)/(XQ+XN))+XD+XN-SQRT(1+(RS+RN)*(RS+RN)/((XQ+XN)*(XQ+XN)))
*
C RK=1
*
C KUMAX=1.04
*
C KUMIN=.965
*
C UMAX=1.05
*
C UMIN=0.95
*
C RN=1
*
C XN=1
*
C XQ=1
*
C XD=1
*
C XK=1
*
K X1=1/((1/XAD)+(1/XS)+(1/XF)+(1/X1D))
*
K X2=1/((1/XAQ)+(1/XS)+(1/X1Q))
*
SAVE UF,KU1,KU2,KU3,KU,U,KI,X1,X2
*-----
SAVE KU,U
* *****
* POMOCNE JEDNADZBE
*
A ID.K=CLIP(-(PSID.K-PSAD.K)/XS,0,TIME.K,100)
*
A IQ.K=CLIP(-(PSIQ.K-PSAQ.K)/XS,0,TIME.K,100)
*
A IK=SQRT(ID.K*ID.K+IQ.K*IQ.K)
*
A IF.K=CLIP((PSIF.K-PSAD.K)/XS,0,TIME.K,100)
SAVE ID,IQ,IF,I

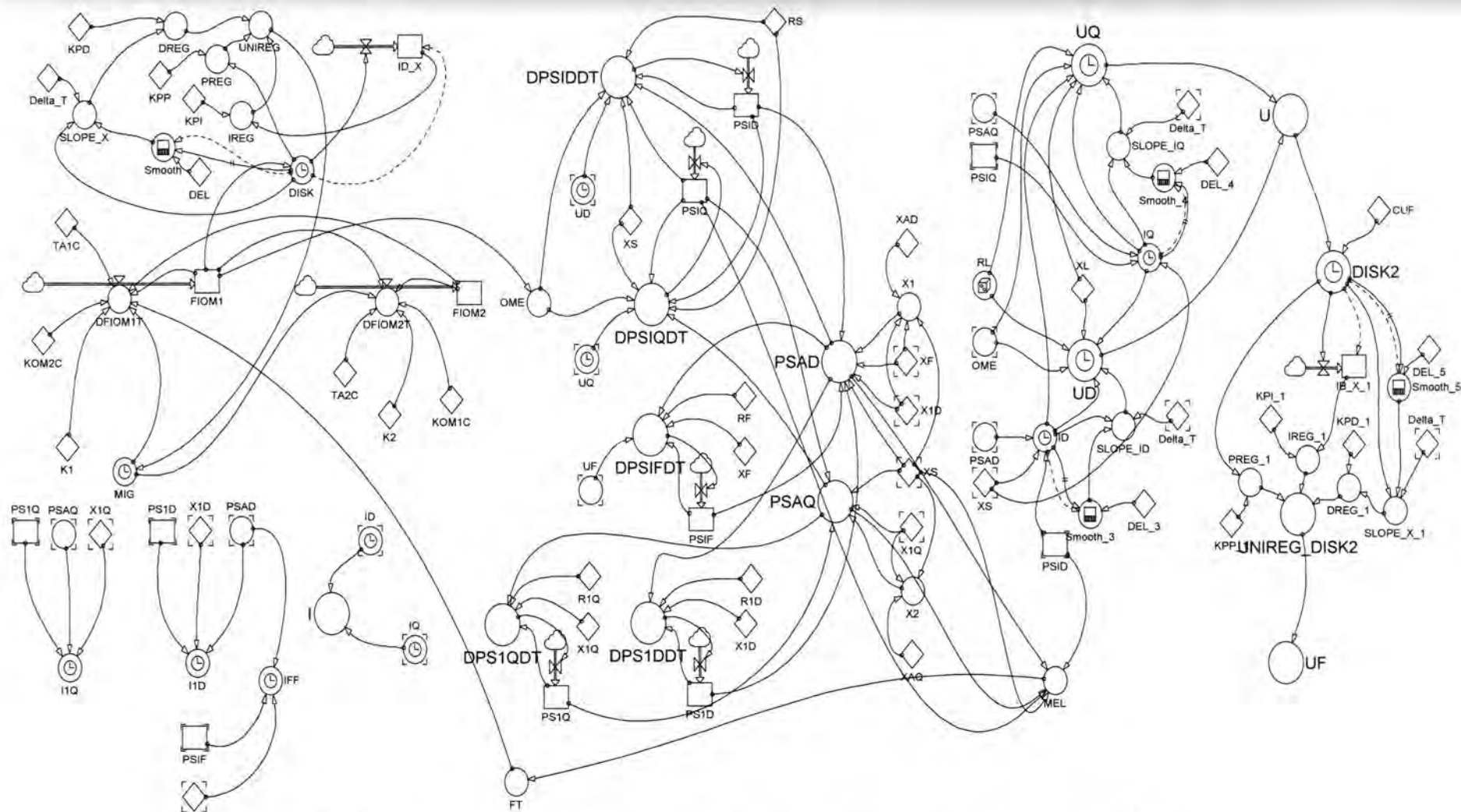
```

## **5.7. Globalni strukturni dijagram i dijagram toka brodskog plinskog turbogeneratora**

Na temelju izrađenih pojedinačnih modela brodskog plinskog turbogeneratorskoga sustava na slici 44. i slici 45. prikazan je globalni sustav-dinamički strukturni dijagram i dijagram toka u POWERSIM (POWERSIM Version 2.5c, Norway, 1996) simulacijskom jeziku.



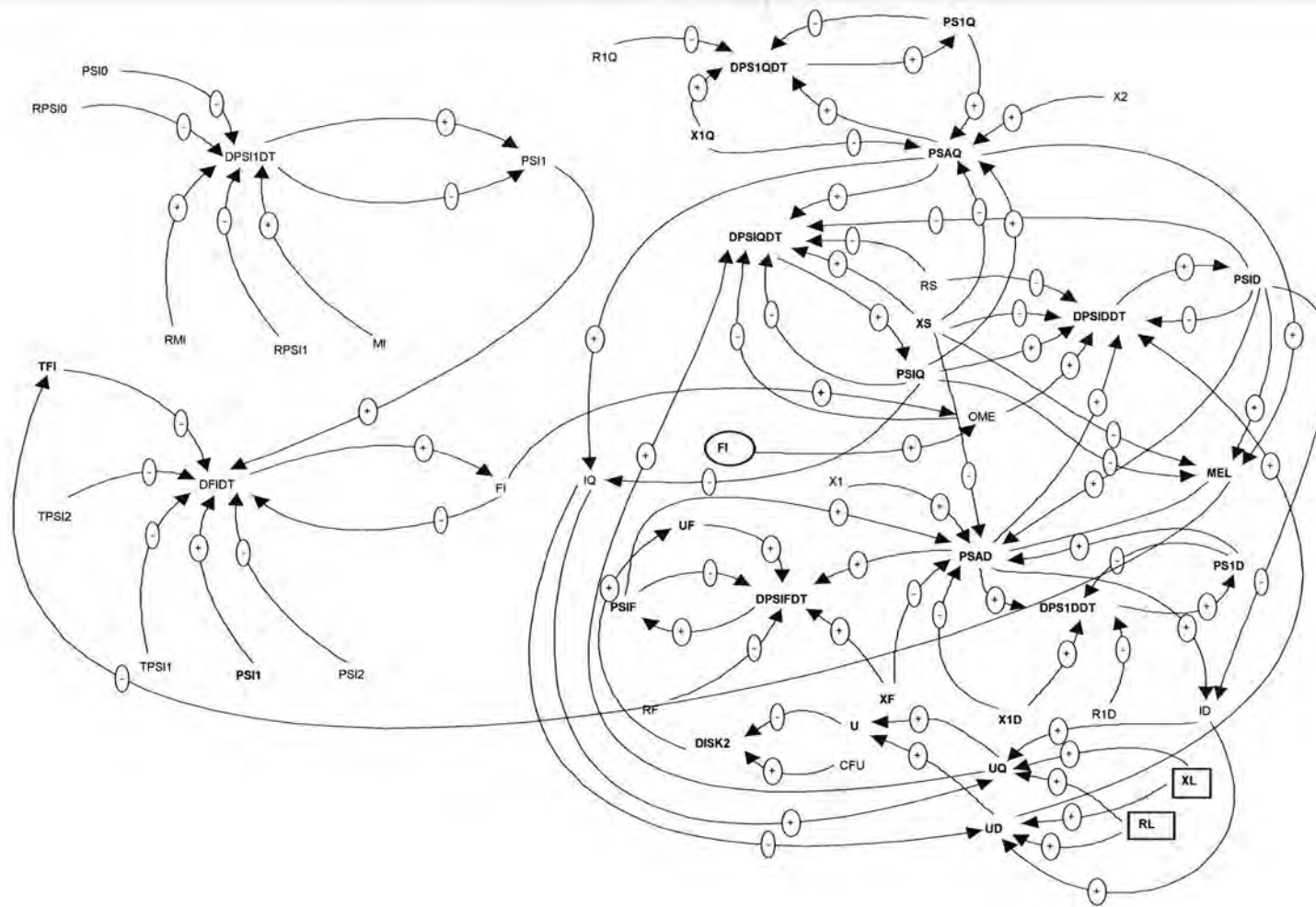
Sl. 44. Globalni strukturni dijagram brodskog plinskog turbogeneratorskoga sustava



Sl. 45. Globalni dijagram toka brodskog plinskog turbogeneratorskoga sustava s ugrađenim PID regulatorima u POWERSIM simulacijskom jeziku

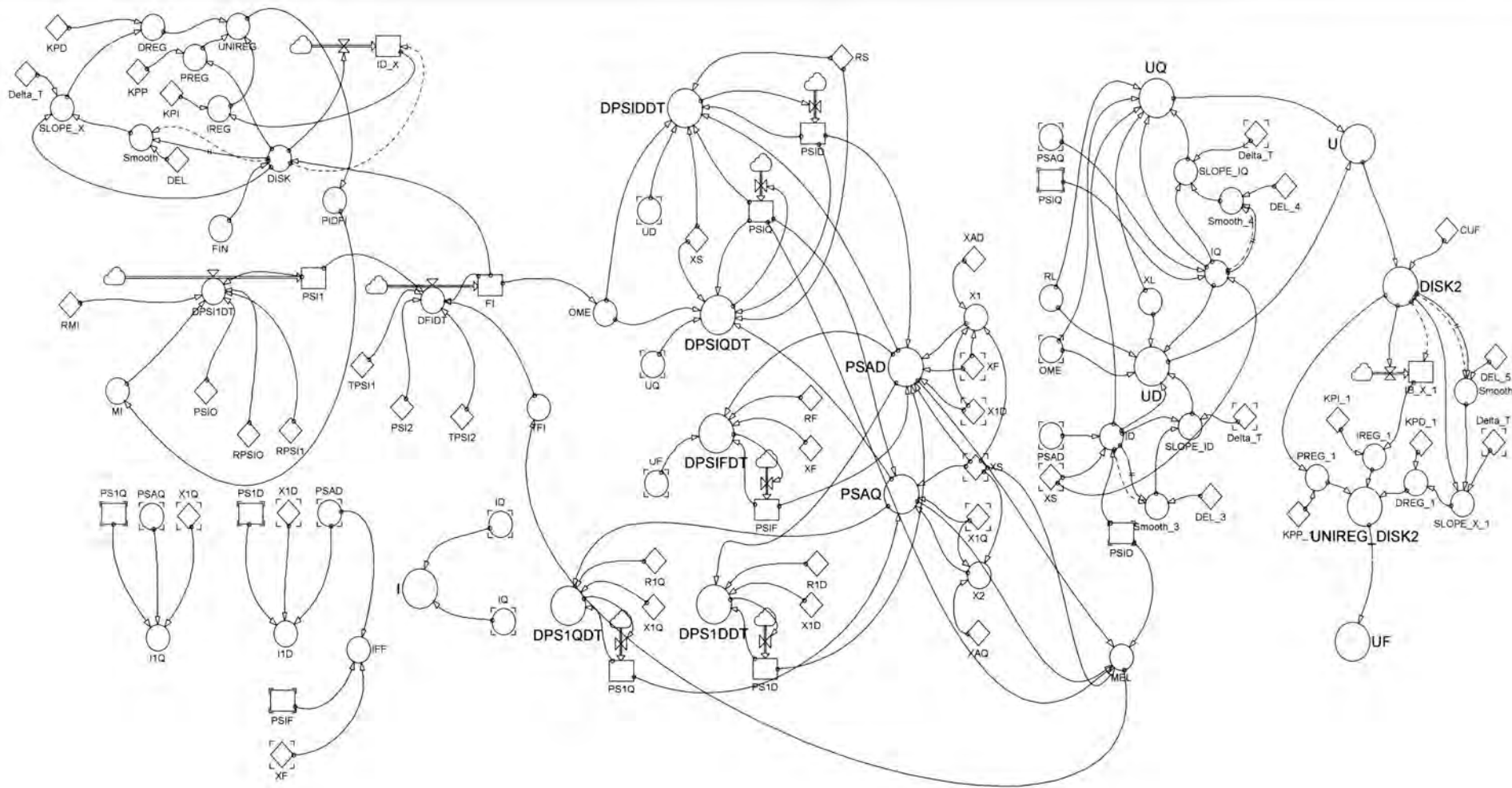
### **3. Globalni strukturni dijagram i dijagram toka brodskog parnog turbogeneratorskoga**

Na temelju izrađenih pojedinačnih modela brodskog parnog turbogeneratorskoga sustava na slici 46. i slici 47. prikazan je globalni sustav-dinamički strukturni dijagram i dijagram toka u POWERSIM (POWERSIM Version 2.5c, Norway, 1996) simulacijskom programu.



Sl. 46. Globalni strukturalni dijagram brodskog parnog turbogeneratorskoga sustava





Sl. 47. Globalni dijagram toka brodskog parnog turbogeneratorskoga sustava s ugrađenim

PID regulatorima u POWERSIM simulacijskom jeziku

## 6. ISTRAŽIVANJE DINAMIKE PONAŠANJA MODELA TURBINSKOG POGONA SINKRONOG GENERATORA S PRIMJENOM HEURISTIČKE OPTIMIZACIJE

Važno je napomenuti, radi grafičkog prikaza promijene varijabli, da:

- Pod pojmom relativna nominalna vrijednost varijable podrazumijevamo: *omjer (nominalne-stvarne) vrijednosti varijable po nominalnoj vrijednosti varijable, pa važi za sve relativne nominalne vrijednosti, varijable da u tom slučaju imaju jediničnu vrijednost, tj. jednaki su jedinici.*
- Pod pojmom nominalna vrijednost varijable podrazumijevamo: *nominalnu proračunsku vrijednost varijabli za slučaj proračunskog nominalnog pogonskog stanja.*

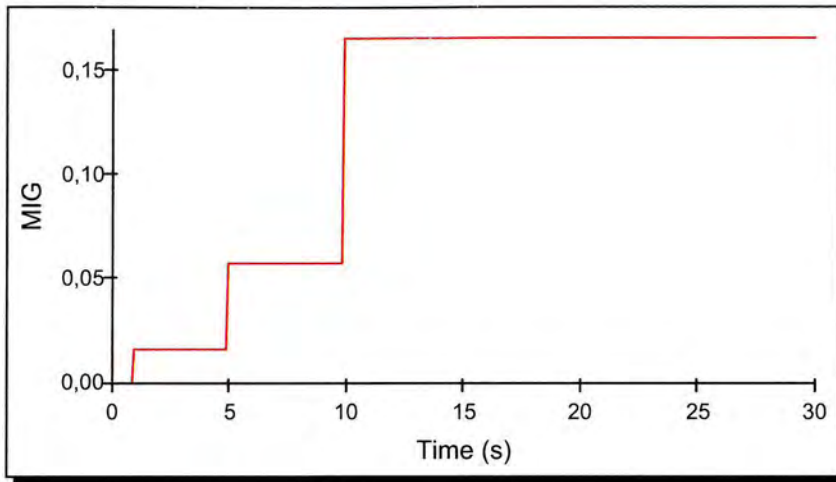
### 6.1. Simulacijski scenariji rada brodske plinske turbine

#### Scenarij I.

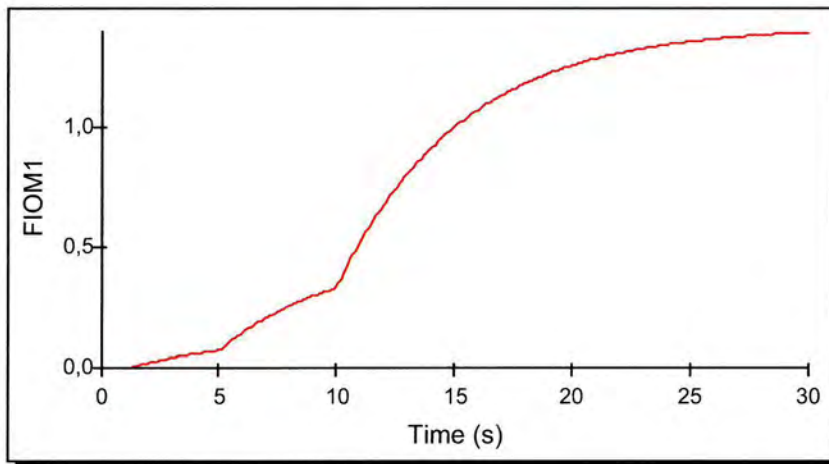
Dinamička analiza rezultata modeliranja ukazuje na sljedeće ponašanje varijabli:

- 1) Relativna promjena potrošnje goriva (MIG) ima tri skokovita stupnja jer se plinska turbina mora barem u tri ciklusa postupno zalijetanje prema nominalnom broju okretaja radi jednolikog zagrijavanja.
- 2) Kao odziv na ovakav dovod goriva uočavamo postupni rast broja okretaja prve i druge osovine koji ima eksponencijalni konvergirajući karakter.
- 3) Poslije perioda zalijetanja, turbina postiže nominalni broj okretaja u neopterećenom stanju - bez generatora.

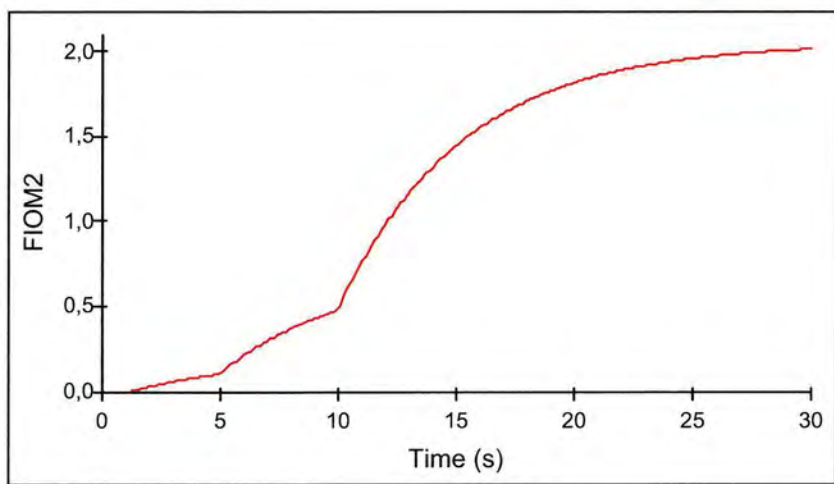
Grafički rezultati simulacije:



Sl. 48. Relativna promjena potrošnje goriva



Sl. 49. Relativna kutna brzina prve osovine



Sl. 50. Relativna kutna brzina druge osovine.

Zalet turbine je izveden trostupanjski, što znači da:

U TIME = 1 sekundi ubrzavamo turbinu dovođenjem goriva, na 10% nominalnog broja okretaja ( $n= 3000$  ok/min).

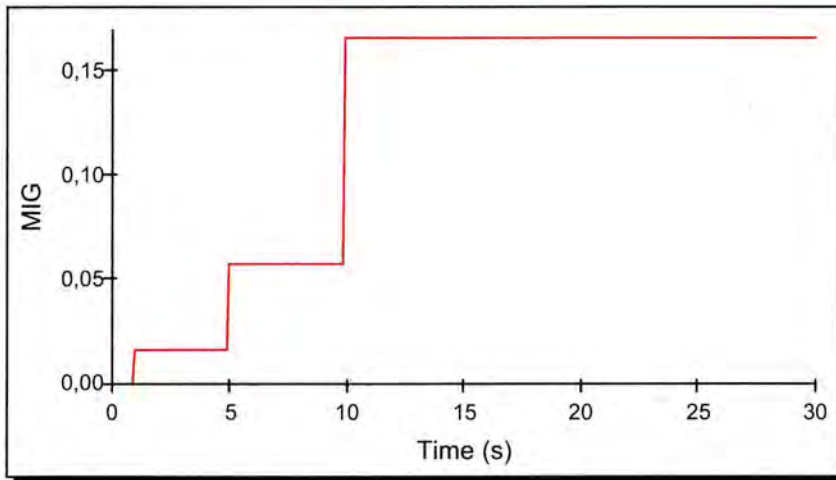
U TIME = 5 sekunda skokovito povećavamo potrošnju goriva na 35% nominalnog broja okretaja.

U TIME = 10 sekunda skokovito povećavamo dovod goriva kako bi se turbina jednoliko zagrijala, odnosno postigla nominalni broj okretaja.

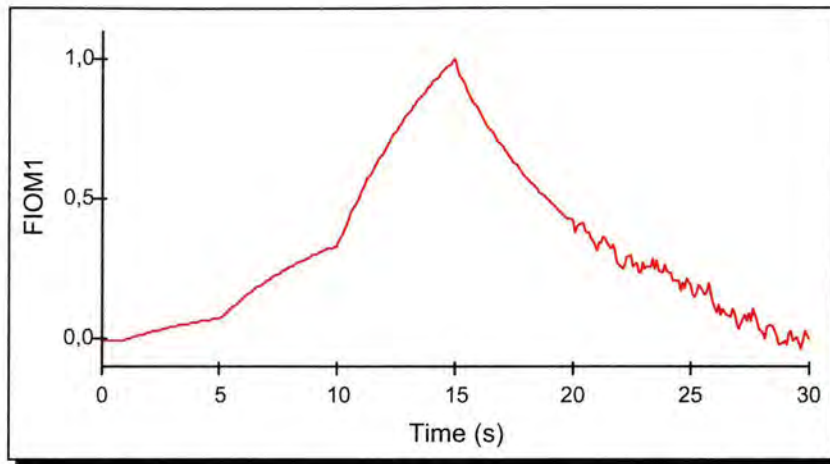
## Scenarij II.

Poslije zaleta turbine u praznom hodu simulirano je udarno opterećenje, a poslije i stohastičko opterećenje. Imajući u vidu da turbina nema povratni regulator broja okretaja, dolazi do usporavanja i ubrzavanja osovina turbine (zavisno o promjene opterećenja) jer je dovod goriva ostao isti kao u praznom hodu.

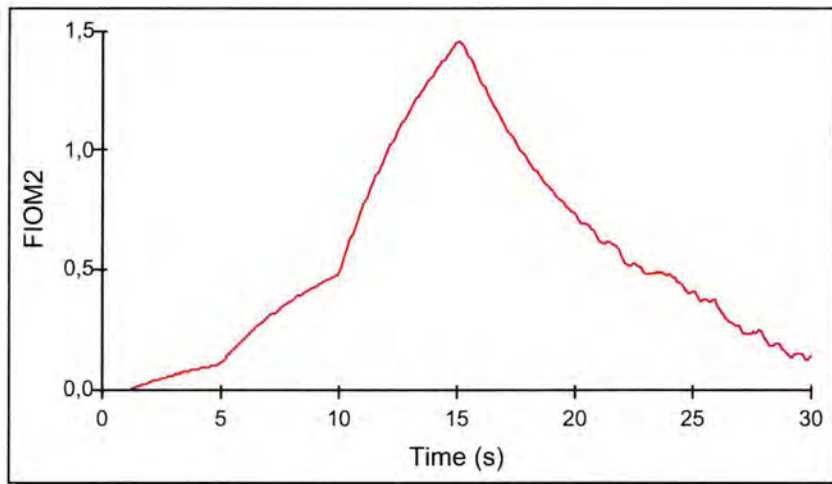
Grafički rezultati simulacije:



Sl. 51. Relativna promjena potrošnje goriva



Sl. 52. Relativna kutna brzina prve osovine



Sl. 53. Relativna kutna brzina druge osovine

Zalet turbine je izveden trostupanjski, što znači da:

U TIME = 1 sekundi ubrzavamo turbinu dovođenjem goriva na 10% nominalnog broja okretaja ( $n = 3000$  ok/min).

U TIME = 5 sekunda skokovito povećavamo potrošnju goriva na 35% nominalnog broja okretaja.

U TIME = 10 sekunda skokovito povećavamo dovod goriva kako bi se turbina jednoliko zagrijala, odnosno postigla nominalni broj okretaja.

U TIME = 15 sekunda pojavljuje se udarno opterećenje, što znači da je  $F(t) = 0.5$ .

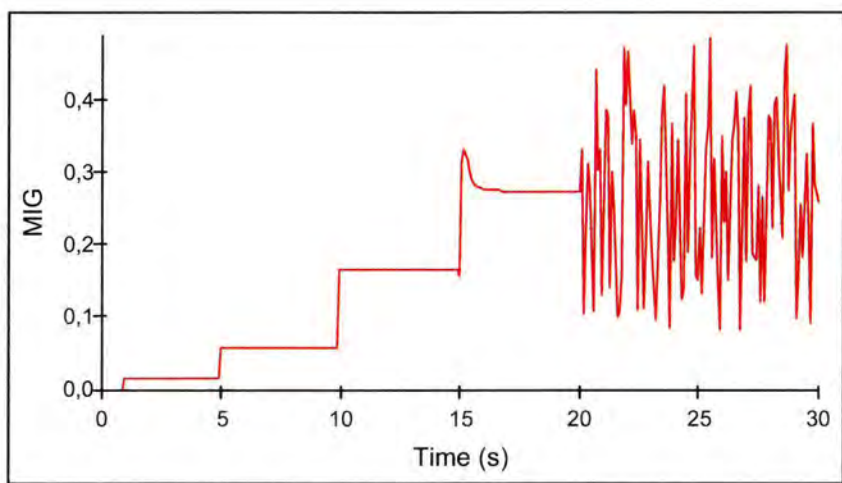
U TIME = 20 sekunda pojavljuje se stohastičko opterećenje turbine

### Scenarij III.

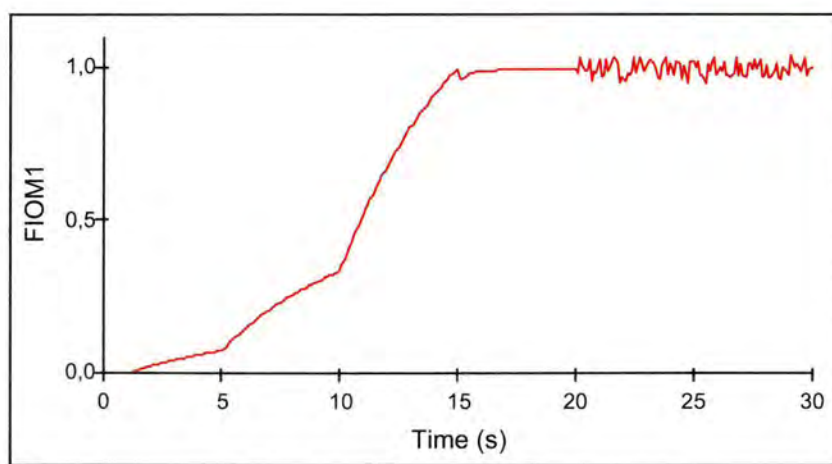
Prema ovom scenariju, poslije zaleta u praznom hodu, uključeno je djelovanje povratnog regulatora čiji je ulazni podatak nominalni broj okretaja za obje osovine i koji se uspoređuje s stvarnim stanjem. Ta razlika (diferencija) se propušta kroz PID regulator koji daje upravljački impuls dovedu goriva.

Parametri PID regulatora, dobiveni primjenom heurističke optimizacije, su  $KPP=5$ ,  $KPI=4$ .

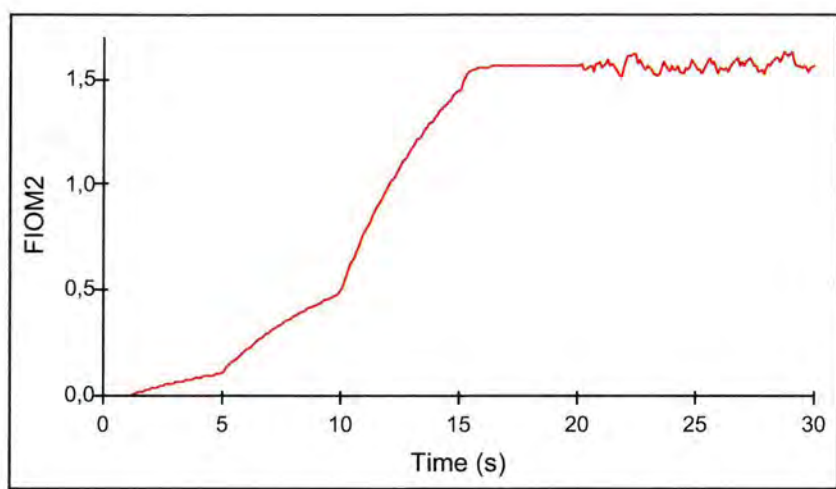
Grafički rezultati simulacije:



Sl. 54. Relativna promjena potrošnje goriva



Sl. 55. Relativna kutna brzina prve osovine



Sl. 56. Relativna kutna brzina druge osovine

Zalet turbine je izveden trostupanjski, što znači da:

U TIME = 1 sekundi ubrzavamo turbinu dovođenjem goriva na 10% nominalnog broja okretaja ( $n = 3000$  ok/min).

U TIME = 5 sekunda skokovito povećavamo potrošnju goriva na 35% nominalnog broja okretaja.

U TIME = 10 sekunda skokovito povećavamo dovod goriva kako bi se turbina jednoliko zagrijala, odnosno postigla nominalni broj okretaja.

U TIME = 15 sekunda pojavljuje se udarno opterećenje, što znači da je  $F(t) = 0.5$ , a istovremeno se uključuje u rad PID regulator.

U TIME = 20 sekunda pojavljuje se stohastičko opterećenje turbine.

## 6.2. Simulacijski scenariji rada brodske parne turbine

### Scenarij I.

U ovom scenariju prikazan je zalet i zaustavljanje brodske parne turbine i to bez djelovanja PID regulatora.

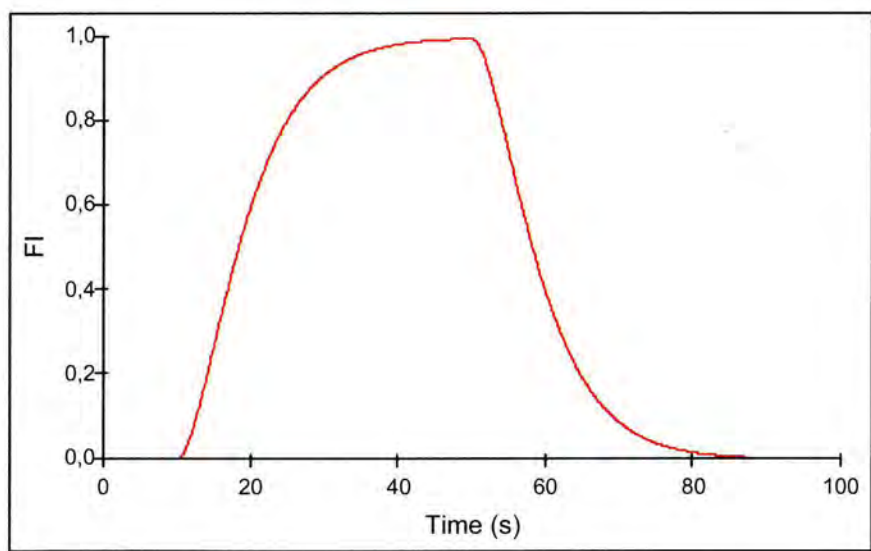
Scenarij će se odvijati na sljedeći način:

1. U vremenu  $TIME = 10$  sekunda otvaramo manevarski ventil parne turbine na nominalni otvor ((MI+STEP(1,10))).

*Otvaranjem manevarskog ventila, raste relativni prirast pare u parni volumen i dolazi do procesa pretvorbe energije u parnoj turbini, a kao posljedica toga raste relativni prirast kutne brzine rotora (FI), tj. dolazi do okretanja rotora turbine do nominalnog broja okretaja.*

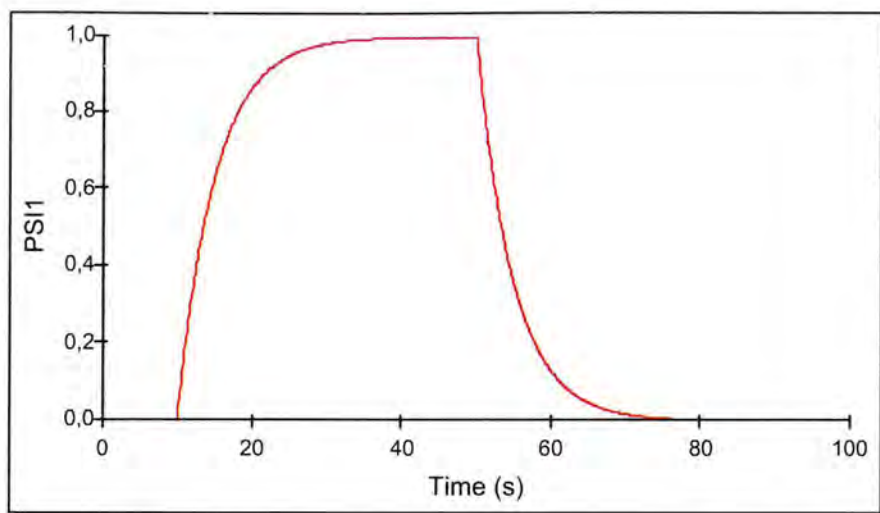
2. U vremenu  $TIME = 50$  sekunda zatvaramo manevarski ventil parne turbine, tj. zatvaranje dobave pare u parni volumen i na taj način zaustavljamo rad turbine.

Grafički rezultati simulacije:



Sl. 57. Relativna kutna brzina rotora





Sl. 58. Relativni prirast tlaka pare u parnom volumenu

Pređoćeni scenarij, zapravo, pokazuje nam relativno "opasnu" fazu upućivanja brodske parne turbine. Naime, brodska parna turbina mora se upućivati u više faza, a ne u jednoj fazi kao u našem slučaju. Upućivanje smo vršili kada je turbina opterećena momentom otpora i pogonskim momentom i to otvaranjem regulacijskog (manevarskog) ventila na nominalnu vrijednost u 10 sekundi. U scenariju nismo predvidjeli regulaciju povratnom vezom, već je simulirana dinamika ponašanja jednadžbi stanja, po parnom volumenu i po dinamici rotora. Slično se vršilo i kod zaustavljanja parne turbine. Naime, zatvaranjem regulacijskog (manevarskog) ventila zaustavljen je dotok pare u parni volumen turbine.

Scenarij potvrđuje očekivano stanje brodske parne turbine. Zaletom turbine relativni prirast kutne brzine, tj. broj okretaja FI eksponencijalno je rastao prema nominalnoj vrijednosti, koju nije uspio postići jer smo u 50 sekundi zatvorili dovod pare, tako da je krivulja zatvaranja analogna krivulji zaleta, što se unaprijed i očekivalo.

## Scenarij II.

U ovom scenariju prikazan je zalet (pokretanje) brodske parne turbine, i to u dvije faze:

1. Otvara se manevarski ventil brodske parne turbine na 5% nominalnog otvora u vremenskom trenutku  $TIME = 10$  sekunda. Sve do 50 sekunde 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.

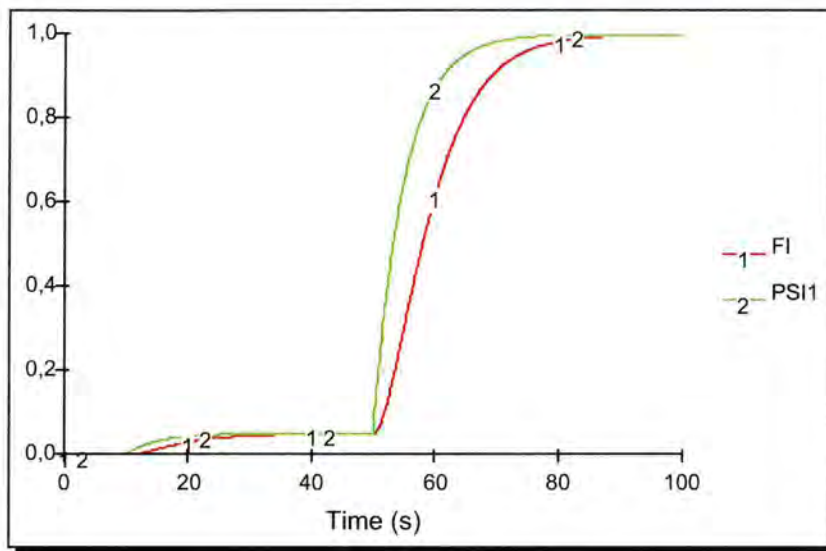
U vremenu  $TIME = 10$  sekunda započinje rasti relativni prirast tlaka pare u parni volumen (PSI1) i relativni prirast kutne brzine rotora brodske parne turbine (FI).

Brodska parna turbina, u ovom scenariju, opterećena je:

- momentom otpora (trenje u ležajevima i sl.) -  $M_C$  (TFI)
  - pogonskim momentom  $M_D$  (TFI, TPSI1, TPSI2),
- dakle, bez opterećenja  $M_N$  radnog stroja, tj. generatora.

U ovom scenariju PID regulator nema utjecaj na upuštanje brodske parne turbine jer su njegovi parametri:  $KPP = 0$ ,  $KPD = 0$  i  $KPI = 0$ .

Grafički rezultati simulacije:



Sl. 59. Relativna kutna brzina rotora FI i relativni prirast tlaka pare u parnom volumenu PSI1

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. Međutim, u ovom scenariju nije ugrađeno djelovanje elektronskog PID regulatora.

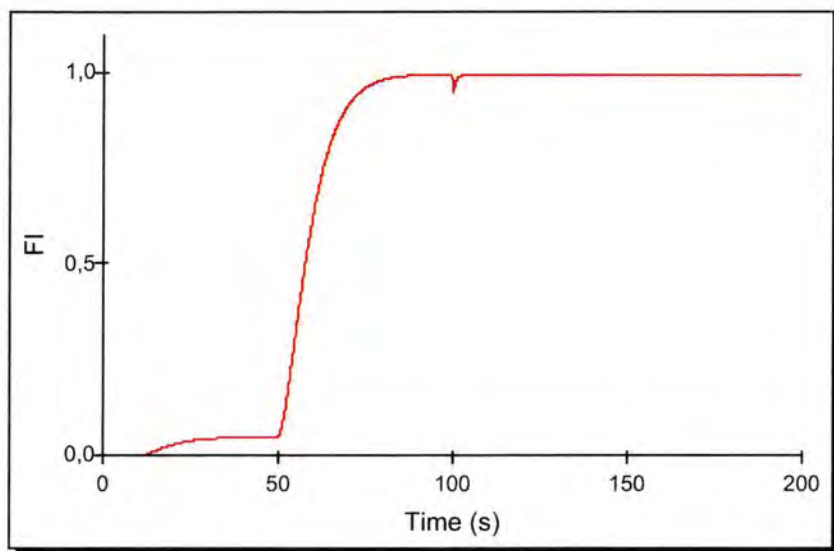
### Scenarij III.

U ovom scenariju prikazan je zalet (pokretanje) i skokovito opterećenje brodske parne turbine s ugrađenim i optimiranim PID regulatorom i to na sljedeći način:

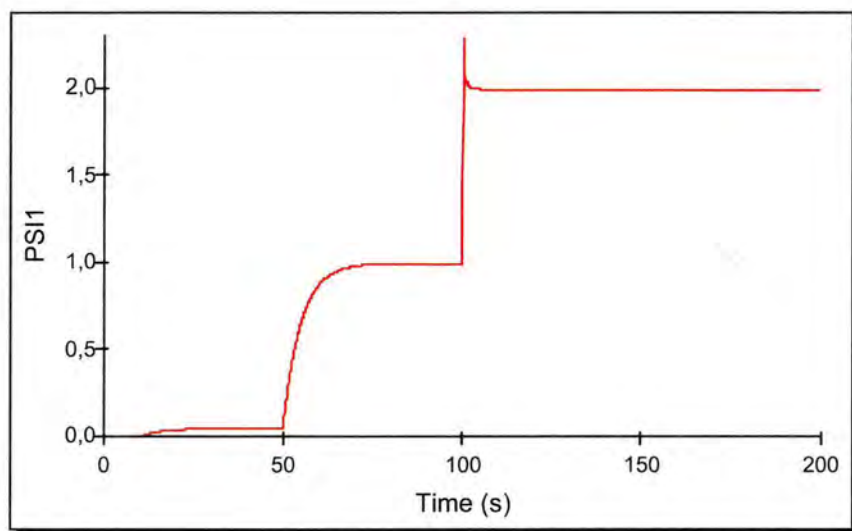
1. Zalet (pokretanje) vrši se kao i scenariju II.
2. U vremenskom trenutku TIME = 100 sekunda vršimo skokovito opterećenje turbine do 50% nominalnog opterećenja (TFI=5-STEP(2.5,100)) smanjivanjem vremenske konstante rotora turbine.
3. Kao i u scenariju II. i ovdje smo ugradili elektronski PID regulator, međutim s nizom scenarija, odnosno metodom heurističke optimizacije dobiveni su parametri regulatora, i to:

KPP = 100, KPI = 0.1 i KPD = 100.

Grafički rezultati simulacije:



Sl. 60. Relativna kutna brzina rotora FI



Sl. 61. Relativni prirast tlaka pare u parnom volumenu PS11

Scenarij pokazuje da će uz odabir koeficijenata univerzalnog PID regulatora ( $K_{PP} = 100$ ,  $K_{PI} = .1$ ,  $K_{PD} = 100$ ) vrlo brzo doći do stabilizacije prijelazne pojave u granicama dozvoljenih odstupanja brzine okretanja rotora brodske parne turbine (oko 4% nominalnog broja okretaja).

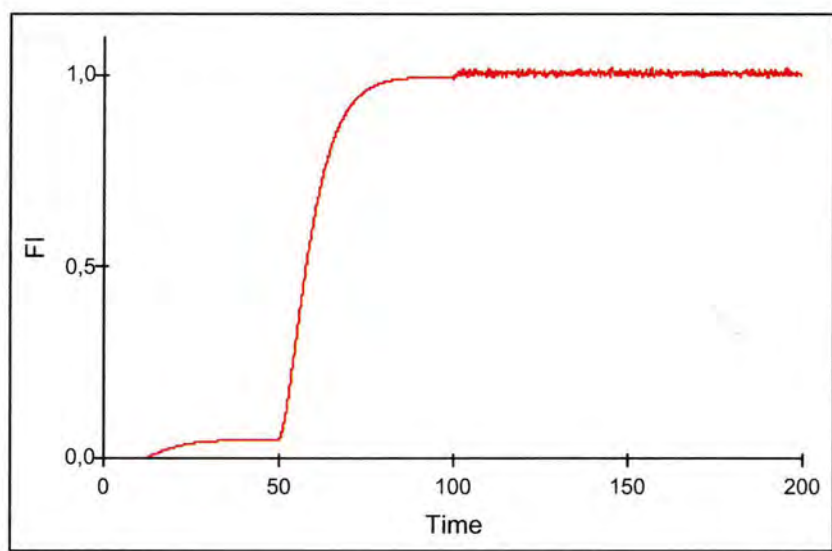
#### Scenarij IV.

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

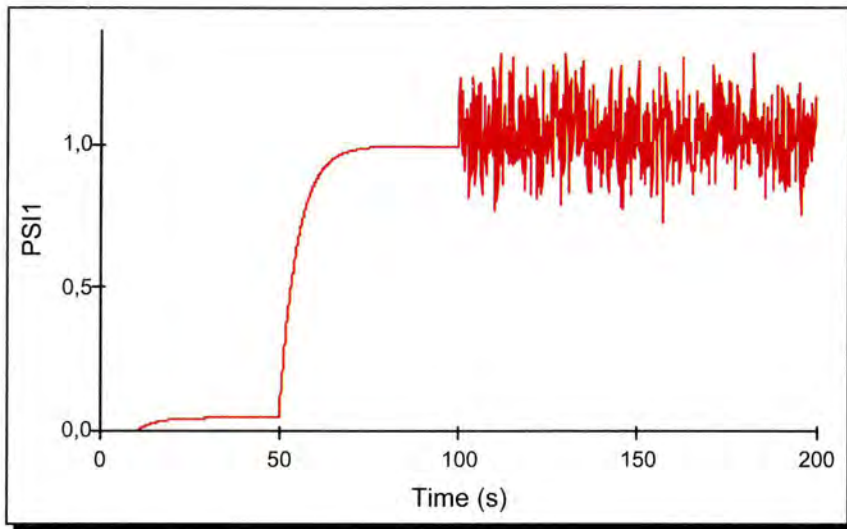
$$TFI.K=STEP(2.5,100)*(1-NOISE())$$

3. Ugrađen je elektronski PID regulator parametara: KPP = 100, KPI= .1 i KPD = 100.

Grafički rezultati simulacije:



Sl. 62. Relativna kutna brzina rotora FI



Sl. 63. Relativni prirast tlaka pare u parnom volumenu PSI1

Navedeni je slučaj po svemu identičan prethodnom scenariju, uz to što je, osim skokovitog opterećenja od 50% nominalnog, simulirano i stohastičko ponašanje.

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.

### 6.3. Simulacijski scenariji brodskog plinskog turbogeneratorsa

#### 6.3.1. Scenarij zaleta brodske plinske turbine u praznom hodu, te priključivanja generatora u praznom hodu.

U ovom scenariju zalet turbine izveden je trostupanjski, što znači da u TIME = 1 sekundi ubrzavamo turbinu dovođenjem goriva, na 10% nominalnog broja okretaja, u TIME = 5 sekundi skokovito povećavamo potrošnju goriva na 35% nominalnog broja okretaja, a u TIME = 10 skokovito povećavamo dovod goriva kako bi se turbina "jednoliko" zagrijala, tj. postigla nominalan broj okretaja.

U TIME = 20 uključujemo u rad PID regulator, a u TIME = 30 počinje uzbuđivanje generatora.

Karakteristične jednađbe u DYNAMO jeziku za ovaj scenarij su:

A MIG.K=STEP(.1/6,1)+STEP(.25/6,5)+STEP(.45/6,10)+STEP(PIDREG.K,20)

A UD.K=CLIP(RE.K\*ID.K+XE\*SLOPE(ID.K,DT)+XE\*IQ.K\*OME.K,0,TIME.K,30)

RL.K=1

A UQ.K=CLIP(RE.K\*IQ.K+XE\*SLOPE(IQ.K,DT)+XE\*ID.K\*OME.K,0,TIME.K,30)

A UF.K=UNIREG(DISK1.K,KPP1,KPI1,KPD1)

A DISK1.K=CLIP(1-U.K,0,TIME.K,30)

C KPP=1

C KPI=1

C KPD=0

C KPP1=.6

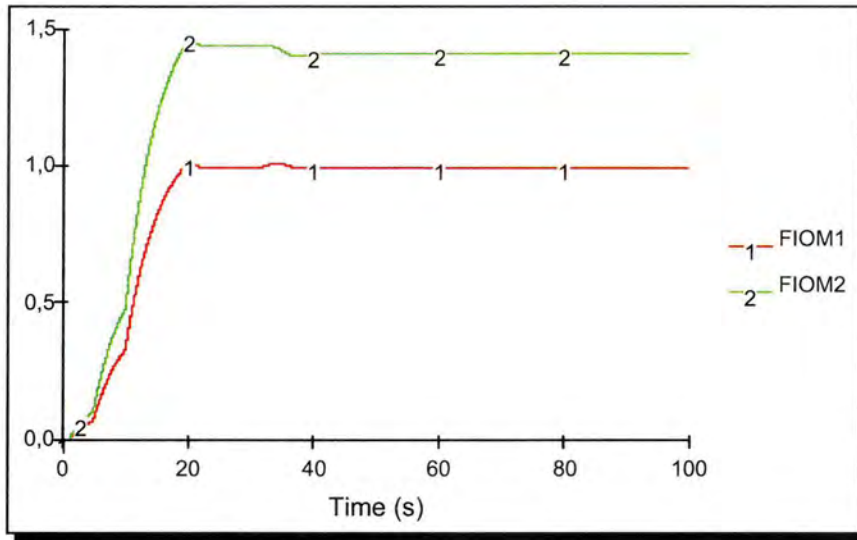
C KPI1=0

C KPD1=.1

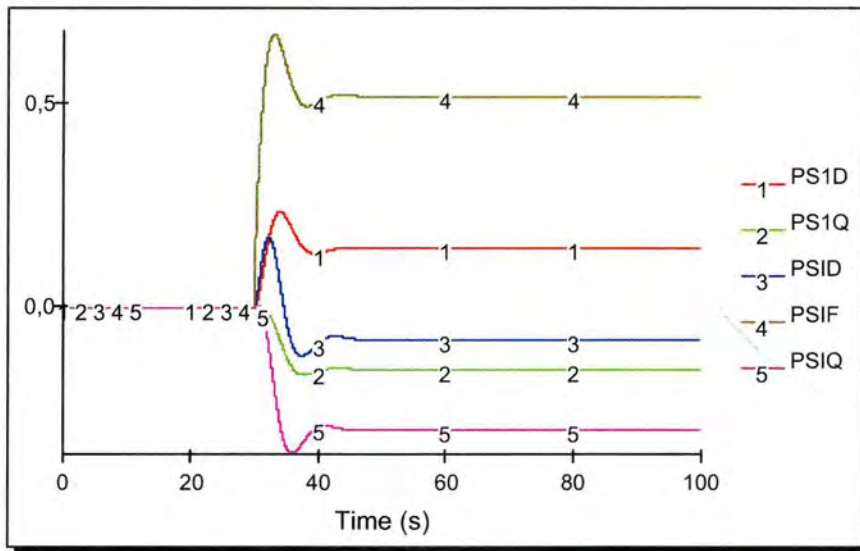
A ID.K=CLIP(-(PSID.K-PSAD.K)/XS,0,TIME.K,30)

A IQ.K=CLIP(-(PSIQ.K-PSAQ.K)/XS,0,TIME.K,30)

Grafički rezultati simulacije:

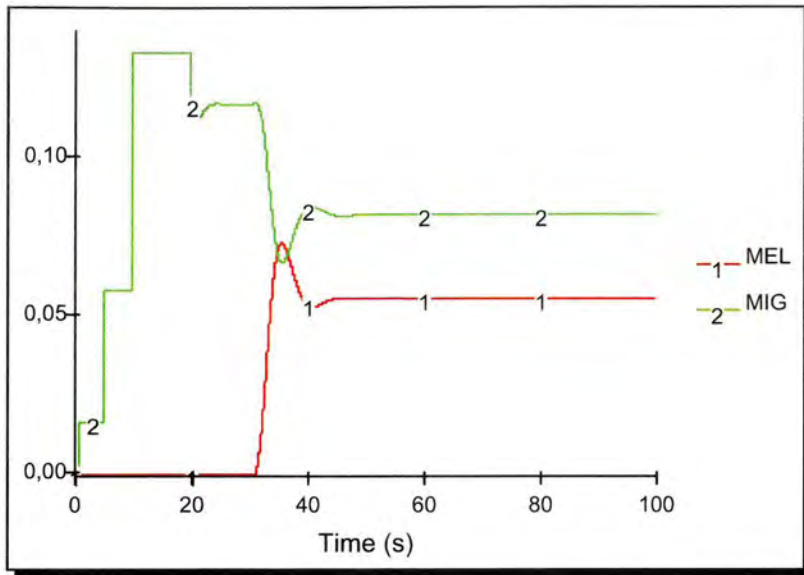


Sl. 64. Relativna kutna brzina prve osovine F1OM1 i druge osovine F1OM2

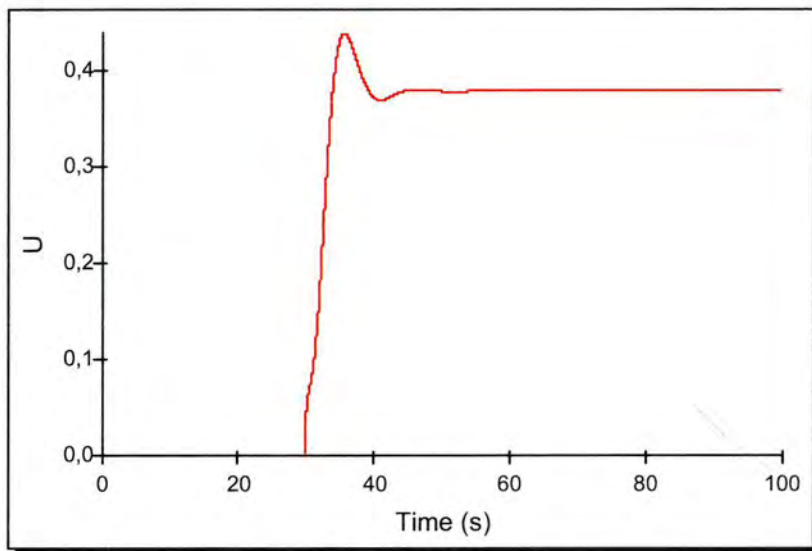


Sl. 65. Ulančani tokovi brodskog sinkronog generatora

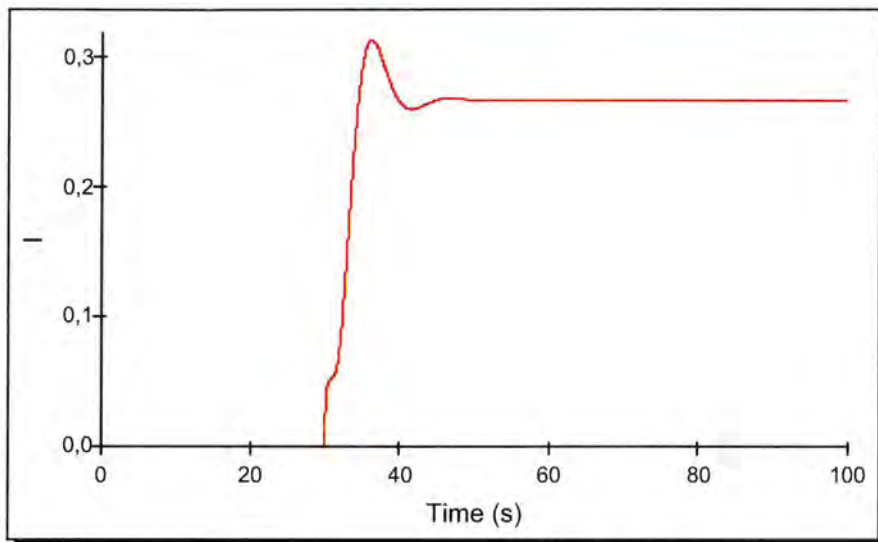




Sl. 66. Relativna promjena potrošnje goriva MIG i električni moment generatora MEL



Sl. 67. Napon na konturama statora generatora



Sl. 68. Ukupna jakost struje

Nakon zaleta turbine u praznom hodu uključujemo u rad PID - regulator koji djelovanjem na dovod goriva dovodi broj okretaja turbine na nominalnu vrijednost. Uključenjem sinkronog generatora dolazi do porasta potrošnje goriva dok se broj okretaja obaju vratila relativno malo mijenja.

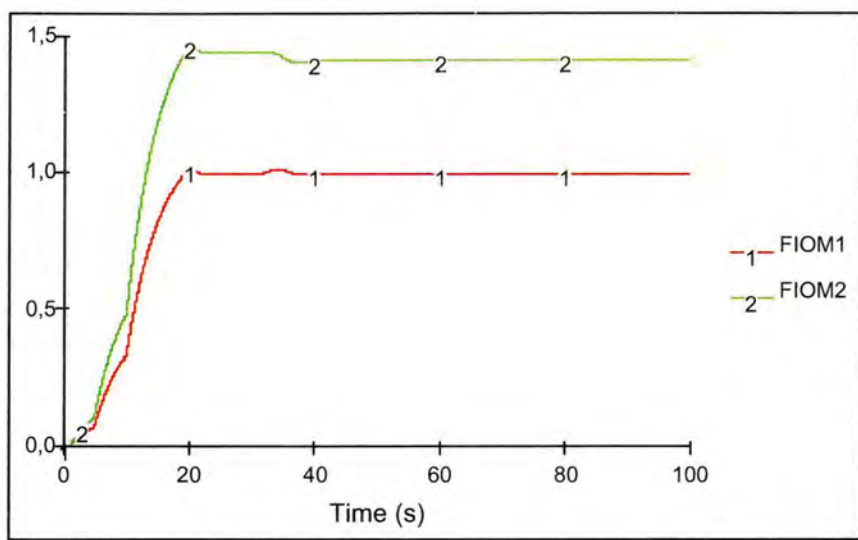
Metodom heurističke optimizacije dobiveni su parametri za PID regulator brodske plinske turbine, i to:  $KPP = 1$ ,  $KPI = 1$  i  $KPD = 0$ , a za generator:  $KPP = .6$ ,  $KPI = 0$ ,  $KPD = .1$ .

### 6.3.2. Scenarij zaleta brodske plinske turbine u praznom hodu, te priključivanja generatora u praznom hodu i opterećenja

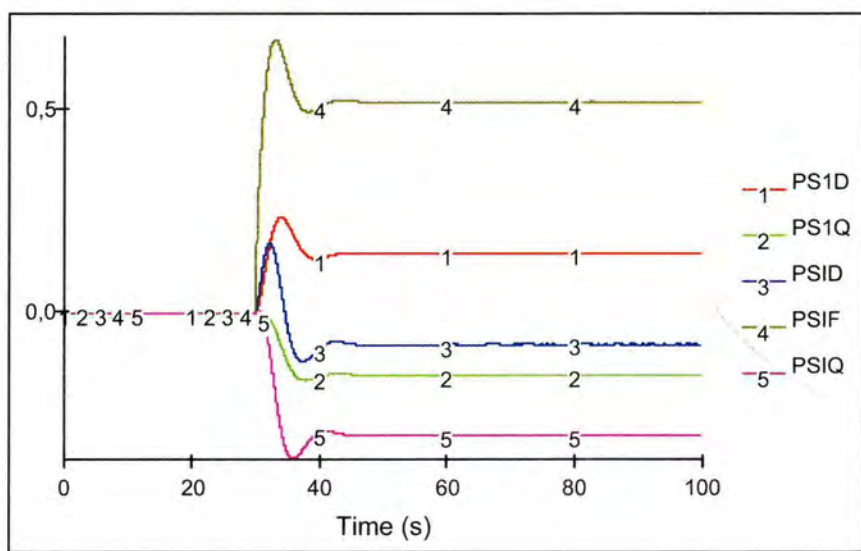
Scenarij je do  $TIME = 60$  sekunda, dakle isti kao i prethodni, uz to što se u  $TIME = 60$  pojavljuje stohastičko opterećenje:

$RL.K=1+STEP(.2,60)*NOISE()$

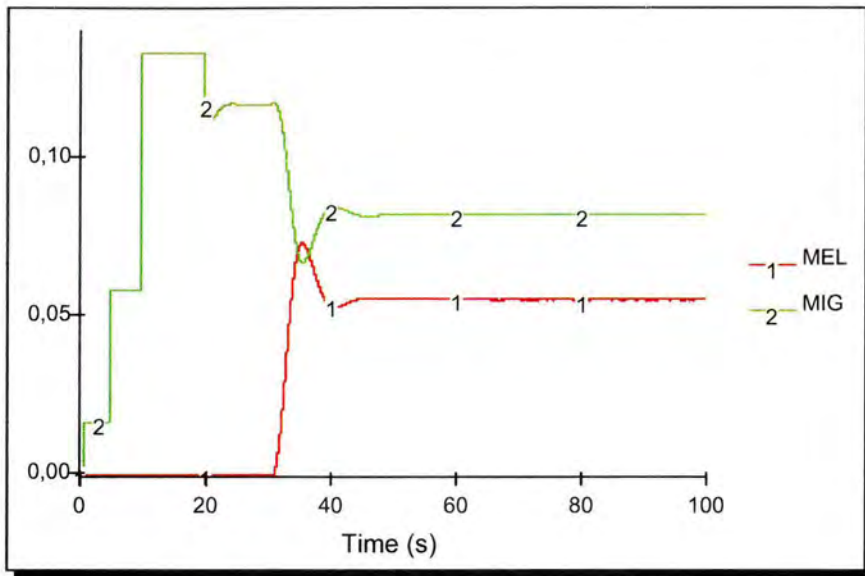
Grafički rezultati simulacije:



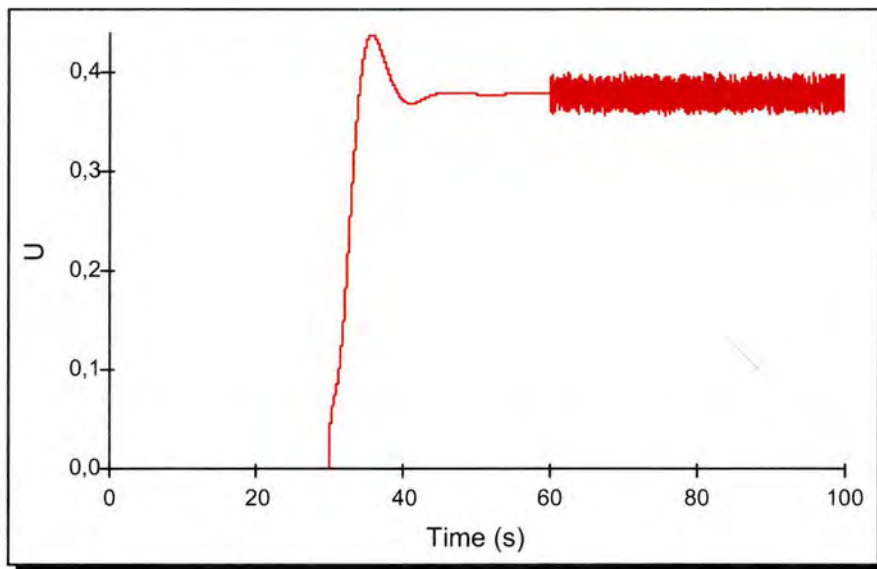
Sl. 69. Relativna kutna brzina prve osovine F1OM1 i druge osovine F1OM2



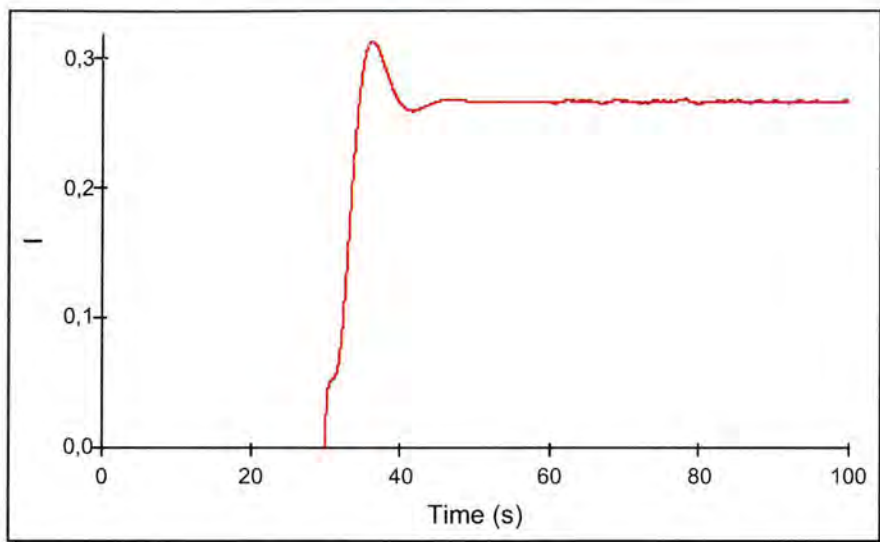
Sl. 70. Ulančani tokovi brodskog sinkronog generatora



Sl. 71. Relativna promjena potrošnje goriva MIG i električni moment generatora MEL



Sl. 72. Napon na konturama statora generatora

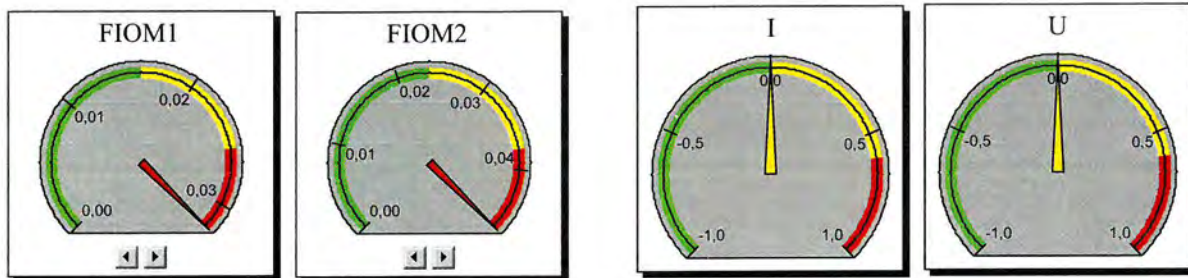


Sl. 73. Ukupna jakost struje

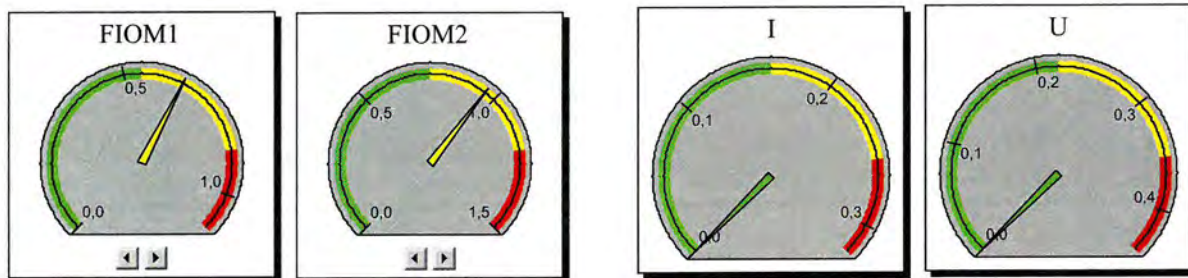
U režimu stohastičnog opterećenja (generatorom slučajnih brojeva simuliramo naizmjenično uključenje i isključenje električnih potrošača) pokušaj stabiliziranja izlaznog napona samouzbuđom po shemi faznog kompaudiranja nije pokazao dovoljno dobru učinkovitost, a nakon zamjene tog dijela sklopa elektronskim PID – regulatorom, vidljivo je iz dijagrama, da izlazni napon varira u dozvoljenim granicama iako su promjene opterećenja ekstremno nepovoljne.

Metodom heurističke optimizacije dobiveni su parametri za PID regulator brodske plinske turbine, i to:  $KPP = 1$ ,  $KPI = 1$  i  $KPD = 0$ , a za generator:  $KPP = .6$ ,  $KPI = 0$ ,  $KPD = .1$ .

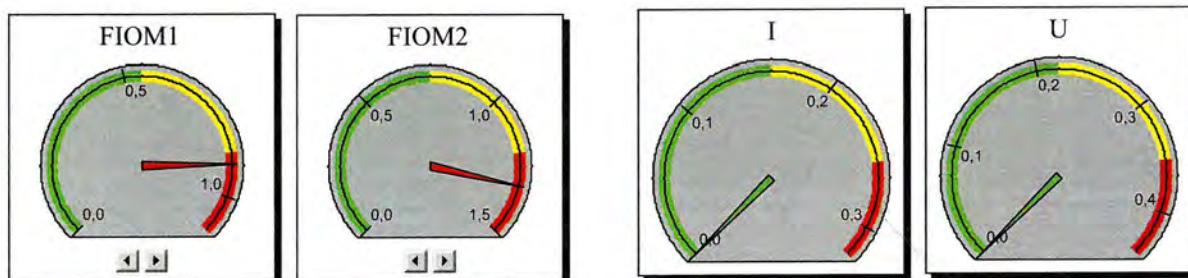
Prikaz mogućeg simulacijskog panela modela brodskog plinskoga turbogenerators:



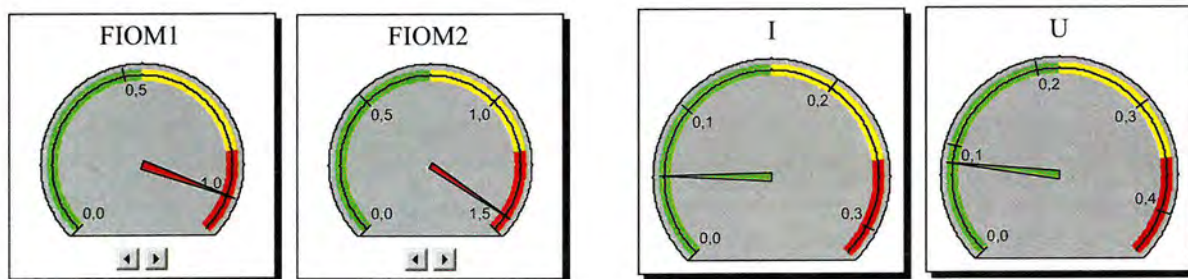
TIME = 5 sekunda



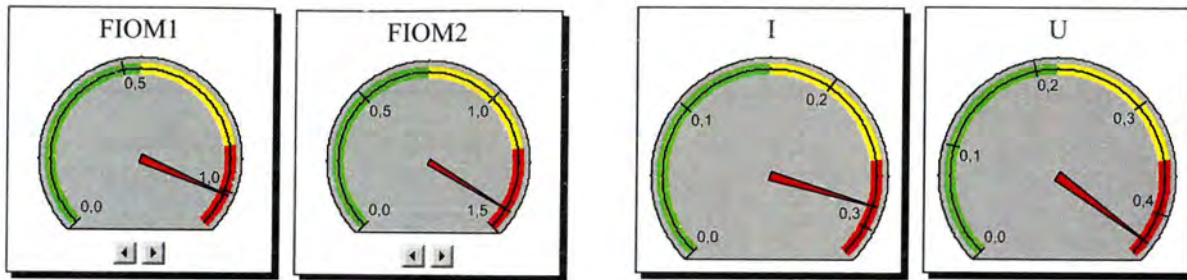
TIME = 12,82 sekunde



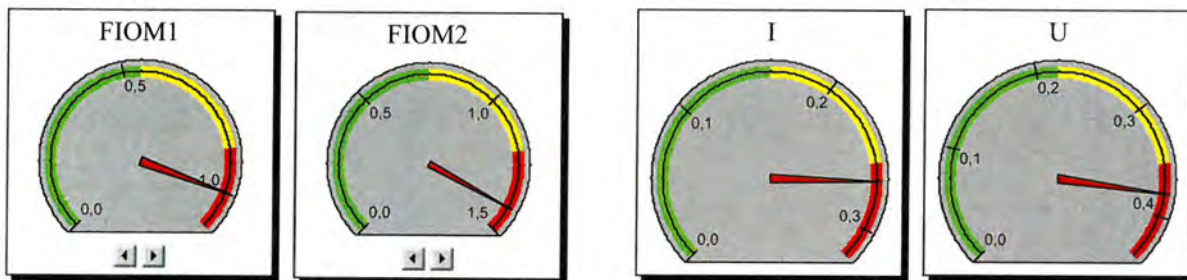
TIME = 16,92 sekunde



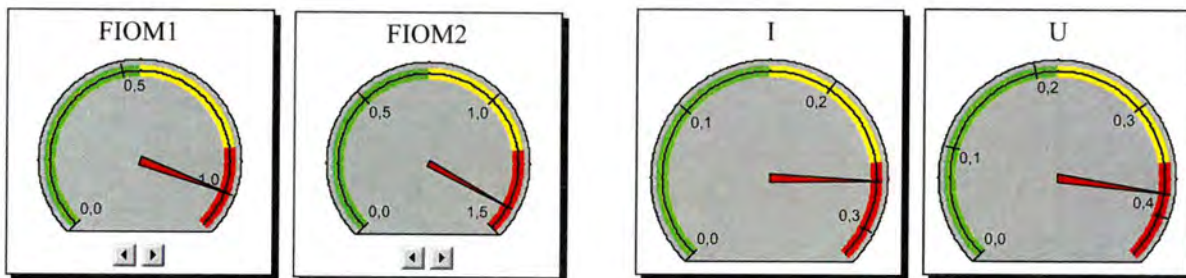
TIME = 30,90 sekundi



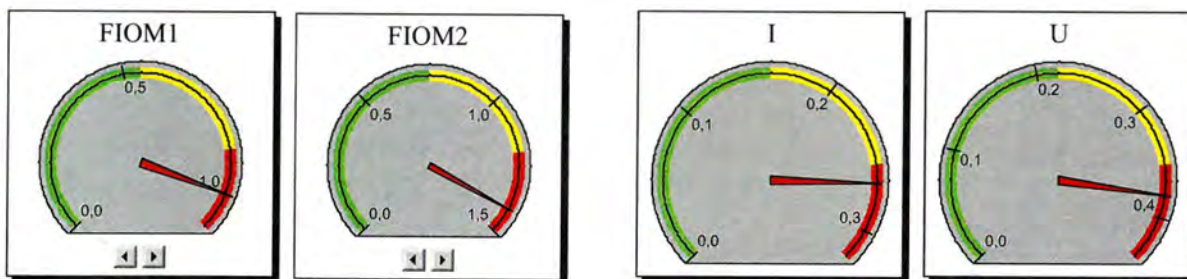
TIME = 34,81sekunde



TIME = 45,48 sekunda



TIME = 86,16 sekunda



TIME = 94,24 sekunde

## 6.4. Simulacijski scenariji brodskog parnog turbogeneratora

### 6.4.1. Scenarij zaleta brodske parne turbine u praznom hodu, te priključivanja generatora u praznom hodu.

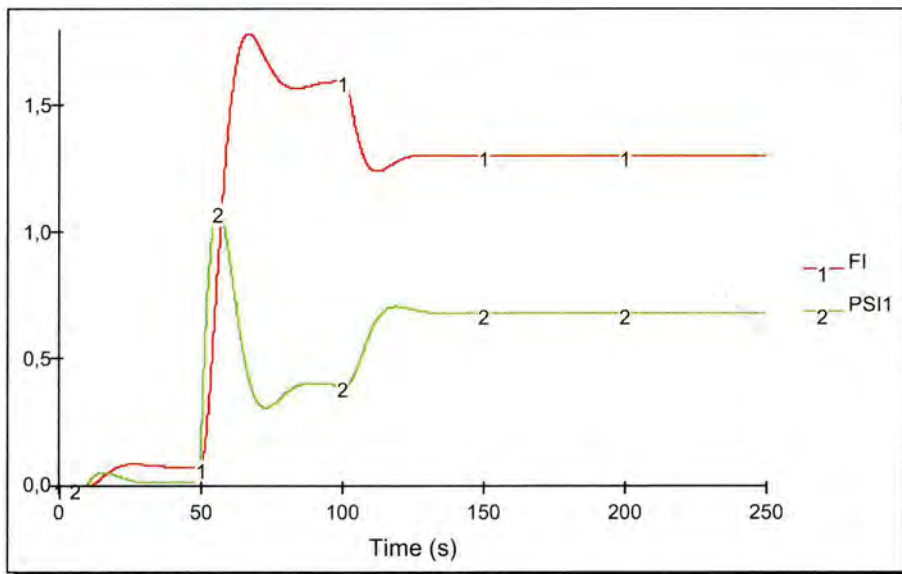
U ovom scenariju prikazati će se zalet (pokretanje) brodske parne turbine i to u dvije faze, te priključivanje brodskog sinkronog generatora u vremenskom trenutku TIME = 100 sekunda.

Parametri PID regulatora su dobiveni metodom heurističke optimizacije i iznose:

za turbinu:  $KPP = 1$ ,  $KPD = 0$  i  $KPI = 0$

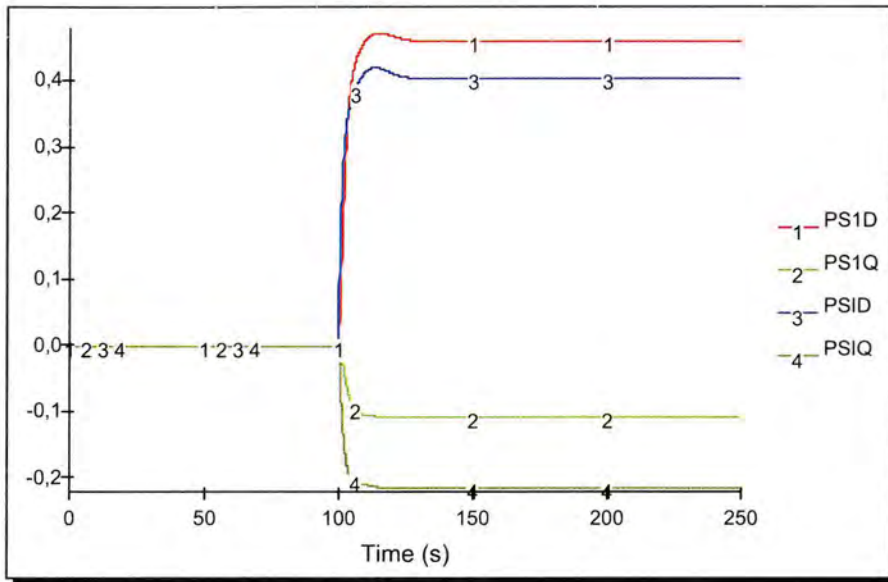
za generator:  $KPP = 1$ ,  $KPD = 0$  i  $KPI = 0$ .

Grafički rezultati simulacije:

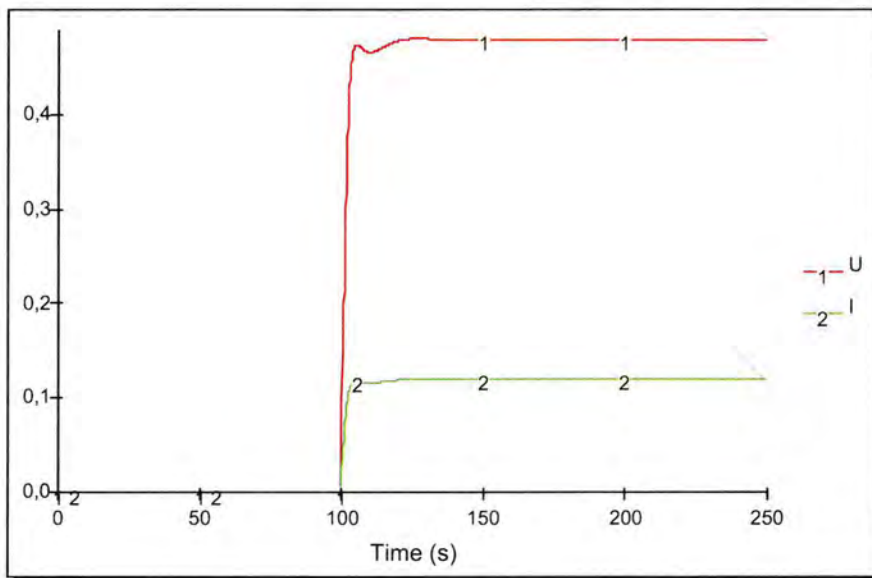


Sl. 74. Relativna kutna brzina rotora FI i relativni prirast tlaka pare u parnom volumenu PSI1





Sl. 75. Ulančani tokovi brodskog sinkronog generatora



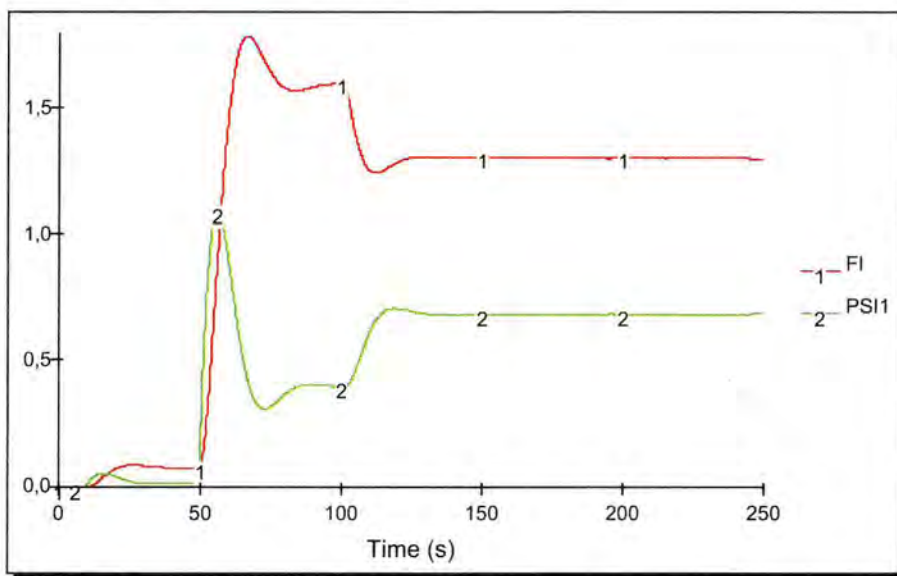
Sl. 76. Napon na konturama statora generatora U i ukupna jakost struje I

### 6.4.2. Scenarij zaleta brodske parne turbine u praznom hodu, te priključivanja generatora u praznom hodu i opterećenja

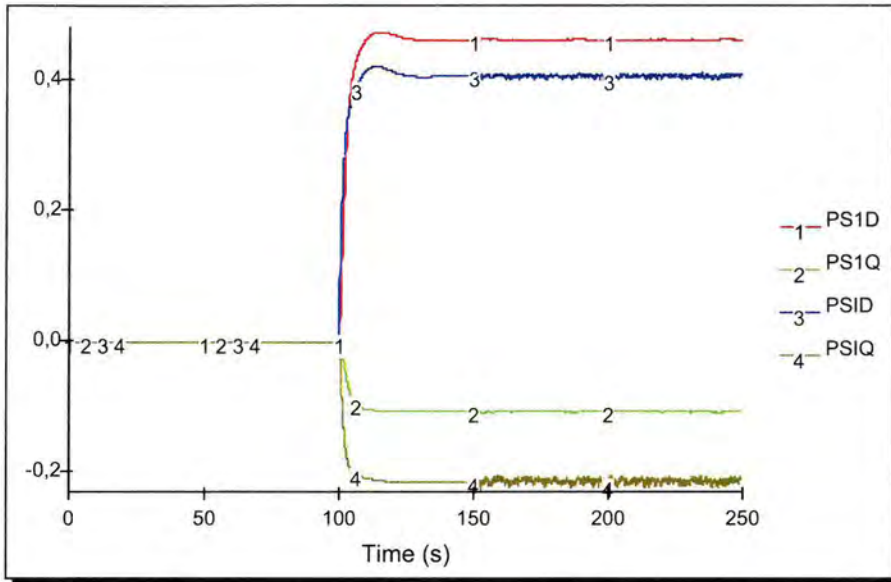
U ovom scenariju zalet turbine je izveden također u dvije faze, priključen je sinkroni generator, a u vremenu TIME = 150 sekunda započinje stohastičko opterećenja parnog turbogeneratora. Pri tome je:

$$RL=4+STEP(RANDOM(-0.5,+0.5),150)$$

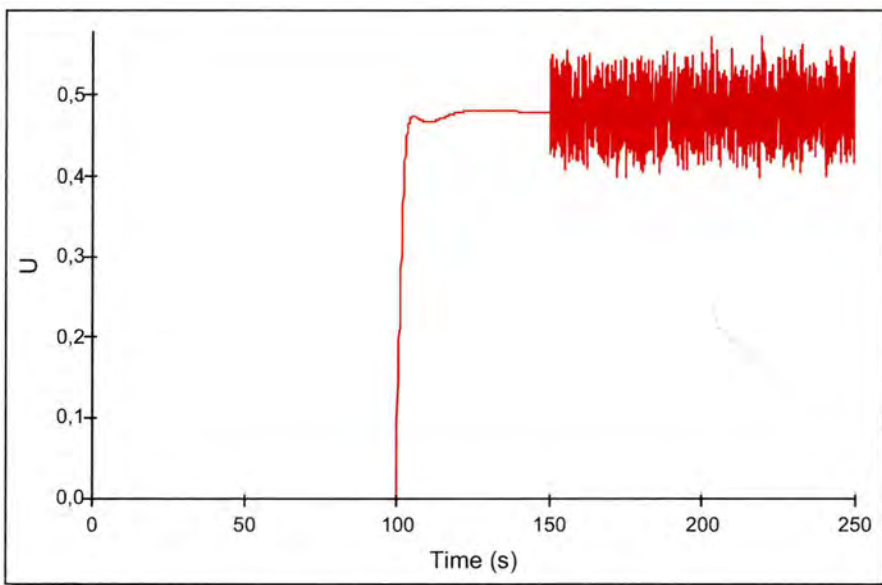
Grafički rezultati simulacije:



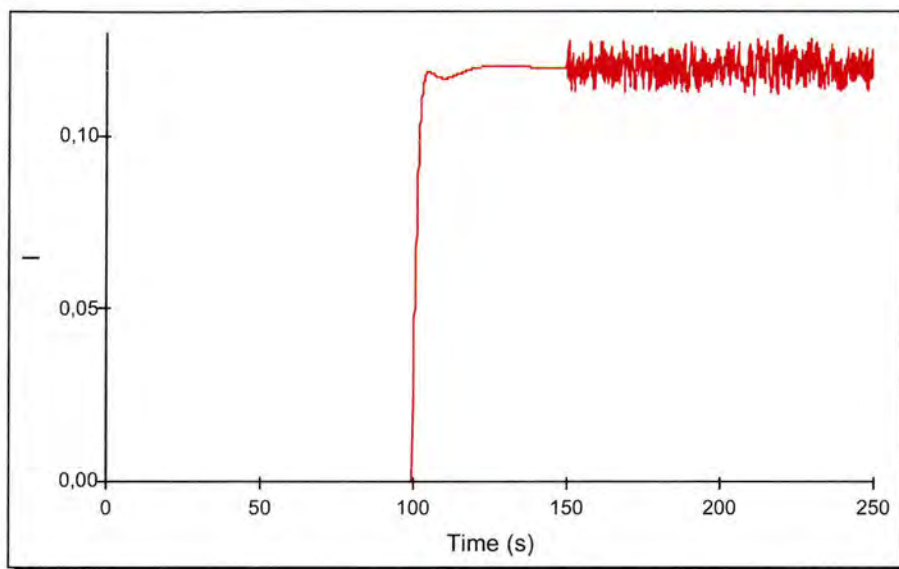
Sl. 77. Relativna kutna brzina rotora FI i relativni prirast tlaka pare u parnom volumenu PSI1



Sl. 78. Ulančani tokovi brodskog sinkronog generatora



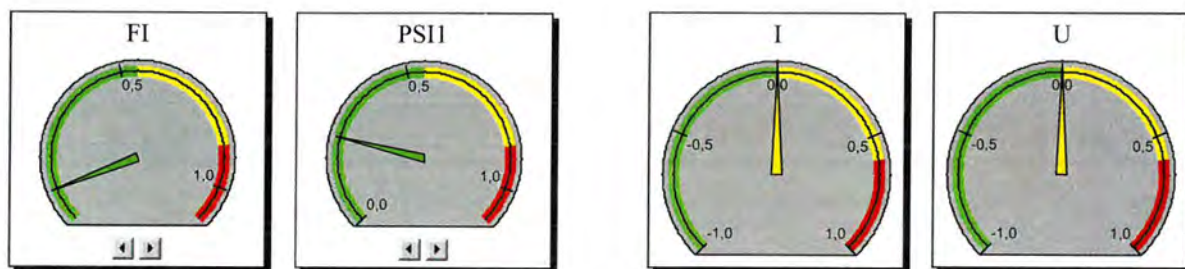
Sl. 79. Napon na konturama statora generatora U



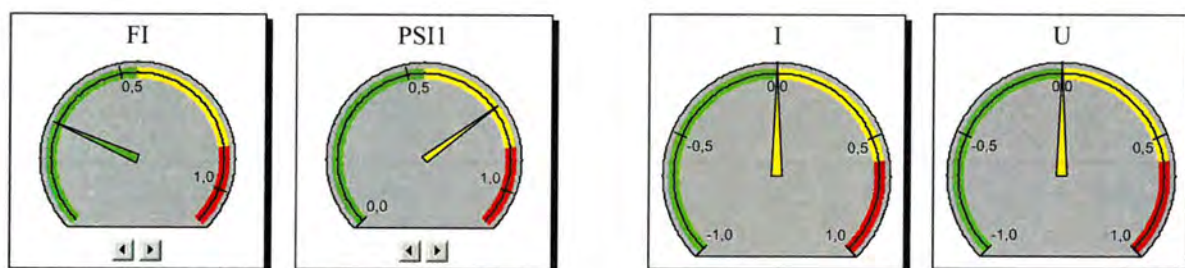
Sl. 80. Ukupna jakost struje I

Ovaj složeni simulacijski scenarij, zapravo, obuhvaća i predstavlja mogućnost da se u jednom simulacijskom eksperimentu ili testu simulira više karakterističnih pogonskih stanja brodskoga plinskog turbogeneratora.

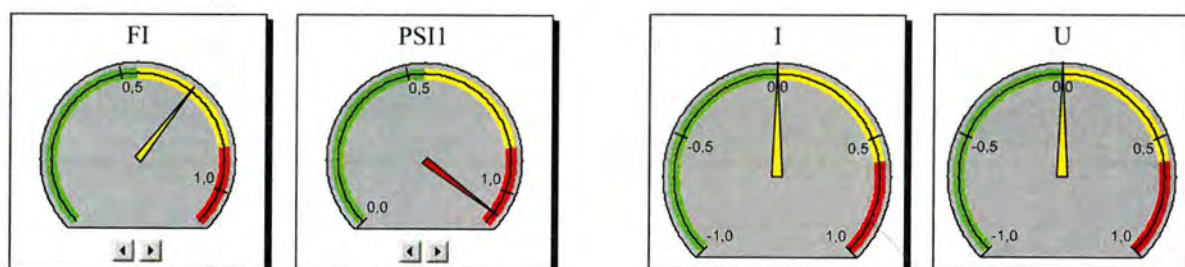
Prikaz mogućeg simulacijskog panela modela brodskog parnoga turbogeneratora:



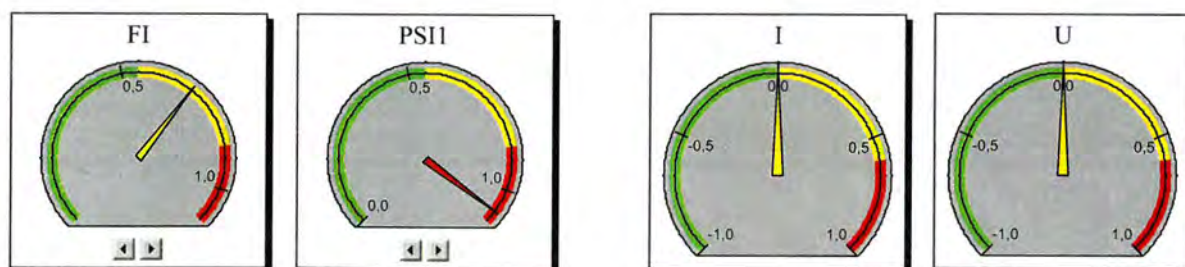
TIME = 50,6 sekunda



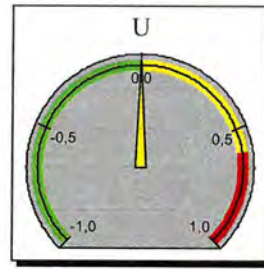
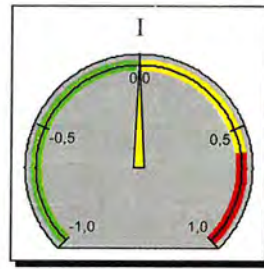
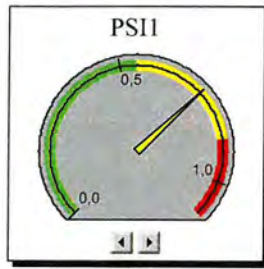
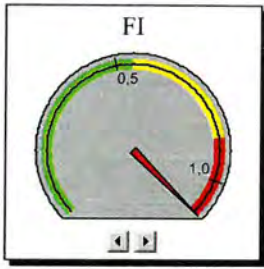
TIME = 52,6 sekunda



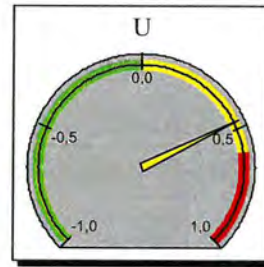
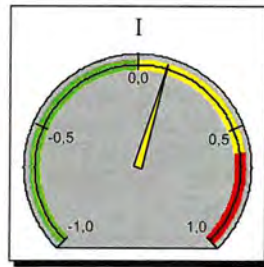
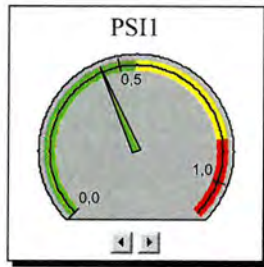
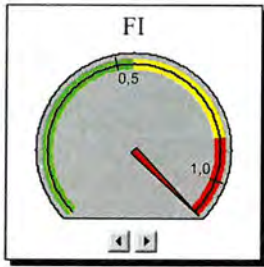
TIME = 55,2 sekunde



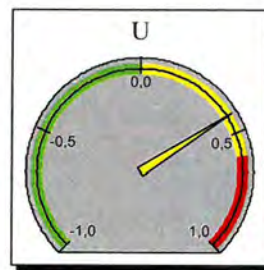
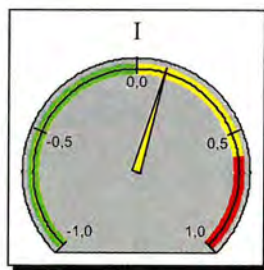
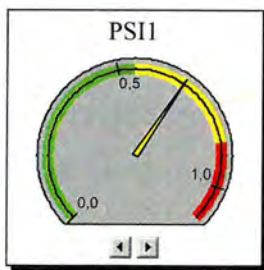
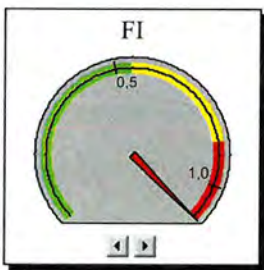
TIME = 56,9 sekunda



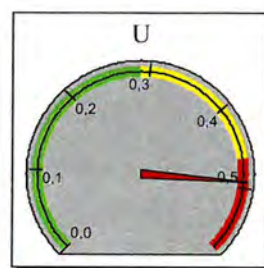
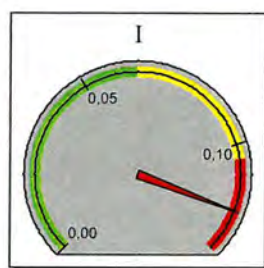
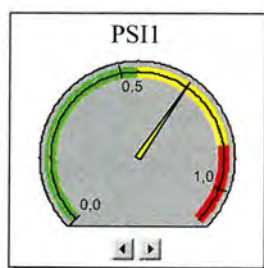
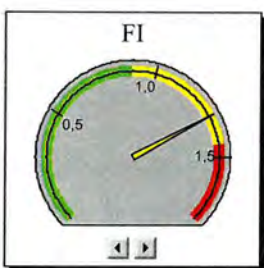
TIME = 62,3 sekunde



TIME = 104,9 sekunda



TIME = 208,9 sekunda



TIME = 250 sekunda

## 7. ZAKLJUČAK

Izrađena disertacija jedan je od primjera direktne primjene najnovijih informatičkih simulacijskih tehnologija, tj. primjene metodologije Sustavne dinamike (*System Dynamics*) u području teoretskog i praktičnog modeliranja složenog strojarskog pogonskog sustava.

Na temelju svih saznanja moguće je donijeti niz zaključaka:

U prvoj glavi postavljen je problem i funkcija cilja rada, a također je dat i osvrt na dosadašnja znanstvena istraživanja i metode znanstvenoga istraživanja. Moguće je zaključiti da su problem i funkcija cilja jasno određeni te da bi se, dosadašnjim simulacijskim metodama koje su se koristili za istraživanje dinamike brodskih plinskih i parnih turbogeneratorskih, predložila nova znanstvena metoda simulacije koja modelaru daje daleko više novih saznanja o mogućoj dinamici ponašanja brodskoga turbogeneratorskog sustava.

U drugoj glavi predstavljeni su dosada korišteni simulacijski modeli brodskih plinskih i parnih turbina, determinirani su matematički modeli i tzv. jednadžbe stanja pa je moguće zaključiti da su toplinske turbine nelinearan i vrlo složen sustav, koji je u ovom radu predstavljen nelinearnim diferencijalnim jednadžbama.

U trećoj glavi dan je matematički model brodskoga sinkronoga generatora koji je predstavljen s pet nelinearnih diferencijalnih jednadžbi prvog reda te s većim brojem pomoćnih jednadžbi.

U četvrtoj su glavi predstavljeni elektronički regulatori broja okretaja, dani su njihovi matematički modeli, a posebno su determinirani matematički i kompjutorski simulacijski modeli u DYNAMO programskom paketu, i to u obliku Macro funkcija DYNAMO jezika.

U petoj glavi dane su osnove Sustavne dinamike, te su determinirani sustav-dinamički kompjutorsko simulacijski modeli brodske plinske turbine, brodske parne turbine, broskog sinkronog generatora, tj. dani su mentalno-verbalni strukturni dijagram, dijagrami tokova i matematički i kompjutorski modeli, a determiniran je i globalni sustav-dinamički kompjutorsko simulacijski model u POWERSIM programskom paketu.

U šestoj glavi izvršena je simulacija - eksperiment zaleta (upućivanja) brodske plinske i parne turbine, udarnog i stohastičkog opterećenja, priključenja generatora u praznom hodu te opterećenja.

Na osnovi iznesenoga, tj. izvršene simulacije sustav-dinamičkih modela brodske plinskog i parnog turbogeneratora 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 općedruštveno korisna, kako za studente tehničkih fakulteta, tako isto i za diplomirane inženjere svih profila, jer ista metodologija omogućava jeftinu, brzu i preciznu metodu stjecanja novih znanja, pa i umijeća u području strojarskih sustava i procesa.

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

Prije osvrta, tj. komentara, na validnost rezultata potrebno je naglasiti da se razvoj cjelokupnih modela bazirao na korištenoj literaturi (matematičkom modelu) u kojoj su opisani iskustveno potvrđeni korišteni modeli.

Upravo su oni predstavljali temelj prve faze modeliranja, tj. mentalno-verbalno modeliranje. Uočavanjem uzročno-posljedičnog djelovanja uočene su dodatne pomoćne varijable koje su u konačnici omogućile razvoj matematičko-računarskog modela koji je korišten za razvoj prikazanih scenarija. Zahvaljujući tome, moguće je ustvrditi da je konceptualni model u potpunosti usklađen sa zahtjevima pomorske znanosti i struke, kao i Sustavne dinamike, što omogućuje kreiranje različitih mogućih scenarija.

Sama validnost modela je potvrđena jer se ponaša upravo prema predviđenim ponašanjima koji su ostvareni u praksi ili opisani u postojećoj literaturi.

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 uz pomoću te metodologije modelira, optimira i simulira bilo koji scenarij postojećih realiteta.

Nadalje, oni koji se koriste ovom metodologijom 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 kompjutorski tip modeliranja već jasno determinira i mentalno, strukturno i matematičko modeliranje istih realiteta sustava.



Realizacija ove disertacije doprinosi iznošenju kreativnih viđenja i mišljenja o osnovnom problemu istraživanja fenomena nedovoljnog znanja inženjerskih kadrova o dinamičkom ponašanju brodskih turbogeneratorskih sustava te o mogućim implikacijama ovog fenomena na globalno kvalitetno vođenje broda kao cjeline, tj. broda kao sustava.

Uspješna realizacija, tj. kvalitativno i kvantitativno znanstveno determiniranje složenog fenomena dinamike ponašanja opterećenja brodske električne mreže, tj. brodskih turbogeneratorskih sustava daje značajan znanstveni doprinos u baznim i primijenjenim tehničkim znanstvenim disciplinama, te interdisciplinarnim podusmjerenjima pomorskog transporta, eksploatacije brodskih pogonskih sustava, edukacije pomoraca, automatike, teorije upravljanja i regulacije, ekspertnih sustava, inteligentnih sustava, dijagnostike, te provođenju kibernetizacije, kompjutorizacije i informatizacije.

Prema mišljenju autora disertacije, glavni znanstveni doprinosi su:

- Došli smo do novih saznanja o dinamici ponašanja složenih brodskih turbogeneratorskih sustava, tj. brodske električne mreže kao cjeline, definirajući sve relevantne uzročno posljedične veze kao i relevantne krugove povratnog djelovanja koji dominiraju unutar turbogeneratorskog sustava.
- Izrada sustav-dinamičkog simulacijskog modela brodskih turbogeneratorskih sustava omogućuje dijagnosticiranje, prognozu stanja i kvalitetnije donošenje odluka u svrhu sigurnog upravljanja radom brodske električne mreže kao cjeline.
- Doprinos je značajan i u procesu edukacije današnjih i budućih visokoškolskih strojarских i elektrotehničkih inženjera u području simulacijskog modeliranja složenih organizacijskih, prirodnih i tehničkih sustava.
- Važan doprinos je omogućivanje studentima, tehničarima i inženjerima da "vide" dinamiku ponašanja turbogeneratorskog sustava kao cjeline, u svakom trenutku vremena, a ne samo u diskretnim vremenskim intervalima, što predstavlja znatan doprinos.
- Omogućuje se dizajnerima i konstruktorima novih brodskih pogonskih sustava i procesa da u fazi projektiranja primijene sustavno dinamičku znanstvenu metodu simulacije kontinuiranih modela na računalu, te da ne čekaju na rezultate "probnog stola" ili probnog laboratorija, ili na kraju probnu vožnju broda, što ukazuje na zaista važan znanstveni doprinos.
- Stvaranje osnove za daljnja znanstvena istraživanja dinamike ponašanja globalnih brodskih pogonskih sustava, kao i globalnog sustava vođenja broda s aspekta realizacije

dugoročnog znanstvenog projekta pod nazivom: "Sustavi inteligentnog vođenja broda", ili kraće: "Inteligentni brod"

Razvijeni sustav-dinamički simulacijski modeli višestruko su podobni za:

1. znanstvena istraživanja dinamike ponašanja brodskog plinskog i parnog turbogeneratorskog sustava u fazi dizajniranja, projektiranja, ispitivanja i eksploatacije;
2. edukativno trenažiranje studenata i diplomiranih inženjera (srodnih tehničkih profila);
3. ekspertnu primjenu simulacije analognih nelinearnih složenih dinamičkih sustava;
4. kompletiranje globalnog sustav - dinamičkog simulacijskog modela "*broda budućnosti*" - GSDSMBB-a.

Na kraju možemo citirati kinesku poslovicu koja glasi:

*" Kada čujem zaboravim. Kada vidim, zapamtim. Kada radim, shvatim",*

tj. možemo je napisati sustavno- dinamički:

"KADA ČUJEM MENTALNO-VERBALNI MODEL DINAMIČKOG PROCESA,  
**ZABORAVIM."**

"KADA VIDIM STRUKTURNI MODEL I REALNOST DINAMIČKOG PROCESA  
**ZAPAMTIM."**

"KADA NAPRAVIM MATEMATIČKI ILI KOMPJUTORSKO-  
SIMULACIJSKI MODEL DINAMIČKOG PROCESA  
**NAUČIM."**

"KADA NAPRAVIM SIMULACIJU ILI VJEŽBU SUSTAV - DINAMIČKOG  
MODELA ILI DINAMIČKOG PROCESA, NAPRAVIT ĆU  
**OSVJEŽENJE**  
SVOGA STEČENOG TEORETSKOG I PRAKTIČNOG  
ZNANJA O DINAMIČKOM PROCESU".

## LITERATURA

- [1] R. A. Nalepin, O.P. Demeenko, *Avtomatizacija sudovljih energetskih ustanovok*, Sudostroennie, Leningrad, 1975.
- [2] L.I. Isakov, L.I. Kutljin, *Kompleksnaja avtomatizacija sudovljih dizeljih i gazoturbinljih ustanovok*, Sudostroennie, Leningrad, 1984.
- [3] L.P. Veretenikov, *Isledovanie procesov v sudovljih elektro-energetičeskijh sistemah-teorija i metodlji*, Sudostroennie, Leningrad, 1975.
- [4] G.F. Suprun, *Sintezsistem elektroenergetiki sudov*, Sudostroenie, Leningrad, 1972.
- [5] *Hrvatski registar brodova*, Split, 2004.
- [6] D. Gray, *Centralized and automatic control in ships*, London, 1966.
- [7] A. Hind, *Automation in merchant ships*, London, 1968.
- [8] Germanischer Lloyd, *Rules for Classification and Construction*, London, 1992.
- [9] Lloyd's Register, *Rules and Regulations for the classification of ships*, London, 1992.
- [10] A. B. Kane, *Marine Internal combustion engines*, MIR Publishers, Moskva, 1984.
- [11] N. V. Golubev, *Proektirovanie energetičeskijh ustanovok morskih sudov*, Sudostroenie, Leningrad, 1980.
- [12] P. P. Akimov, *Sudovie avtomatizirovannije energetičeskie ustanovki*, Transport, Moskva 1980.
- [13] I. R. Freidzon, *Sudovie avtomatizirovannije elektroprivodi i sistemi*, Sudostroenie, Leningrad, 1988.
- [14] A. A. Vanšeidt, *Sudovie ustanovki s dvigateljami vnutrennego sgoranija*, Sudostroenie, Leningrad, 1978.
- [15] I. I. Krineckij, *Sudovala automatika*, Piščevaja promišlennost, Moskva, 1978.
- [16] V. I. Samsonov, N. I. Hudov, A. A. Mirjuščenko: *Sudovie dvigateli vnutarnnego sgoranija*, Transport, Moskva, 1981.
- [17] A. A. Kalmakov, J. A. Kuvšinov, S. S. Romanova, S. A. Ščelkunov, *Avtornatika i avtomatizacija sistem teplogazosnabženija i ventiljaci*, Stroizdat, Moskva 1986.
- [18] M. K. Ovsjannkov, V. A. Petuhov, *Sudovie avtomatizirovannije energetičeskie ustanovki* Transport, Moskva, 1989.
- [19] I. Jung, *The Marine Steam Turbine*, National Maritime Museum Monograph, 1987.
- [20] A. Charchalis, *Propulsion System of Naval Vessels with Marine Turbine Engines*, Wyd Simp Gdansk, 1988.

- [21] D.G. Nicholas, *Marine Steam Turbines at the Centenary*, Parsons Memorial Lecture, 1974.
- [22] D.G. Nicholas, *Review Of the Marine Steam Turbine over the last 40 years*, IMarE, 1990.
- [23] M. Jadrić, B. Frančić, *Dinamika električnih strojeva*, Zagreb, Croatia, 1996.
- [24] L. Milić I. Milić, *Osnove Automatizacije*, Pomorski fakultet, Dubrovnik 1991.
- [25] A. Munitić, I. Kuzmanić, M. Krčum, System dynamics simulation modelling of the marine synchronous generator set, *Modelling and Simulation*, Pittsburgh, USA, 1998.
- [26] R. Francic, *Automatic Control Engineering*, McGraw-Hill Book Company, New York, USA, 1987.
- [27] L. Milić, R. Stojić, *Kontinualni sistemi automatskog upravljanja*, Beograd, 1973.
- [28] J. W. Forrester, *PRINCIPLES OF SYSTEMS*, Ninth printing, MIT Press, Cambridge, Massachusetts-USA, and London, England, 1980.
- [29] Lj. Kuljača, Z. Vukić, *Automatsko upravljanje sistemima*, Školska knjiga-Zagreb, 1985.
- [30] E. Tireli, D. Martinović, *Brodске toplinske turbine*, Rijeka, 2001.
- [31] G. Richardson, P. and Pugh III Aleksander L., *Introduction to System Dynamics Modelling with Dynamo*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 1981.
- [32] A. H. Byrknes, *Run-Time User's Guide and Reference Manual*, Powersim 2.5, Powersim Corporation, Powersim AS, 12007 Sunrise Valley Drive, Reston Virginia 22091 USA, 1993.
- [33] A. Muntitić, *Kompjuterska simulacija uz pomoć Sistemske Dinamike*, Brodosplit, Split, Croatia, 1989.
- [34] A. Munitić, Application Possibilities of System Dynamics Modelling, *Multi System Dynamics Conference*, str. 12-17, San Diego, California, USA, 1989.
- [35] A. Munitić, L. Milić, M. Bupić, System dynamics modelling and simulation as part of education in marine science colloquiums, *13<sup>th</sup> European Simulation Multiconference*, Warsaw, Poland, June 1-4, 1999.
- [36] A. Munitić, L. Milić, M. Bupić, System dynamics simulation model of the steam turbine and automatic turbine governor by PID-regulator, *11<sup>th</sup> European Simulation Symposium*, Erlangen, Germany, October 26 – 28, 1999.
- [37] A. Munitic, M. Orsulic, L. Milic and J. Dvornik, System dynamics modelling of complex electro mechanical system, *IASTED, AMS 2002*, str. 511-515, ISBN: 0-88986-331-8, ISSN: 1021-8181, 2002, Cambridge, USA, 4-6. November, 2002.

- [38] A. Munitic, R. Antonic, J. Dvornik, System dynamics simulation modeling of ship gas-turbine generator, ICC'03, *International Carpathian Control Conference*, str. 357-360, Košice, Slovak, 26-29 May, 2003.
- [39] A. Munitic, M. Orsulic, J. Dvornik, Computer simulation of complex ship system "gas turbine- synchronous generator", ISC 2003, *The Industrial Simulation Conference*, ISBN: 90-77381-03-1, str. 192-197 Valencia, Spain, 9-12 June, 2003.
- [40] 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.
- [41] M. Orsulic, A. Munitic, J. Dvornik, Simulation modelling of the marine steam turbine, *5<sup>th</sup> Middle East Symposium on Simulation and Modelling*, Etisalat College, ISBN: 90-77381-06-6, str. 106-108, 2004. Sharjah, U.A.E., January 5-7, 2004.
- [42] J. Dvornik, L. Milic, A. Munitic, Kompjuterska simulacija i optimizacija broskog plinskog turbogeneratora, *Znanstveni časopis za more i pomorstvo, NAŠE MORE*, ISSN 0469-6255, UDK 519.876.5:621.313, str. 181-188, Godište 50, broj 5-6., Dubrovnik, Croatia.
- [43] J. Dvornik, E. Tireli, A. Munitic, Computing simulation and heuristics optimization of the marine twin shaft gas turbine, *3rd Annual Industrial Simulation Conference 2005*, ISC 2005, Berlin, Germany, 9-11 June, 2005.
- [44] E. Tireli, J. Dvornik, Z. Kulenovic, Simulation and heuristics optimization of turbine drive generating set, *9<sup>th</sup> International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology"*, TMT 2005, Antalya, Turkey, ISBN: 9958-617-28-5, str. 1303-1307, 26-30 September, 2005.
- [45] J. Dvornik, S. Dvornik, E. Tireli, Computing simulation and heuristics optimization of marine Diesel generating set, ICEIS 2005, *7th International Conference on Enterprise Information Systems*, International Workshop on "Organizational Modeling & Simulation Using Petri Nets", MSVVEIS 2005, ISBN: 972-8865-22-8 , 102- 107, Miami, USA, 24-28 May, 2005.
- [46] J. Dvornik, E. Tireli, A. Munitic, Simulation of behaviour of turbine drive generating set, *19th European Conference on Modelling and Simulation 2005*, ECMS 2005, ISBN: 1-84233-112-4, 140-144, Riga, Latvia , 1-4 June, 2005.
- [47] N. Račić, *Simulacija dinamičkih uvjeta rada broskog propulzijskoga dizelskog motora*, Magistarski rad, Tehnički fakultet Rijeka, Rijeka, 1998.
- [48] M. Jurjević, *Sustavno dinamičko modeliranje Diesel motora sa turbopuhalom*, Magistarski rad, FESB Split, Split, 2001.

- [49] V. Medica, *Simulacija dinamičkih uvjeta rada dizel motora s prednabijanjem kod pogona električnog generatora*, Doktorska disertacija, Tehnički fakultet Rijeka, Rijeka, 1988.
- [50] L. Milić, *Dinamičko kontinuirani simulacijski model brodskog dizelmotornog porivnog sustava*, Doktorska disertacija, Pomorski fakultet Rijeka, Rijeka, 1996.
- [51] J. Dvornik, *Sustavno dinamičko simulacijsko modeliranje brodskog Diesel motora pod opterećenjem*, Magistarski rad, FESB Split, Split, 2004.
- [52] A. Fowler, A., *Microcomputer-based Simulation on Marine Propulsion Systems*, *Transaction JmarE*, VOL 100:13-29, 1988.
- [53] M. Kostenko, L. Piotrovsky, *Electrical Machines*, Moskva, Vol I and Vol II, 1969.
- [54] R. Olsen, *Simulation of a free piston engine with digital computer*, *SAE Trans*, VOL 66, 1958.
- [55] H. A. Cook, *Analysis and interpretation of turbocharged Diesel engine performance*, *SAE Trans*, VOL 67, 1959.
- [56] K. Bansioleiman, L. A. Smith, Z. Bazari, N. Mathieson, *Simulation of Diesel engine performance*, *Transaction JmarE*, VOL 105/3:117-135, 1989.
- [57] A. Munitić, L. Milić, M. Miliković, M., *System Dynamics Computer Simulation Model of the Marine Diesel-Drive Generation Set*, *IMACS World Congress on Scientific Computation, Modelling and Applied Matematchs*, Vol.5, Wiissenschaft & Technik Verlag, Berlin, 1997.
- [58] D. Šimić, *Osnovi automatskog upravljanja*, Naučna knjiga Beograd, 1990.

## SUPLEMENTARNA LITERATURA

- [1] N. Agren, M. Westermarck, M. Bartlett, T. Lindquist, *First Experiments on an Evaporative Gas Turbine Pilot Plant Power Plant: Water circuit Chemistry and Humidification Evaluation*, *J. of Eng. for Gas Turbines and Power*, Trans. of the ASME, Vol. 124, pp. 96-102, 2002.
- [2] T. Lindquist, P. Rosén, T. Torisson, *Evaporative Gas Turbine Cycle -a Description of a Pilot Plant and Operating Experience*, *ASME Int. Mech. Eng. Congress and Exposition*, Orlando, USA. 2000.
- [3] T. Lindquist, P. Rosén, T. Torisson, *Theoretical and Experimental Evaluation of the EvGT-Process*, *ASME Int. Mech. Eng. Congress and Exposition*, Orlando, USA, 2000.
- [4] T. Lindquist, P. Roséen, L-O. Olsson, *Humid Cycles a Novel Way to Increase*

Performance of Marine Propulsion Systems, *CIMAC World Congress on Combustion Engine Technol.*, Germany, 2001.

[5] F. Hermann, T. Lindquist, J. Klingmann, Combustion in Humid Air -Experimental Overview, *Combustion Inst. Conf., Gothenborg*, Sweden, 2001.

[6] M. Assadi, E. Meshbahi, T. Torisson, T. Lindquist, J. Arriagada, P. Olausson, A Novel Correction Technique for Simple Gas Turbine Parameters, *ASME TURBO EXPO*, New Orleans, USA, 2001.

[7] E. Meshbahi, M. Assadi, T. Torisson, T. Lindquist, A Unique Correction Technique for Evaporative Gas Turbine (EvGT) Parameters, *ASME TURBO EXPO*, New Orleans, USA, 2001.

[8] T. Lindquist, M. Thern, T. Torisson, Experimental and Theoretical Results of a Humidification Tower in an Evaporative Gas Turbine Cycle Pilot Plant, *ASME TURBO EXPO*, Amsterdam, The Netherlands, 2002.

[9] [http://www.seaworthysystems.com/marine\\_internet/papers.htm](http://www.seaworthysystems.com/marine_internet/papers.htm)

[10] [http://www.gepower.com/prod\\_serv/products/tech\\_docs/en/all\\_gers.htm](http://www.gepower.com/prod_serv/products/tech_docs/en/all_gers.htm)

[11] [http://www.reference.com/browse/wiki/Gas\\_turbine](http://www.reference.com/browse/wiki/Gas_turbine)

[12] [http://www.reference.com/browse/wiki/Steam\\_turbine](http://www.reference.com/browse/wiki/Steam_turbine)

## ŽIVOTOPIS

- Rođen u Splitu 1978. godine.
- 1996. Završena srednja pomorska škola – tehničar za brodogrojarstvo.
- 2001. Završen Pomorski fakultet u Splitu- diplomirani inženjer pomorskog prometa, smjer brodogrojarstvo.
- Od 2001. radi na Pomorskom fakultetu u Splitu, kao znanstveni novak na znanstvenom projektu br. 01717007.
- 2003. izabire se u zvanje asistenta.
- 2004. Završen poslijediplomski znanstveni studij na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje - magistar znanosti, područje Tehničke znanosti, polje strojarstvo.  
Magistarski rad: *Sustavno dinamičko simulacijsko modeliranje brodskog Diesel motora pod opterećenjem.*
- Objavio preko 50 znanstvenih radova iz područja Sustavno Dinamičkog Kompjutersko Simulacijskog Modeliranja i to različitih sustava i procesa, od toga preko 20 znanstvenih radova iz područja brodskih parnih i plinskih turbina, brodskih motora i složenih brodskih pogonskih sustava.
- Aktivno učestvovao i sudjelovao s svojim radovima na 30 međunarodnih znanstvenih skupova. U Americi prisustvovao nastavnim predavanjima i aktivno učestvovao s svojim radovima na više znanstvenih skupova i to redom:
  1. ISDC 2003, 21st System Dynamics Conference in New York City, International System Dynamics Conference 2003, July 20-24, 2003, NEW YORK, USA,
  2. SCI 2004, Eighth World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, July 18-21, 2004, Orlando, Florida, USA,
  3. ICEIS 2005, 7th International Conference on Enterprise Information Systems, May 24-28, 2005, Miami, Florida, USA,
  4. ISDC 2005, 23rd International Conference of the System Dynamics Society, Boston, Massachusetts, USA, July 17 – 21, 2005.
- Član društva SCS, *The Society for Computer Simulation International*, s sjedištem u San Diego, USA ([www.scs.org](http://www.scs.org)), također član je društva *System Dynamics Society*, s sjedištem u MIT, Cambridge, Massachusetts Institute, USA ([www.systemdynamics.org](http://www.systemdynamics.org)), te društva IASTED, *The International Association of Science and Technology for Development*, Calgary, Alberta, Canada ([www.iasted.org](http://www.iasted.org))



- Na Pomorskom fakultetu obavljao, u šk. god.. 2004/2005 i 2005/2006., funkciju *Pomoćnika Dekana* za opće poslove,
- *Tajnik poslijediplomskog studija* Pomorskog fakulteta u Splitu.
- U šk. god.. 2004/2005 i 2005/2006., *Pomoćnik voditelja studija* u Šibeniku Pomorskog fakulteta u Splitu.
- Član Izvršnog odbora Udruge pomorskih strojara u Splitu, čiji je i član.
- 2005. Pomorski fakultetu u Splitu izabire ga, a Odlukom Matičnog povjerenstva i odlukom Stručnog povjerenstva Pomorskog fakulteta u Rijeci, u nastavno zvanje predavača za područje Tehničkih znanosti, polje Tehnologija prometa i transporta, grana Pomorski i riječni promet, za predmete *Brodski motori i Konstrukcija, stabilnost, otpor i propulzija broda*.
- U nastavi sudjelovao, od 2002. god., održavajući vježbe na Pomorskom fakultetu u Splitu iz kolegija *Modeliranje brodskih dinamičkih procesa, Modeliranje i Simuliranje procesa, Eksploatacija brodskih motora i Eksploatacija brodskih pomoćnih strojeva i uređaja*.
- Od šk. god. 2004/2005. održava nastavu iz predmeta *Konstrukcija, stabilnost, otpor i propulzija broda* na brodstrojarskom usmjerenju, nautičkom, te usmjerenju Upravljanje jahtama i marinama, a također i vježbe.
- Na poslijediplomskom studiju Pomorskog fakulteta u Splitu u šk. god. 2004/2005. izvodio je nastavu i vježbe iz kolegija *Poslovne kompjuterske simulacije i Menadžerski simulatori i trenažeri*.
- U šk. god. 2005/06. održava nastavu iz kolegija *Tehnička mehanika* na smjeru Pomorskog menadžmenta i smjeru Pomorske tehnologije jahta i marina, zatim *Sredstva pomorskog prometa* na smjeru Pomorske nautike i *Konstrukcija, stabilnost, otpor i propulzija broda* na smjeru Brodstrojarstva.

## CURRICULUM VITAE

- 1978 – Born in Split.
- 1996 – Graduated from the Secondary Maritime School as marine engineer.
- 2001 – Graduated from The Maritime Faculty in Split as the Graduate Engineer of maritime traffic for marine engineering.
- 2001 – Employed at the Maritime Faculty in Split as Junior Researcher at the scientific project No 01717007.
- 2003 – Awarded the title of Assistant Lecturer.
- 2004 – Graduated from post graduate studies at the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Shipbuilding as a Master of Science in Technical Sciences, field of Mechanical Engineering.  
Master's Thesis: *System Dynamics Simulation Modelling of the Ship Diesel Engine at Load.*
- Published over 50 scientific papers about the field of System Dynamics Computer Simulation Modelling, of which over 20 papers relate to the ship steam and gas turbines, ship engines and complex ship propulsion systems.
- Actively participated and presented his papers at 30 international scientific conferences. In the USA attended lectures and actively participated and presented his papers in several scientific conferences:
  1. ISDC 2003, 21st System Dynamics Conference in New York City, International System Dynamics Conference 2003, July 20-24, 2003, NEW YORK, USA,
  2. SCI 2004, Eighth World Multi-Conference on Systems, Cybernetics and Informatics, July 18-21, 2004, Orlando, Florida, USA,
  3. ICEIS 2005, 7th International Conference on Enterprise Information Systems, May 24-28, 2005, Miami, Florida, USA,
  4. ISDC 2005, 23rd International Conference of the System Dynamics Society, Boston, Massachusetts, USA, July 17 – 21, 2005.
- Member of SCS, *The Society for Computer Simulation International*, San Diego, USA ([www.scs.org](http://www.scs.org)), member of the *System Dynamics Society*, MIT, Cambridge, Massachusetts Institute, USA ([www.systemdynamics.org](http://www.systemdynamics.org)), member of IASTED, *The International Association of Science and Technology for Development*, Calgary, Alberta, Canada ([www.iasted.org](http://www.iasted.org))

- 2004 – 2006 appointed as the Assistant to the Dean for General Administration at the Maritime Faculty in Split,
- Appointed as the Secretary of Post Graduate studies of the Maritime Faculty in Split,
- 2004 – 2006 – Appointed as the Assistant to the Manager of the Šibenik Department of the Maritime Faculty in Split.
- Member of the Executive Committee of the Maritime Engineers Society, Split,
- 2005 – Based on the Decision of the Central Commission and Expert Commission of the Maritime Faculty in Rijeka, appointed by the Maritime Faculty in Split as the Lecturer for Technical Sciences, field of Traffic and Transport Technology, branch of Marine and River transport, for the courses *Marine Engine* and *Construction, Stability, Resistance and Propulsion of the Ship*,
- Since 2002 – monitors Training Course at the Maritime Faculty in Split for *Modelling of Ship Dynamic Processes, Modelling and Simulating Processes, Exploitation of Marine Engines* and *Exploitation of Ship Ancillary Machinery and Equipment*,
- Since 2004 – lectures the course *Construction, Stability, Resistance and Propulsion of the Ship* at the Marine Engineering Department, Nautical Department, Yachts and Marina Management Department, and monitors the corresponding training courses,
- In 2004/05 – held the courses and monitored the training courses *Business Computer Simulation* and *Manager Simulators* at the Post Graduate Studies of the Maritime faculty in Split,
- 2005 – Lectures the course *Technical Mechanics* at the Department of Maritime Management and at the Department of Marine Technology of Yachts and Marinas, the course *Means of Maritime Transport* at the Department of Maritime Nautical Science and the course *Construction, Stability, Resistance and Propulsion of the Ship* at the Department of Marine Engineering.