

Ante Munitić*
Mario Oršulić**
Joško Dvornik***
Luko Milić****

KOMPJUTORSKA SIMULACIJA I OPTIMIZACIJA BRODSKIH ELEKTRO- MEHANIČKIH SUSTAVA

Computer simulation and optimization of ship's electric-mechanical systems

ISSN 0469-6255
(178-190)

UDK 519.876.5
Prethodno priopćenje
Preliminary communication

Sažetak

Sustavno dinamičko simulacijsko modeliranje je jedna od najprimjerenijih i najuspješnijih znanstvenih načina modeliranja dinamike složenih, nelinearnih, prirodnih, tehničkih i organizacijskih sustava. Proučavanje dinamike ponašanja brodskog pogonskog sustava, kao jednog od složenih, dinamičkih, nelinearnih, tehničkih sustava, zahtijeva primjenu najučinkovitijih metoda modeliranja.

Svrha ovog rada jest: pokazati uspješnost primjene sustavno dinamičkog simulacijskog modeliranja pri istraživanju dinamike ponašanja pogonskog sustava: brodski klipni kompresor-elektromotor- BKKE-a.

Brodski klipni kompresor i njegov pogonski elektromotor, odnosno u našem slučaju asinkroni motor biti će predstavljeni u POWERSIM simulacijskom jeziku i to mentalno-verbalnim, strukturnim i matematičko-kompjutorskim modelima. Sustavno dinamički modeli su u biti kontinuirani modeli, jer se realiteti predstavljaju skupom nelinearnih diferencijalnih jednačbi, tj. "jednačbi stanja"; međutim, oni su istodobno i diskretni, jer im se osnovni vremenski korak računanja, tj. diskretizacije (uzorkovanja) "DT" određuje u potpunom skladu s "Teoremom o uzorkovanju" (Sampling Theorem) Shannona i Koteljnikova.

Ključne riječi: *sustavna dinamika, modeliranje, asinkroni motor, brodski klipni kompresor, kontinuirana i diskretna simulacija.*

Summary

System dynamic simulation modelling is one of the most applicable and the most successful scientific ways of modelling dynamic of complex, non-linear, natural, technical and organizational systems. The study of the dynamic of the behaviour of the ship's power system, as one of complex, dynamic, non-linear, technical systems requires the application of the most efficient methods of modelling.

The goal of the paper is to show the success of the application of systematic dynamic simulation modelling on researching dynamic of the behaviour of the power system ship's piston compressor motor (BKKE) and her power electric motor. I.e. in our case asynchronous motor will be surveyed in POWER simulation language and by mental-verbal, structural and mathematical and computer model. Systematic dynamic models are essentially continuous models because reality is shown by the group of non-linear differential equations, i.e. equations of the state, but they are at the same time discrete because the basic time lapse of the calculation i.e. discretizing (causing) «DT» is determined in complete compliance with the «Sampling Theorem» and Shannon and Koteljnikov theorem.

Key words: *system-dynamic, modelling, asynchronous motor, ship's piston compressor, continuous and discrete simulation.*

1. Uvod

Introduction

Sustavno dinamičko modeliranje je u biti zaseban, tj. "holistički" pristup simulaciji dinamike ponašanja prirodnih, tehničkih i organizacijskih sustava, te sadržava kvalitativno i kvantitativno simulacijsko modeliranje realiteta različite prirode. U ovom radu prikazano je sustavno dinamičko simulacijsko modeliranje dvostupnjevnanog vodom hlađenog klipnog kompresora s dva cilindra smještena pod kutem od 90° pogonjenog robusnim asinkronim motorom.

Ovaj simulacijski model BKKE je jedan maleni dio

* Prof. dr. sc. Ante Munitić, Visoka pomorska škola Split, Zrinsko-frankopanska 38
** Doc. dr.sc. Mario Oršulić, Visoka pomorska škola Split, Zrinsko-frankopanska 38
*** Joško Dvornik, dipl.ing. Visoka pomorska škola Split, Zrinsko-frankopanska 38
**** Prof. dr.sc. Luko Milić, Veleučilište u Dubrovniku, Čira Carića 4

znanstvenog makro projekta zvanog: "INTELISTENTNA KOMPJUTORSKA SIMULACIJA MODELA POMORSKIH PROCESA".

2. Sustavno dinamičko simulacijski modeli sustava "Brodski klipni kompresor - elektromotor"

System-dynamic simulating modelling of the system Ship's piston compressor - electric motor

2.1. Sustavno dinamički modeli brodskog klipnog kompresora

System-dynamic models of ship's piston compressor

Uređaje za dobavu zraka, plinova ili pare pri velikim dobavnim tlakovima nazivamo kompresorima. Strojevi za pogon kompresora mogu biti elektromotori ili dizelski motori. U klipnom kompresoru zrak se komprimira smanjivanjem volumena radnog prostora cilindra klipom. Za postizanje visokih tlakova rabe se kompresori s više stupnjeva kompresije te se obavlja kompresija s obje strane klipa, dok se za postizanje većih kapaciteta klipnog kompresora jedan stupanj kompresije izvodi u više cilindara. Na ovaj način postižu se razne kombinacije klipnog kompresora-višecilindričnih i višestupnjevanih.

Osnovne jednadžbe stanja klipnog kompresora su:

Jednadžbe stanja kompresora pri upućivanju:

Equations of the state of compressor when being activated

Za kompresor :

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{em} - M_{kom}}{M_t} \quad (s^{-2}) \dots\dots\dots 1$$

- M_t** - moment tromosti sustava (kgm²),
- M_{em}** - moment elektromotora (Nm),
- M_{kom}** - moment kompresora (Nm),
- ω** - kutna brzina vratila kompresora (1/s).

Moment kompresora računamo po sljedećoj jednadžbi:

$$M_{kom} = \frac{G \cdot W_k}{\omega}$$

- G** - masa zraka koji se usisava (kg/s)
- W_k** - rad kompresije (J/kg)

Masa zraka u procesu:

$$G = \frac{V}{v} \quad (kg)$$

- V**-volumen cilindra (m³),
- v**-specifični volumen zraka (m³/kg).

a rad kompresije:

$$W_k = \frac{n \cdot R \cdot T_1}{(n-1) \cdot \eta} \left[1 - \varepsilon^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

- n** -konstanta politropske kompresije,
- R** -plinska konstanta zraka,
- T₁**- početna temperatura zraka,
- ε** - stupanj kompresije,
- η** - stupanj iskoristivosti kompresora.

Spremnik zraka:

Air container

$$\frac{dG}{dt} = G_{kom} - G_{zup} \dots\dots\dots 2 \quad \text{- promjena količine zraka}$$

$$G_{kom} = \frac{V \cdot P_2}{R \cdot T_2} \quad \text{- kapacitet kompresora.}$$

- V_{kom}** -volumen zraka koji dobavlja kompresor (m³/s),
- G_{kom}** -kapacitet kompresora (kg/s),
- G_{zup}** -potrebna masa zraka za upućivanje (kg/s),
- P₂** -tlak na kraju kompresije (N/m²),
- T₂** -temperatura na kraju kompresije (K).

Kapacitet spremnika zraka ovisi o tom je li motor prekretan ili neprekretan.

Stoga je za prekretno motore kapacitet spremnika proračunat za 12 upućivanja, dok je za neprekretne dovoljno kapacitet izračunati za 6 upućivanja.

Pri jednom upućivanju zrak se dovodi u cilindar motora u 1/3 do 1/2 hoda klipa, prema tome približno je volumen spremnika po jednadžbi 3.

$$V = 0,42 \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot s \cdot 6 \cdot c \cdot 1,3 \dots\dots\dots 3$$

- d**- promjer cilindra motora (m),
- s**- hod klipa (m),
- c**- broj cilindara,
- 6**- broj upućivanja,
- 1,3**- uzima se 30% više od proračunate vrijednosti

Na temelju osnovnih jednadžbi moguće je izraditi model brodskog klipnog kompresora, odnosno strukturni dijagram i dijagram toka brodskog klipnog kompresora.

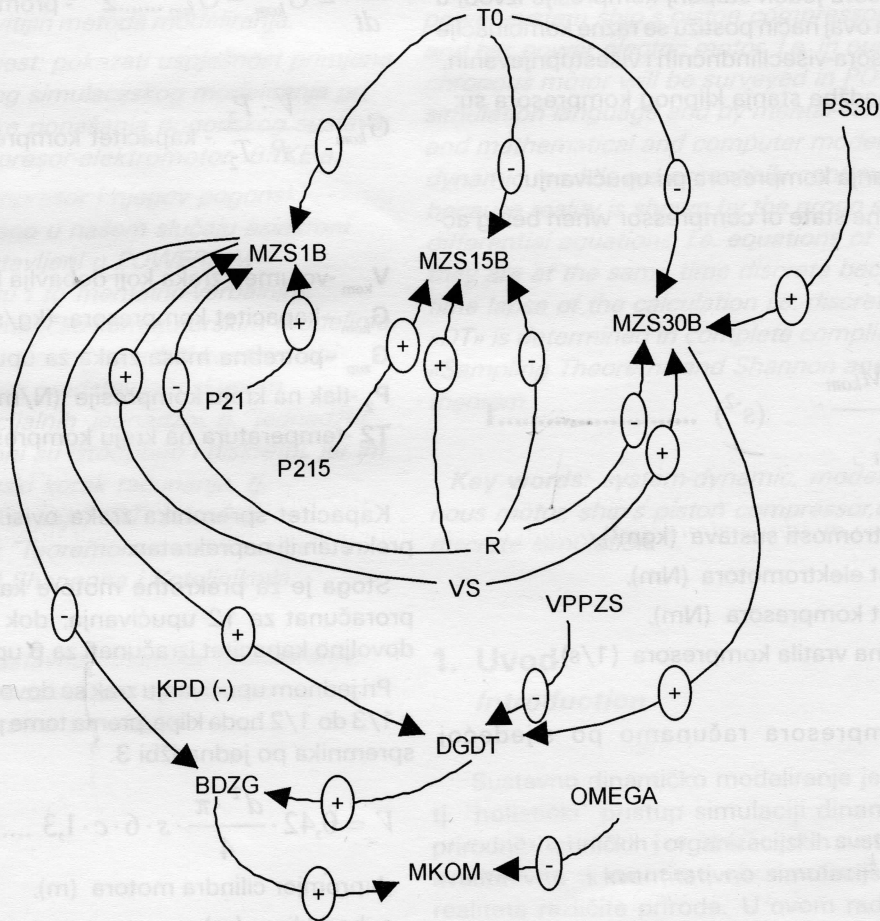
Na temelju osnovnih jednadžbi moguće je izraditi dijagram toka, mentalno-verbalni i strukturni dijagram brodskog klipnog kompresora.

Popis oznaka i način zapisa u POWERSimu brodskog klipnog kompresora:

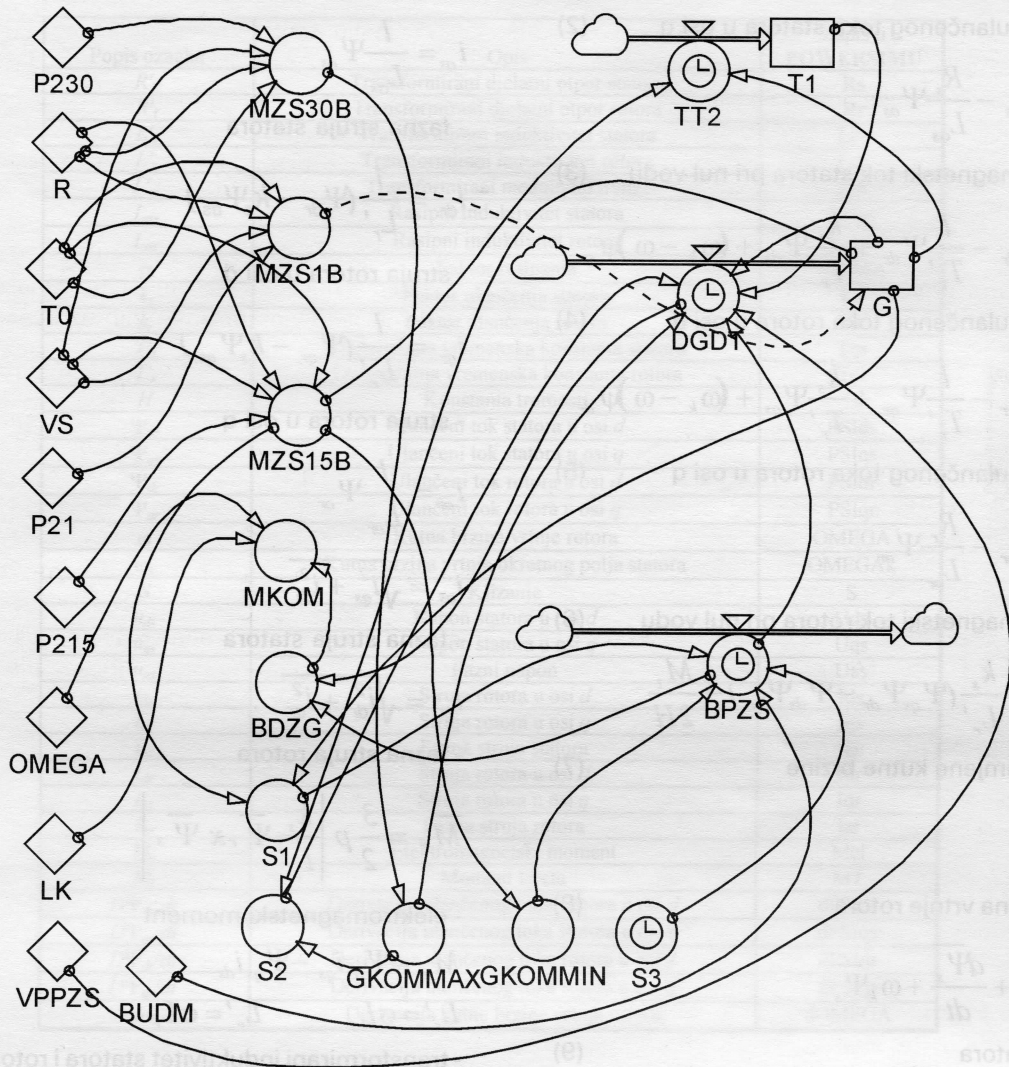
Mentalno-verbalni model:

- BDZG -brzina davanja zračne mase, tj. kapacitet kompresora (kg/s),
- BPZS -brzina trošenja zraka iz zračnog spremnika (kg/s),
- DGDT-brzina promjene količine zraka (kg/s),
- S1,2,3 - logičke sklopke,
- G -stanje mase zraka u zračnom spremniku (kg),
- OMEGA -stanje kutne brzine (1/s),
- MKOM -okretni moment kompresora (Nm),
- T1-vremenski brojač početka drugog punjenja,
- R- plinska konstanta (J/kgK),
- P21,P230,P215- tlakovi u radu kompresora (Pa),
- TO -temperatura okoline (K),
- VS- volumen spremnika (m³),
- VPPZS -vrijeme prvog punjenja zračnog kompresora.

Ako raste temperatura okoline smanjuje se masa zraka u spremniku pri različitim tlakovima, iz čega slijedi negativan predznak promatranih uzročno posljedičnih veza. Ako raste volumen spremnika, rastu i mase zraka (količina) u spremniku pa je promatrana UPV pozitivna. Ako rastu tlakovi (atmosferski, tlak pri 15 bar., tlak pri 30 bar.) rastu i mase zraka u tim točkama pa je i promatrana UPV pozitivna. Ako raste masa zraka (količina) u stanju pri atmosferskom tlaku kao i pri tlaku od 30 bar. raste brzina promjene količine zraka u zračnom spremniku pa je UPV pozitivna. Ako raste brzina promjene količine zraka u zračnom spremniku, raste i brzina davanja zračne mase pa je UPV pozitivna. Ako raste masa zraka (količina) u stanju pri atmosferskom tlaku, pada brzina davanja zračne mase pa je promatrana UPV negativna. Ako raste brzina davanja zračne mase, raste i moment kompresora pa je UPV pozitivna.



Sl. 2.1.2. Dijagram toka brodskog klipnog kompresora
Fig.2.1.2. The diagram of the process of ship's piston compressor



Sl. 2.1.3. Strukturni dijagram brodskog klipnog kompresora

Fig. 2.1.3. Structural diagram of ship's piston compressor

2.2. Sustavno dinamički simulacijski modeli asinkronog motora

Systematic dynamic simulation model of asynchronous motor

U ovom poglavlju izradit ćemo model jednadžbi stanja asinkronog motora kao i simulacijski model motora u cijelosti.

Jednadžbe stanja dinamičkog sistema predstavljaju skup nelinearnih (i linearnih) jednadžbi koje determiniraju dinamičko ponašanje svih varijabli odnosno cjeline dinamičkog sustava. Ponašanje asinkronih strojeva u dinamičkim režimima rada opisano je sustavom nelinearnih diferencijalnih jednadžbi. Za istraživanje ponašanja asinkronog motora, napajano iz simetričnog sinusoidalnog izvora promjenjivog napona i frekvencije, u stacionarnim dinamičkim režimima rada, važna je činjenica da se asinkroni motor može svesti na dvoosni model s cilindričnim statorom i rotorom, odnosno na

električni motor s konstantnim zračnim rasporedom. Osim što zbog te strukturne simetrije motor ima iste parametre u uzdužnoj i poprečnoj osi, ona je važna i zbog toga što nam omogućava da na motor primijenimo koordinatni sustav koji rotira proizvoljnom kutnom brzinom ω_k . Kod tog koordinatnog sustava realnu os označavamo s malim slovom d , a imaginarnu os s malim slovom q . Zato diferencijalne jednadžbe koje predstavljaju matematički model asinkronog motora možemo pisati i u transformiranim koordinatama.

Osnovne jednadžbe asinkronog motora su:

$$\frac{d\Psi_{ds}}{dt} = u_{ds} - \frac{l}{T_s'} \Psi_{ds} + \frac{k_r}{T_s'} \Psi_{dr} + \omega_k \Psi_{qs} \quad (1)$$

- derivacija ulančenog toka statora u osi d

$$\frac{d\Psi_{qs}}{dt} = u_{qs} - \frac{l}{T_s'} \Psi_{qs} + \frac{k_r}{T_s'} \Psi_{qr} - \omega_k \Psi_{ds}$$

- derivacija ulančenog toka statora u osi q (2)

$$\frac{d\Psi_{os}}{dt} = u_{os} - \frac{R_s}{L_{\sigma s}} \Psi_{os}$$

- ulančeni magnetski tok statora pri nul vodu (3)

$$\frac{d\Psi_{dr}}{dt} = u_{dr} - \frac{l}{T_r'} \Psi_{dr} + \frac{k_s}{T_r'} \Psi_{ds} + (\omega_k - \omega) \Psi_{qr}$$

- derivacija ulančenog toka rotora u osi d (4)

$$\frac{d\Psi_{qr}}{dt} = u_{qr} - \frac{l}{T_r'} \Psi_{qr} + \frac{k_s}{T_r'} \Psi_{qs} + (\omega_k - \omega) \Psi_{dr}$$

- derivacija ulančenog toka rotora u osi q (5)

$$\frac{d\Psi_{or}}{dt} = u_{or} - \frac{R_r}{L_{or}} \Psi_{or}$$

- ulančeni magnetski tok rotora pri nul vodu (6)

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{l}{2H} \frac{k_s}{L_r'} (\Psi_{qs} \Psi_{dr} - \Psi_{ds} \Psi_{qr}) - \frac{M_t}{2H}$$

- brzina promjene kutne brzine (7)

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega$$

- kutna brzina vrtnje rotora (8)

$$\bar{u}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} + \omega_k \bar{\Psi}_s$$

- napon statora (9)

$$\bar{u}_r = R_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + (\omega_k - \omega) \bar{\Psi}_r$$

- napon rotora (10)

$$\bar{i}_s = \frac{l}{L_s'} (\Psi_s - k_r \bar{\Psi}_r)$$

- struja statora (11)

$$\bar{i}_r = \frac{l}{L_r'} (\bar{\Psi}_r - k_s \bar{\Psi}_s)$$

- struja rotora (12)

$$H = \frac{l J \omega_B}{2 p M_B}$$

- konstanta tromosti (13)

$$i_{ds} = \frac{l}{L_s'} (\Psi_{ds} - k_r \Psi_{dr})$$

- struja statora u osi d (14)

$$i_{qs} = \frac{l}{L_s'} (\Psi_{qs} - k_r \Psi_{qr})$$

- struja statora u osi q (15)

$$i_{os} = \frac{l}{L_{\sigma s}} \Psi_{os}$$

- fazna struja statora (16)

$$i_{dr} = \frac{1}{L_r'} (\Psi_{dr} - k_s \Psi_{ds})$$

- struja rotora u osi d (17)

$$i_{qr} = \frac{l}{L_r'} (\Psi_{qr} - k_s \Psi_{qs})$$

- struja rotora u osi q (18)

$$i_{or} = \frac{l}{L_{or}} \Psi_{or}$$

$$i_{as} = \sqrt{i_{qs}^2 + i_{ds}^2}$$

- fazna struja statora (20)

$$i_{ar} = \sqrt{i_{dr}^2 + i_{qr}^2}$$

- fazna struja rotora (21)

$$\bar{M}_e = \frac{3}{2} p \left| \frac{k_s}{L_r'} \bar{\Psi}_r \times \bar{\Psi}_s \right|$$

- elektromagnetski moment (22)

$$M_e = \Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}$$

$$L_s' = \sigma L_s \quad L_r' = \sigma L_r$$

- transformirani induktivitet statora i rotora (24)

$$k_s = \frac{L_m}{L_s} \quad k_r = \frac{L_m}{L_r}$$

- faktor ulančenja statora i rotora (25)

$$T_s' = \frac{L_s'}{R_s} \quad T_r' = \frac{L_r'}{R_r}$$

- tranzijentna vremenska konstanta statora i rotora (26)

$$\sigma = l - k_r k_s$$

- faktor rasipanja (27)

Temeljem danog matematičkog modela asinkronog motora mogu se izraditi sustavske dinamičke simulacijske, tj. mentalno-verbalni, strukturni i kompjutorski modeli.

Za prvu diferencijalnu jednadžbu stanja asinkronog motora (1) vrijedi sljedeća uzročno-posljedična ovisnost:

Ako raste varijabla Ψ_{ds} , smanjuje se brzina promjene stanja sustava $d\Psi_{ds}$, iz čega slijedi negativan (-) predznak promatrane uzročno-posljedične veze. Konstanta k_r koja predstavlja faktor ulančenja rotora, svojim porastom povećava promjenu stanja sustava, iz čega slijedi pozitivan (+) predznak promatrane UPV. Ako raste umnožak $\omega_k \Psi_{qs}$ i ako raste promjena napona u_{ds} raste i brzina promjene stanja sustava što ima za uzrok pozitivan (+) predznak promatrana UPV.

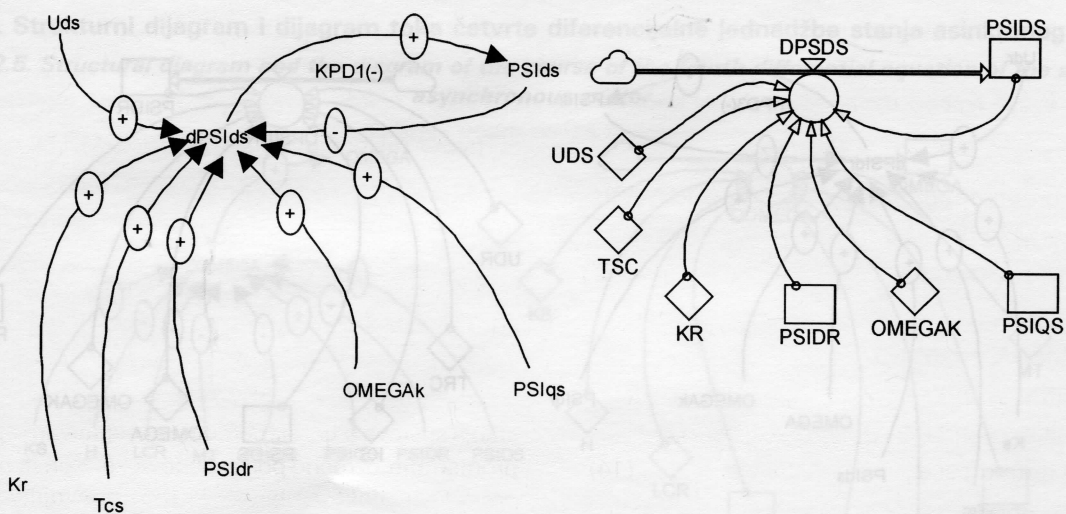
Popis oznaka	Opis	Zapis u POWERSIMU
R'_s	Transformirani djelatni otpor statora	Rs
R'_r	Transformirani djelatni otpor rotora	Rr
L'_s	Transformirani induktivitet statora	Lcs
L'_r	Transformirani induktivitet rotora	Lcr
L_m	Transformirani međuinduktivitet	Lm
$L_{\sigma s}$	Rasipni induktivitet statora	Lsigs
$L_{\sigma r}$	Rasipni induktivitet rotora	Lsigr
σ	Faktor rasipanja	SIGMA
k_s	Faktor ulančenja statora	Ks
k_r	Faktor ulančenja rotora	Kr
T'_s	Tranzijentna vremenska konstanta statora	Tcs
T'_r	Tranzijentna vremenska konstanta rotora	Trc
H	Konstanta tromosti	H
Ψ_{ds}	Ulančeni tok statora u osi d	PSIds
Ψ_{qs}	Ulančeni tok statora u osi q	PSIqs
Ψ_{dr}	Ulančeni tok rotora u osi d	PSIdr
Ψ_{qr}	Ulančeni tok rotora u osi q	PSIqr
ω	Kutna brzina vrtnje rotora	OMEGA
ω_k	Kutna brzina vrtnje okretnog polja statora	OMEGAK
S	Klizanje	S
u_{ds}	Napon statora u osi d	Uds
u_{qs}	Napon statora u osi q	Uqs
u_{as}	Fazni napon	Uas
i_{ds}	Struja rotora u osi d	Ids
i_{qs}	Struja rotora u osi q	Iqs
i_{as}	Fazna struja statora	Ias
i_{dr}	Struja rotora u osi d	Idr
i_{qr}	Struja rotora u osi q	Iqr
i_{ar}	Fazna struja rotora	Iar
M_e	Elektromagnetski moment	Mel
M_l	Moment tereta	MT
$D\Psi_{ds}/dt$	Derivacija ulančenog toka statora u osi d	dPSIds
$D\Psi_{qs}/dt$	Derivacija ulančenog toka statora u osi q	dPSIqs
$D\Psi_{dr}/dt$	Derivacija ulančenog toka rotora u osi d	dPSIdr
$D\Psi_{qr}/dt$	Derivacija ulančenog toka rotora u osi q	dPSIqr
$d\omega$	Derivacija kutne brzine vrtnje rotora	dOMEGA

Tablica 2.2.1. Popis oznaka i način zapisa u POWERSimu simulacijskom jeziku

Table 2.2.1. The list of signs and the way of records in POWER sim simulation language

Na temelju navedenog modela, koji je dan u obliku uzročno-posljedične ovisnosti između elemenata sustava, moguće je izraditi mentalno-verbalni model jednadžbe

stanja asinkronog motora uz pomoć kojeg se izrađuje strukturni model te dijagram toka navedene jednadžbe, SI.2.2.2.



SI.2.2.2. Strukturni dijagram i dijagram toka prve diferencijalne jednadžbe stanja asinkronog motora

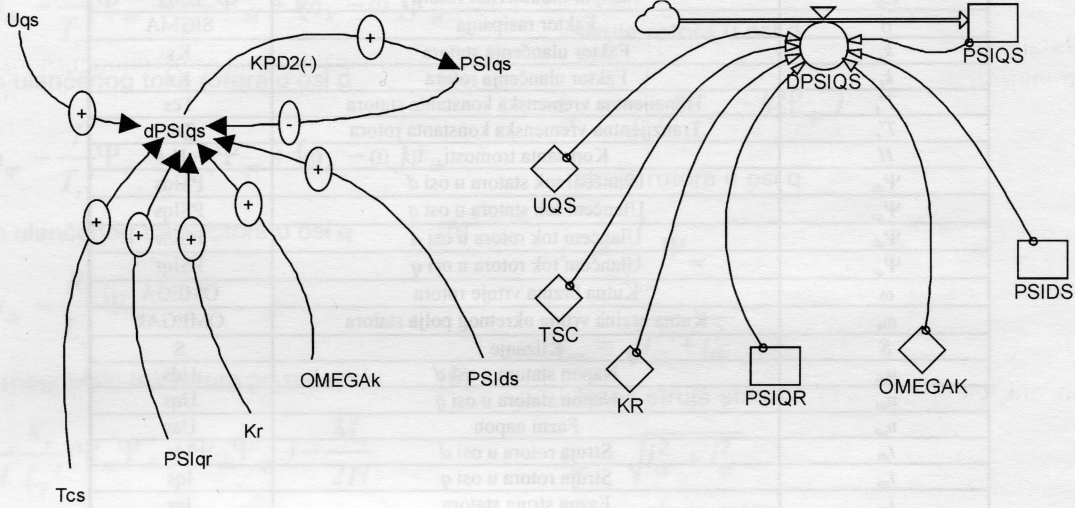
Fig. 2.2.2. Structural diagram and the diagram of the process of the first differential equation of the state of asynchronous motor

Za drugu diferencijalnu jednadžbu stanja asinkronog motora (2) vrijedi sljedeća uzročno-posljedična ovisnost:

Ako raste varijabla ω_{qs} tada će se brzina promjene stanja sustava smanjivati, što znači negativan (-) predznak UPV. Faktor ulančenja rotora k_r svojim porastom povećava promjenu stanja sustava, što znači

strukturni dijagram i dijagram toka druge diferencijalne jednadžbe stanja asinkronog motora, SI.2.2.3.

Za treću diferencijalnu jednadžbu stanja asinkronog motora (4) vrijedi sljedeća uzročno-posljedična ovisnost:



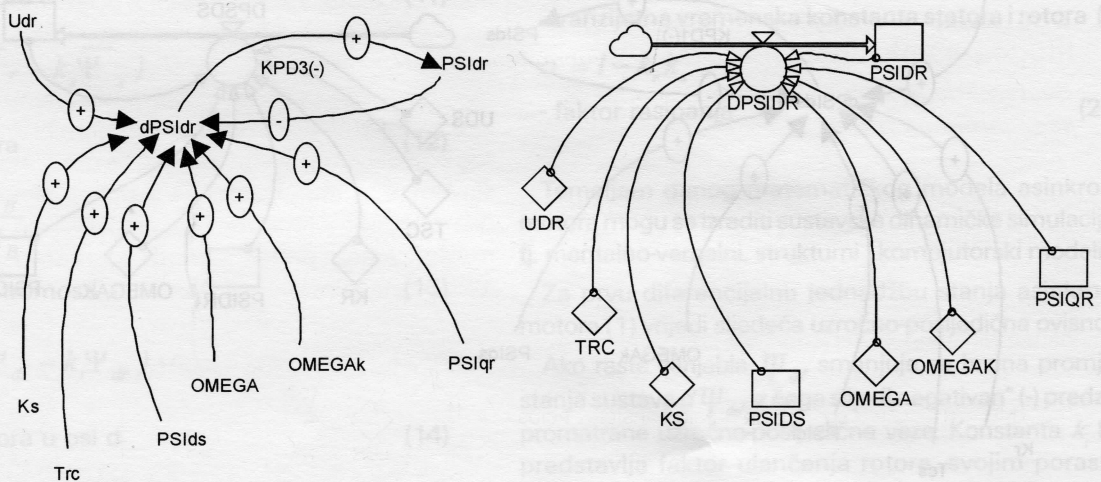
SI.2.2.3. Strukturni dijagram i dijagram toka druge diferencijalne jednadžbe stanja asinkronog motora

Fig. 2.2.3. Structural diagram and diagram of the process of the second differential equation of the state of asynchronous motor

pozitivan (+) predznak UPV. Porastom tranzijentne vremenske konstante smanjuje se promjena stanja sustava što za uzrok ima negativan (-) predznak UPV. Porastom umnoška $\omega_k \Psi_{ds}$ brzina promjene stanja sustava će se zbog negativnog predznaka smanjivati, što znači negativan (-) predznak promatrane UPV. Napon u_{qs} će svojim porastom povećavati promjenu stanja sustava, što znači pozitivan (+) predznak u promatranoj UPV.

Ako raste varijabla Ψ_{dr} tada će se brzina promjene stanja sustava smanjivati, što znači negativan predznak promatrane UPV. Faktor ulančenja statora k_s kao i ulančeni tok Ψ_{ds} svojim porastom povećavaju i promjenu stanja sustava pa imaju pozitivan (+) predznak u promatranoj UPV. Povećanjem tranzijentne vremenske konstante rotora kao i povećanjem brzine vrtnje rotora ω ima za posljedicu smanjenje brzine promjene stanja sustava, što znači negativan (-) predznak u promatranoj UPV. Povećanjem brzine vrtnje okretnog magnetskog

Na temelju mentalno-verbalnog modela izrađeni su



SI.2.2.4. Strukturni dijagram i dijagram toka treće diferencijalne jednadžbe stanja asinkronog motora

Fig. 2.2.4. Structural diagram and the diagram of the course of the third differential equation of the state of asynchronous motor

polja statora ω_k kao i ulančenog toka Ψ_{qr} raste i brzina promjene stanja sustava, što znači pozitivan (+) predznak u promatranim UPV. Napon u_{dr} će svojim porastom povećati promjenu stanja sustava pa ima i pozitivnu (+) UPV. Smanjenje brzine promjene stanja sustava, što znači negativan (-) predznak u promatranom UPV. Povećanjem brzine vrtnje okretnog magnetskog polja statora ω_k kao i ulančenog toka Ψ_{qr} raste i brzina promjene stanja sustava, što znači pozitivan (+) predznak u promatranim UPV.

Strukturni dijagram i dijagram toka treće diferencijalne jednačbe stanja asinkronog motora prikazan je na sl.2.2.4.

Za četvrtu diferencijalnu jednačbu stanja asinkronog motora (5) vrijedi sljedeća uzročno-posljedična ovisnost:

ako raste varijabla Ψ_{qr} tada će se brzina promjene stanja sustava smanjivati, što znači negativan (-) predznak promatrane UPV. Faktor ulančenja statora k_s kao i ulančeni tok Ψ_{qs} svojim porastom povećavaju promjenu stanja sustava, znači pozitivan (+) predznak UPV. Porastom tranzijentne vremenske konstante, kao i porastom brzine vrtnje okretnog magnetskog polja

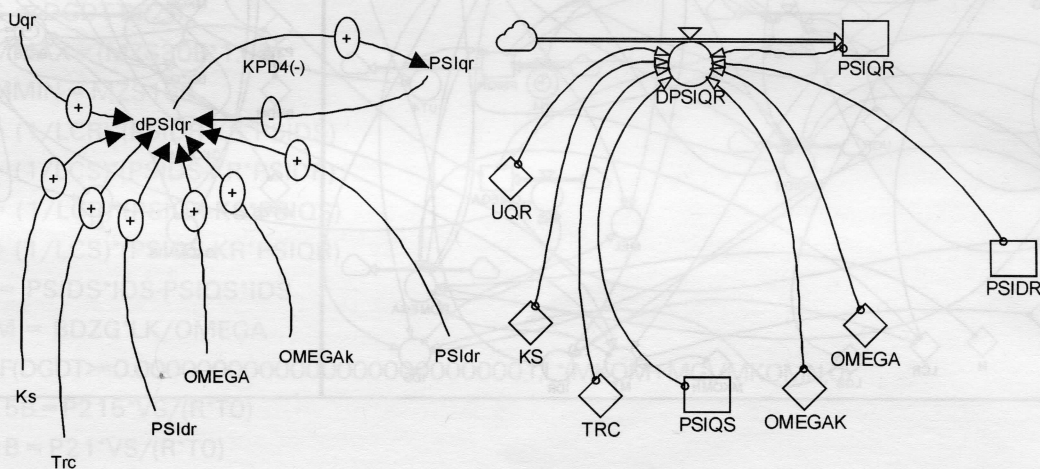
statora ω_k ima za posljedicu smanjenje brzine promjene stanja sustava, što znači negativan (-) predznak UPV. Rast brzine vrtnje rotora ω i ulančenog toka Ψ_{dr} izaziva i rast promjene stanja sustava, iz čega slijedi pozitivan (+) predznak promatrane UPV.

Strukturni dijagram kao i dijagram toka četvrte diferencijalne jednačbe stanja asinkronog motora prikazani su na sl.2.2.5.

U petoj jednačbi stanja asinkronog motora (7) nema kruga povratnog djelovanja. Promjena brzine vrtnje rotora asinkronog motora $d\omega$, odnosno derivacija brzine vrtnje, svojim rastom povećava se i derivacija kuta zakreta rotora to jest brzina promjene kuta zakreta rotora $d\theta$ jer je $\omega = d\theta / dt$. Konstanta tromosti H i transformirani induktivitet rotora L_r te moment tereta M_r svojim rastom smanjuju derivaciju brzine vrtnje $d\omega$, dok se faktor ulančenja statora k_s svojim povećanjem povećava.

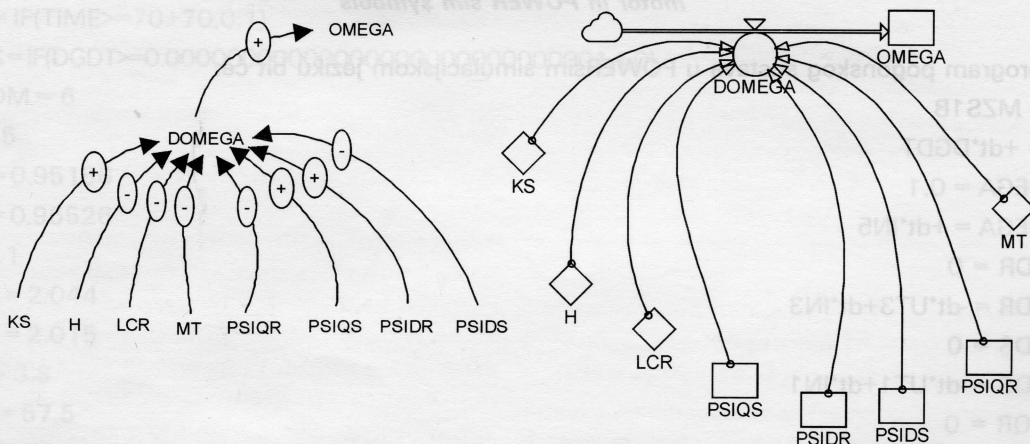
Ako se ulančeni tokovi Ψ_{qs} i Ψ_{dr} povećavaju, povećat će se i $d\omega$, no ako se povećavaju Ψ_{ds} odnosno Ψ_{qr} $d\omega$ će se smanjiti.

Strukturni dijagram kao i dijagram toka prikazani su na slici 2.2.6.



Sl.2.2.5. Strukturni dijagram i dijagram toka četvrte diferencijalne jednačbe stanja asinkronog motora

Fig. 2.2.5. Structural diagram and the diagram of the course of the fourth differential equation of the state of asynchronous motor



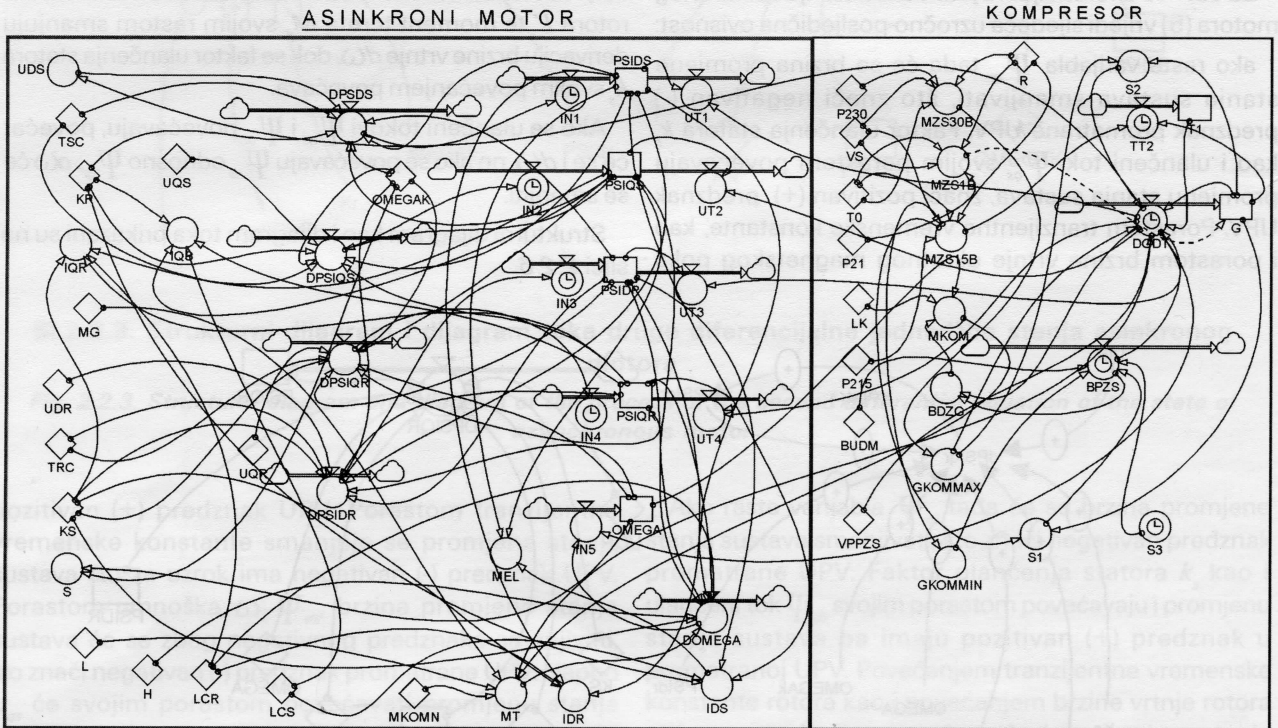
Sl.2.2.6. Strukturni dijagram i dijagram toka pete diferencijalne jednačbe stanja asinkronog motora

Fig. 2.2.6. Structural diagram and the diagram of the course of the fifth differential equation of the state of asynchronous motor

3. Kompjutorsko simulacijski model sustava BKKE u POWERsim simulacijskom jeziku

Computer simulation model of the system BKK in POWER sim simulation language

Sve navedene jednadžbe stanja zajedno tvore globalni dijagram toka dinamičkog sustava: BKKE – brodski klipni kompresor – asinkroni motor koji je prikazan na slici 3.1.



Sl. 3.1. Globalni sustav dinamički model pogonskog sustava brodskog klipnog kompresora pogonjenog asinkronim motorom u POWERsim simbolici.

Fig. 3.1. Global system dynamic model of the power sistem ship's piston compressor powered by asynchronous motor in POWER sim symbols

Listing program pogonskog sustava u POWERsim simulacijskom jeziku bit će:

```

init   G = MZS1B
flow   G = +dt*DGDT
init   OMEGA = 0.1
flow   OMEGA = +dt*IN5
init   PSIDR = 0
flow   PSIDR = -dt*UT3+dt*IN3
init   PSIDS = 0
flow   PSIDS = -dt*UT1+dt*IN1
init   PSIQR = 0
flow   PSIQR = -dt*UT4+dt*IN4
init   PSIQS = 0
flow   PSIQS = -dt*UT2+dt*IN2
    
```

```

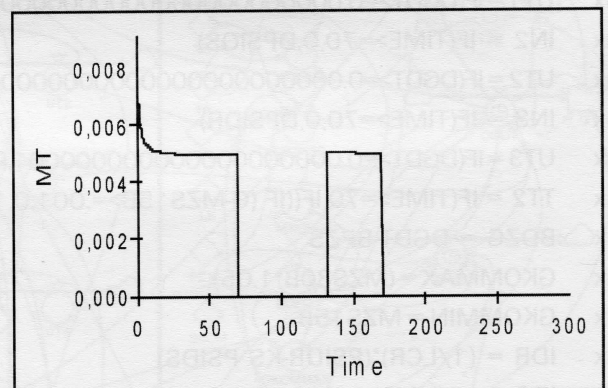
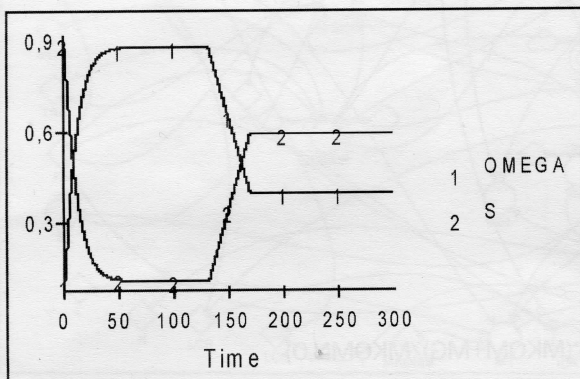
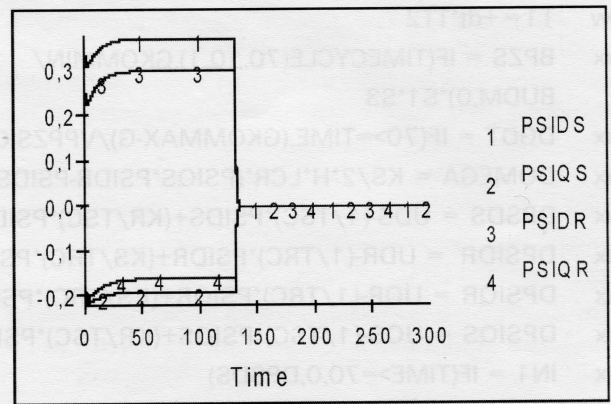
init      T1 = 0
flow      T1 = +dt*TT2
aux       BPZS = IF(TIME<70,0,1),GKOMMIN/
          BUDM,0)*S1*S3
aux       DGDT = IF(70>=TIME,(GKOMMAX-G)/VPPZS,0)-BPZS+IF(T1>=TIME,(GKOMMAX-G)/VPPZS,0)*S2
aux       DOMEGA = KS/2*H*LCR*(PSIQS*PSIDR-PSIDS*PSIQR)-MT/2*H
aux       DPSDS = UDS-(1/TSC)*PSIDS+(KR/TSC)*PSIDR+OMEGAK*PSIQS
aux       DPSIDR = UDR-(1/TRC)*PSIDR+(KS/TRC)*PSIDS+(OMEGAK-OMEGA)*PSIQR
aux       DPSIQR = UQR-(1/TRC)*PSIQR+(KS/TRC)*PSIQS-(OMEGAK-OMEGA)*PSIDR
aux       DPSIQS = UQS-(1/TSC)*PSIQS+(KR/TSC)*PSIQR-OMEGAK*PSIDS
aux       IN1 = IF(TIME>=70,0,DPSDS)
aux       IN4 = IF(TIME>=70,0,DPSIQR)
aux       UT4 = IF(DGDT>=0.00000000000000000000000001,PSIQR,0)
aux       IN5 = IF(DGDT>=0.00000000000000000000000001,DOMEGA,0)
aux       UT1 = IF(DGDT>=0.00000000000000000000000001,PSIDS,0)
aux       IN2 = IF(TIME>=70,0,DPSIQS)
aux       UT2 = IF(DGDT>=0.00000000000000000000000001,PSIQS,0)
aux       IN3 = IF(TIME>=70,0,DPSIDR)
aux       UT3 = IF(DGDT>=0.00000000000000000000000001,PSIDR,0)
aux       TT2 = IF(TIME>=70,IF((IF (G-MZS15B>=.001,0,1)=0),0,TIME),0)
aux       BDZG = DGDT-BPZS
aux       GKOMMAX = (MZS30B*1.05)
aux       GKOMMIN = MZS15B
aux       IDR = (1/LCR)*(PSIDR-KS*PSIDS)
aux       IDS = (1/LCS)*(PSIDS-KR*PSIDR)
aux       IQR = (1/LCR)*(PSIQR-KS*PSIQS)
aux       IQS = (1/LCS)*(PSIQS-KR*PSIQR)
aux       MEL = PSIDS*IDS-PSIQS*IDS
aux       MKOM = BDZG*LK/OMEGA
aux       MT = IF(DGDT>=0.00000000000000000000000001,L*(MKOM+MG)/MKOMN,0)
aux       MZS15B = P215*VS/(R*T0)
aux       MZS1B = P21*VS/(R*T0)
aux       MZS30B = P230*VS/(R*T0)
aux       S = (OMEGAK-OMEGA)/OMEGAK
aux       S1 = IF(G>=MZS15B,1,0)
aux       S2 = IF(G>=GKOMMAX,0,1)
aux       S3 = IF(TIME>=70+70,0,1)
aux       UDS = IF(DGDT>=0.00000000000000000000000001,1,0)
const    BUDM = 6
const    H = 5
const    KR = 0.95156
const    KS = 0.96526
const    L = .1
const    LCR = 2.044
const    LCS = 2.015
const    LK = 3.8
const    MG = 57.5
const    MKOMN = 1150
const    OMEGAK = 1
const    P21 = 100000

```

const P215 = 1500000
 const P230 = 3000000
 const R = 287
 const T0 = 303
 const TRC = 0.18304
 const TSC = 0.19736
 const UDR = 0
 const UQR = 0
 const UQS = 1E-10
 const VPPZS = 20
 const VS = 0.355

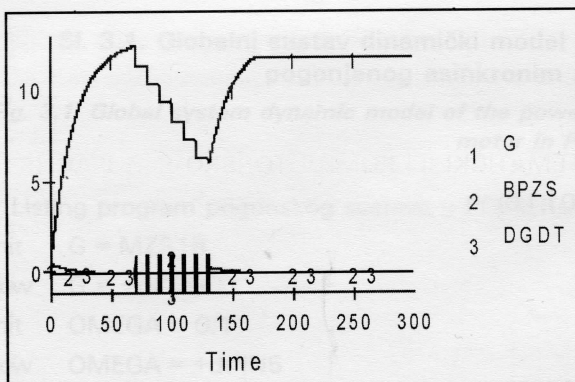
3.1. Grafički i tabelarni rezultati simulacije
Graphic and table results of the simulation

Scenarij, dinamike pogona brodskog klipnog kompresora pogonjenog asinkronim motorom obuhvaća I punjenje, I pražnjenje, II punjenje i II pražnjenje zračnog spremišta. Grafički rezultati simulacije:



SI.3.1.2. Ulančeni tokovi statora i rotora asinkronog motora te moment tereta

Fig. 3.1.2. Chain processes of the stator and rotor of the asynchronous motor and the moment of the cargo



SI.3.1.1. Kutna brzina, klizanje asinkronog motora te stanje mase zraka u zračnom spremniku, brzina promjene količine zraka te brzina trošenja zraka.

Fig.3.1.1. Angular speed, shipping of asynchronous motor and the state of air masses in an air container, the speed of the exchange of the quantity of air and the speed of air consumption

Komentar simulacije:
The comment of the simulation

Prikazani dijagrami i tabelarni podaci ukazuju na validnost dinamičkog ponašanja ovog pogonskog sustava te se može zaključiti da za pogon brodskog klipnog kompresora u potpunosti odgovara robusni asinkroni motor koji zadovoljava sve njegove specifične zahtjeve.

4. Zaključak
Conclusion

Sustavna dinamika je takva znanstvena metodologija koja omogućuje simulacije najsloženijih sustava. Primjena sustavno-dinamičko-simulacijskog modeliranja za različita opterećenja u eksploataciji pri pogonu asinkronim motorom brodskog klipnog kompresora manifestira pogodnosti primjenjivih metoda kompijutorske simulacije kako za edukaciju mladih stručnjaka (trenažiranje) tako i za dizajniranje složenih elektromehaničkih sustava te omogućuje svakom potrebitom stručnjaku da sam na brz i znanstveno

Time	OMEGA	G	DGDT	IDS	S
0	0,10	0,408	1,25	0,00	0,90
10	0,508	5,35	0,375	0,0445	0,492
20	0,746	8,31	0,227	0,0433	0,254
30	0,837	10,11	0,138	0,043	0,163
40	0,869	11,19	0,0834	0,0429	0,131
50	0,88	11,85	0,0505	0,0429	0,12
60	0,883	12,25	0,0306	0,0429	0,117
70	0,885	12,49	-1,00	0,0429	0,115
80	0,885	11,47	-1,02	0,0429	0,115
90	0,885	10,45	-1,02	0,0429	0,115
100	0,885	9,43	-1,02	0,0429	0,115
110	0,885	8,41	-1,02	0,0429	0,115
120	0,885	7,39	-1,02	0,0429	0,115
130	0,885	6,37	-1,02	0,0429	0,115
140	0,781	8,44	0,221	0,00000498	0,219
150	0,654	10,18	0,134	1,322552e-10	0,346
160	0,528	11,24	0,0811	3,512883e-15	0,472
170	0,402	11,88	0,0491	9,330707e-20	0,598
180	0,399	11,89	0,00	7,557873e-20	0,601
190	0,399	11,89	0,00	7,557873e-20	0,601
200	0,399	11,89	0,00	7,557873e-20	0,601
210	0,399	11,89	0,00	7,557873e-20	0,601
220	0,399	11,89	0,00	7,557873e-20	0,601
230	0,399	11,89	0,00	7,557873e-20	0,601
240	0,399	11,89	0,00	7,557873e-20	0,601
250	0,399	11,89	0,00	7,557873e-20	0,601
260	0,399	11,89	0,00	7,557873e-20	0,601
270	0,399	11,89	0,00	7,557873e-20	0,601
280	0,399	11,89	0,00	7,557873e-20	0,601
290	0,399	11,89	0,00	7,557873e-20	0,601
300	0,399	11,89	0,00	7,557873e-20	0,601

Tablica 3.1.3. Prikaz rezultata parametara simulacije BKKE

Table 3.1.3. The survey of the results of the parameters of the simulation of BKKE

utemeljen način istraživanja složenih sustava stekne dopunska znanja o istom sustavu. U radu su predstavljeni sustavno dinamički kvalitativni (mentalno-verbalni, strukturni i dijagramsko-tokovni) i kvalitativni (matematički i kompjutorski) modeli složenog nelinearnog sustava BKKE-a. Iz ovog rada moguće je doći do globalnog zaključka da je brodski klipni kompresor specifičan potrošač kojemu u potpunosti odgovara pogon pomoću robusnog asinkronog motora. Na kraju možemo citirati kinesku poslovicu koja glasi:

“Kad čujem, zaboravim. Kad vidim, zapamtim. Kad radim, shvatim” odnosno možemo je napisati sustavno-dinamički:

“KAD ČUJEM MENTALNO-VERBALNI MODEL DINAMIČKOG PROCESA, ZABORAVIM.” “KADA VIDIM STRUKTURNI MODEL I REALNOST DINAMIČKOG PROCESA, ZAPAMTIM.” “KADA NAPRAVIM

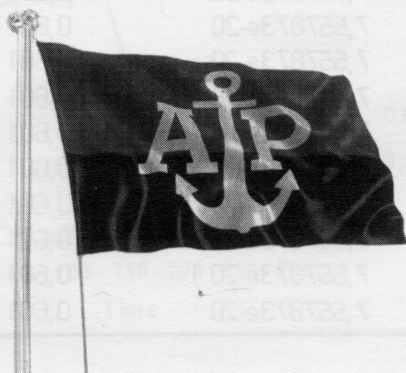
MATEMATIČKI ILI KOMPJUTORSKO SIMULACIJSKI MODEL DINAMIČKOG PROCESA NAUČIM.” “KADA NAPRAVIM SIMULACIJU ILI VJEŽBU, SUSTAV DINAMIČKOG MODELA ILI DINAMIČKOG PROCESA, NAPRAVIT ĆU OSVJEŽENJE SA SVOJIM STEČENIM TEORETSKIM I PRAKTIČNIM ZNANJEM O DINAMIČKOM PROCESU.”

Literatura

References

- [1] Forrester, Jay W. 1973/1971., *Principles of Systems*, MIT Press, Cambridge Massachusetts, USA,
- [2] Jadric, M. and Francic, B., *Dinamika električnih strojeva (in Croatian)*, MANUALIA UNIVERSITATIS STUDIORUM SPALATIENSIS, GRAPHICS, Zagreb, Croatia, 1996.
- [3] Munitić, A. and Milić, L. and Miliković, M., *System Dynamics Computer Simulation Model of the Marine Diesel-Drive Generation Set 997. Automatic Control System*, IMACS World Congress on Scientific Computation, Modelling and Applied Mathematics, vol.5, Wiissenschaft & Technik Verlag, Berlin, 1997.
- [4] Munitić, A., *Kompjutorska simulacija uz pomoć systemske dinamike, (in Croatian)*, BIS, Split, Croatia, 1989.
- [5] Jankov, R., *Klipni kompresori*, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet Beograd, 1984.
- [6] Munitić, A., *Application Possibilities of System Dynamics Modelling*, System Dynamics, Edited by Susan Spencer and George Richardson, Proceedings of the SCS Western Multiconference, San Diego, California, A Society for Computer Simulation International, San Diego, USA, 1989.
- [7] Richardson, George P. and Pugh III Aleksander L., *Introduction to System Dynamics Modelling with Dynamo*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 1981.
- [8] Munitić A., Milić L., Bupić M., *System Dynamics Simulation Modeling and Heuristic Optimization of the Induction Motor*, Simulation Symposium, Marseille, France, Oct. 18-20, 2001
- [9] Frenkel, M., *Poršneviye kompresori*, MAŠGV 12, Moskva, 1960.
- [10] Munitić, A., Oršulić, M., Krčum M., Dvornik, J., *Sustavsko dinamičko simulacijsko modeliranje pogonskog sustava, Brodsko sidreno vitlo pogonjeno asinkronim motorom*, Naše more, Dubrovnik, 2002.

Rukopis primljen: 8.11..2002.



ATLANTSKA PLOVIDBA d.d.

Dubrovnik, Hrvatska - Croatia

**PREVOZI ROBU U SLOBODNOJ
PLOVIDBI PO SVIM MORIMA SVIJETA.**

**OD SV. MIHAJLA 1
POŠT. PRET. 192**

**OBAVLJA PRIJEVOZ TEŠKIH I
IZVANGABARITNIH TERETA
SPECIJALIZIRANIM BRODOVIMA.**

**TEL: (020) 412 - 666
FAX: (020) 356 - 148
TLX: 27584 ATLANT RH
27684 ATLANT RH**

**PREVOZI ROBU U MALOJ
OBALNOJ PLOVIDBI.**