

Marijo Oršulić\*

ISSN 0469-6255  
(96-104)

STROJARSTVO

# SIMULACIJA DINAMIKE PONAŠANJA SUSTAVA ZA PRETVORBU ENERGIJE STRUJANJA PLINOVA

## *Simulation of behaviour dynamics of the system for conversion of flow gas energy*

UDK 621.165\*519.876.5  
Prethodno priopćenje  
*Preliminary communication*

### Sažetak

Sustavno dinamičko simulacijsko modeliranje jedan je od najprimjerenijih i najdjelotvornijih znanstvenih načina modeliranja dinamike složenih, nelinearnih, prirodnih, tehničkih i organizacijskih sustava. Ta se metodologija u dosadašnjoj praksi pokazala valjanom pri rješavanju problematike upravljanja, osjetljivosti i fleksibilnosti dinamike ponašanja sustava koji imaju visoki stupanj složenosti, i to kompjutorskim simuliranjem, to jest "laboratorijski", što znači bez opasnosti za promatrane realitete.

Ovaj rad opisuje istraživanje dinamičkog procesa turbine koju pokreću plinovi i radne jedinice pumpe te je simulirana transformacija energije plinova u hidrauličnu energiju. Također se istražuje i matematički model sustava (turbine pokretane plinovima – centrifugalne pumpe – sustava tlaka u cjevovodu – spremišnog tanka).

**Ključne riječi:** sustavna dinamika, modeliranje, centrifugalna pumpa, turbina, plinovi, kontinuirana i diskretna simulacija, heuristička optimizacija.

### Summary

Systematic dynamic simulation modelling is one of the most adequate and the most successful scientific method for modelling dynamics of complex, non-linear, natural, technical and organizational systems. In former practice methodology of its work appeared to be an efficient means for solving problems regarding operation, behaviour, sensibility, flexibility of dynamics of system behaviour, having a high level of complexity, namely by a computer simulation, i.e. "in laboratory", what actually means without endangering observed objects.

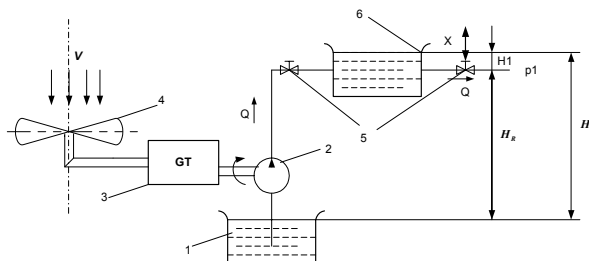
This article deals with research of dynamic process in turbine, driven by gases and in operating mechanical

units of hydraulic pump and thus the transformation of gas energy into hydraulic energy, has been simulated. In this work, mathematical model of the system (turbine driven by gases – centrifugal pump – piping pressure system – holding tank), has been explored. **Key Words:** System dynamics, modelling, centrifugal pump, turbine, gases, continuous and discrete simulation, heuristic optimization.

### 1. Simulacijsko modeliranje sustava za pretvorbu energije plinova u hidrauličnu energiju

#### *System simulation modelling for transformation of gas energy into hydraulic energy*

Promatrani sustav može se opisati sljedećom blok-shemom koja prikazuje transformaciju energija.



Slika 1. Principijelna blok-shema tokova energija sustava (1 - izvor, 2 - centrifugalna pumpa, 3 - reduktor (gear train), 4 - turbina, 5 - ventili, 6 - skladišni tank)

Figure 1. Principal block scheme of energy system flows (1 - source, 2 - centrifugal pump, 3 - reduction gear (gear train), 4 - turbine, 5 - valves, 6 - holding tank)

\*dr. sc. Marijo Oršulić, izvanredni profesor Pomorskog fakulteta u Splitu

Da bi se opisalo dinamičko ponašanje ovoga složenog sustava, koristi se sljedećim jednadžbama:

$$\bar{M} = \frac{4e}{z} \frac{1-e}{1+e} \left[ \left( 1 - \frac{r_0^2}{R} \right) - 2\mu \left( \frac{z_u}{3} + \frac{1-r_0/R}{z_u} - \frac{1-r_0^2/R}{2} \right) \right] \quad (8)$$

$M(z, \alpha)$  - relativni aerodinamični moment.

### 1.1. Sustav dinamičkoga matematičkoga modela

#### System Dynamic Mathematical Model

Jednadžbe promjene stanja sustava pumpe pokretane plinskom turbinom:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_D - M_C}{J} \quad (1)$$

gdje je:

$\omega$  - brzina osovine pumpe [ $s^{-1}$ ],

$J$  - prilagođeni moment inercije [ $kgm^2$ ].

Moment pogona turbine pokretane plinovima  $M_D$  prikazan je kao:

$$M_D = II \rho R^3 \frac{V^2}{2} M(z, \alpha) \quad [Nm] \quad (2)$$

gdje je:

$$z = \frac{\omega_k R}{V} \quad (3)$$

$z$  - omjer brzine,

$R$  - radijus turbine [m],

$\omega_k$  - brzina osovine turbine pokretane plinovima [ $s^{-1}$ ],

$V$  - brzina plinova na ulazu u turbinu [m/s].

Odnosno:

$$z_u = \frac{\omega_k R + u_1}{V - v_1} \quad (4)$$

$z_u$  - relativni omjer brzine,

$$e = \frac{v_1}{V} \quad (5)$$

$e$  - koeficijent gubljenja brzine,

$$\mu = \frac{c_x}{c_y} \quad (6)$$

$\mu$  - odnos otpora prema podizanju u listu lopatice,

$$\alpha = \text{arcctg}(z_u) - \delta \quad (7)$$

$\alpha$  - ulazni kut [rad]

Ekvivalentni moment otpora u sustavu pumpe pokretane plinovima  $M_C$  je:

$$M_C = M_T + M_{C1} + M_{C2} + M_{C3} \quad (9)$$

gdje je:

$$M_T = \frac{\rho g Q H}{\omega} \quad (10)$$

$$M_{C1} = k'_{C1} \omega^2 \quad (11)$$

$$q_1 = \frac{Q_1}{Q_{10}} \quad (12)$$

$$\omega_k = i \omega \quad (13)$$

$M_T$  - moment opterećenja pumpe [Nm],

$M_{C1}$  - prilagođeni moment trenja viskoznosti rotora [Nm],

$M_{C2}$  - prilagođeni moment trenja viskoznosti ležaja [Nm],

$M_{C3}$  - prilagođeni Coulumov moment trenja u brtvi [Nm],

$i$  - koeficijent prijenosa brzine,

$\omega$  - brzina osovine pumpe [ $s^{-1}$ ],

$\omega_k$  - brzina osovine turbine pokretane plinovima [ $s^{-1}$ ].

**Jednadžba stanja ukupne visine stupca fluida u pumpi H:**

$$H = k'_1 \omega (\omega - k'_2 Q) - k'_3 Q^2 - k_y (Q - Q_N)^2 \quad (14)$$

$H$  - ukupna visina stupca fluida u pumpi [m]

$$k = \frac{1}{1 + p} \quad (15)$$

$$k'_1 = \frac{kr_2^2}{g} \quad (16)$$

$$k'_2 = \frac{\text{ctg} \beta_2}{ID_2 b_2 r_2} \quad (17)$$

gdje je:

$k'_{C1}$  - koeficijent trenja viskoznosti rotora [ $Nms^2$ ],

$k'_{c2}$  - koeficijent trenja viskoznosti ležaja [Nms<sup>2</sup>],  
 $k'_3$  - hidraulički gubitak u pumpi [m<sup>-5</sup>s<sup>2</sup>],  
 $k_y$  - koeficijent šoka hidrauličkog gubitka [m<sup>-5</sup>s<sup>2</sup>],  
 $r_2$  - izlazni radijus rotora [m],  
 $b_2$  - izlazna širina rotora [m],  
 $D_2$  - promjer rotora [m],  
 $\rho$  - koeficijent cirkulacije,  
 $\beta_2$  - izlazni kut lopatice rotora [rad].

$H$  - ukupni napor pumpe [m],  
 $H_1$  - razina visine stupca tekućine u tanku [m],  
 $H_G$  - geodetska visina stupca tekućine [m],  
 $H_R$  - razlika razina između dobave i crpilišta [m].

Primjena simulacijske tehnike zahtijeva da se problem pravilno formulira. To je postignuto bezdimenzionalnim koordinatama i ponovnim skaliranjem zavisnih varijabla u obliku:

**Jednadžba promjene stanja razine u skladišnom tanku:**

$$\frac{dH_1}{dt} = \frac{Q - Q_1}{A_R} \quad (18)$$

$H_1$  - razina visine stupca fluida u tanku [m],  
 $A_R$  - presjek paralelan s razinom tanka [m<sup>2</sup>].

**Izlazni tok vode  $Q_1$  dan je jednadžbom:**

$$Q_1 = \mu_1 A_1(X) \sqrt{\Delta p_1 \frac{2}{\rho}} \quad (19)$$

gdje je:

$$A_1 = aX \quad (20)$$

$$\Delta p_1 = \rho g H_1 + p_a - p_c \quad (21)$$

$\mu_1$  - koeficijent gubitaka strujanja,  
 $X$  - pomak ravnog ventila [m],  
 $\Delta p_1$  - pad tlaka na ventilu [Pa],  
 $a$  - opseg presjeka ventila [m],  
 $\rho$  - gustoća vode [kg/m<sup>3</sup>].

**Jednadžba cjevovoda može biti pisana kao:**

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{H - H_G - k_R Q^2}{k_1} \quad (22)$$

gdje je:

$$H_G = H_R + H_1 \quad (23)$$

$$h = \frac{H}{H_0} \quad (24)$$

$$h_1 = \frac{H_1}{H_{10}} \quad (25)$$

$$q = \frac{Q}{Q_0} \quad (26)$$

$$q_1 = \frac{Q_1}{Q_{10}} \quad (27)$$

$$\varphi = \frac{\omega}{\omega_0} \quad (28)$$

$$v = \frac{V}{V_0} \quad (29)$$

gdje su  $H_0, H_{10}, Q_0, Q_{10}, V_0, \omega_0$  - vrijednosti stanja odgovarajućih varijabla.

Jednadžbe (1), (14), (18), (19) i (24) mogu se pisati kao:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{k_v \Delta v - k_{q1} \Delta q - k_{h1} \Delta h - \Delta \varphi}{T_A} \quad (30)$$

$$\Delta h = k_\varphi \Delta \varphi - k_{q2} \Delta q \quad (31)$$

$$\frac{\Delta h_1}{dt} = \frac{\Delta q - \Delta q_1}{T_R} \quad (32)$$

$$\Delta q_1 = k_x \Delta x + k_{h2} \Delta h_1 \quad (33)$$

$$\frac{d\Delta q}{dt} = \frac{k_{h3} \Delta h - k_{h4} \Delta h_1 - \Delta q}{T_L} \quad (34)$$

gdje je:

$$p = \rho g Q_0 H_0 \quad (35)$$

$$\bar{M}_D = \pi \rho R^3 \frac{V_0^2 \omega_0^2}{2 \rho_0} M(v, \varphi) \tag{36}$$

$$e_N = 1 + \frac{2k'_{C1} \omega_0^2}{\rho_0} + \frac{k'_{C2} \omega_0^2}{\rho_0} + \left( \frac{\partial \bar{M}_D}{\partial \varphi} \right)_{\varphi = \varphi_0} \tag{37}$$

$$T_A = \frac{J \omega_0^2}{\rho_0 e_n} \tag{38}$$

$$k_V = \frac{1}{e_n} \left( \frac{\partial \bar{M}_D}{\partial v} \right)_{v = v_0} \tag{39}$$

$$k_{q1} = k_{h1} = \frac{1}{e_n} \tag{40}$$

$$T_R = \frac{A_R H_{10}}{Q_0} \tag{41}$$

$$k_\varphi = \frac{\mu_1 a}{Q_{10}} \sqrt{2gH_{10}} \tag{42}$$

$$k_{h2} = \frac{\mu_1 a X_0}{2Q_0 \sqrt{2gH_{10}}} \tag{43}$$

$$T_1 = \frac{k_1}{2k_R} \tag{44}$$

$$k_{h3} = \frac{1}{2k_R} \tag{45}$$

$$k_{h4} = \frac{H_{10}}{2k_R H_0} \tag{46}$$

**2. Sustavno dinamičko simulacijsko modeliranje promatranog sustava**  
**System Dynamic Simulation Modelling of Observed System**

Za jednadžbu promjene stanja sustava pumpe pokretane plinskom turbinom:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_D - M_C}{J}$$

i za jednadžbu (30):

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{k_V \Delta v - k_{q1} \Delta q - k_{h1} \Delta h - \Delta \varphi}{T_A}$$

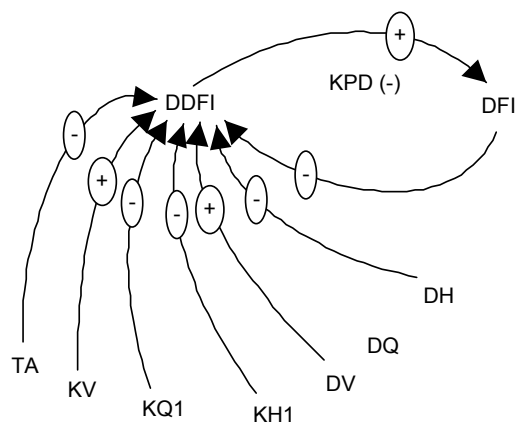
vrijede ovi sustavno dinamički SD-modeli:

**Mentalno-verbalni model**

Ako raste konstanta  $k_v$  i  $\Delta v$ , rast će i promjena brzine osovine pumpe, pa će promatrana uzročno-posljedična veza *UPV* biti pozitivna (+); ako rastu varijable  $T_a$ ,  $k_{q1}$ ,  $\Delta q$ ,  $\Delta h$  i  $k_{h1}$ , padat će promjena brzine osovine pumpe, pa će promatrana uzročno-posljedična veza *UPV* biti negativna (-).

Također, ako raste brzina osovine pumpe, padat će i promjena brzine osovine pumpe *UPV*(-), ali ako raste promjena brzine osovine pumpe, rast će brzina osovine pumpe, pa će promatrana *UPV* biti pozitivna (+), dok će promatrani krug povratnog djelovanja *KPD* biti negativan (-). Vrijedi: **KPD (-):DDFI=>(+) DFI=>(-)DDFI.**

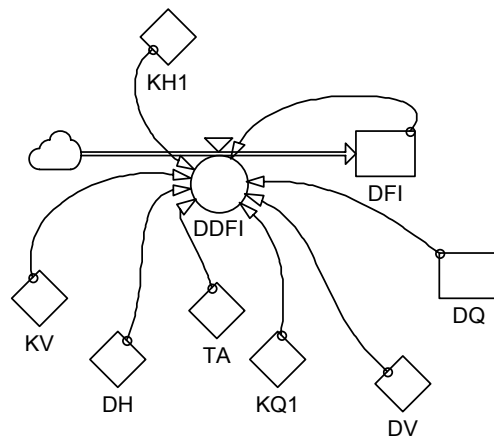
**Strukturni model**



Slika 2. Strukturni model jednadžbe (30)

Figure 2. Equation structural model (30)

**Dijagram toka**



Slika 3. Dijagram toka promatrane jednadžbe (30)

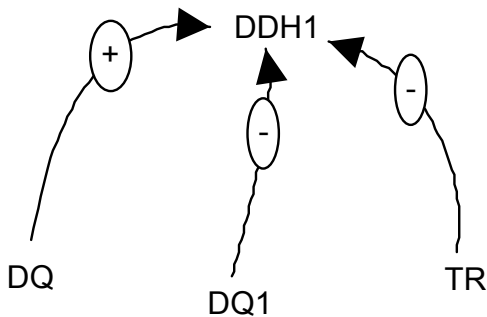
Figure 3. Observed equation flow diagram (30)

Za jednadžbu (32) vrijede sljedeći simulacijski modeli:

**Mentalno-verbalni model**

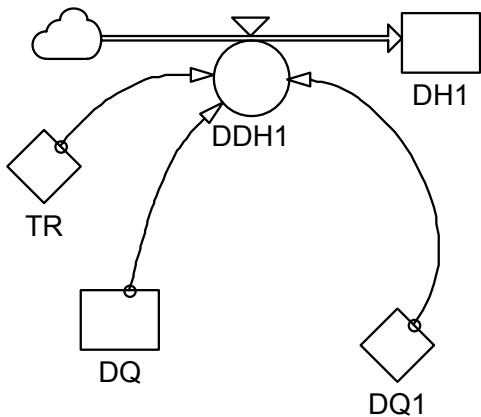
Ako raste varijabla  $\Delta q$ , rast će i  $\Delta h_1/dt$  (promjena visine stupca fluida u tanku), pa će promatrana uzročno-posljedična veza biti pozitivna UPV(+); ako raste  $\Delta q_1$  i  $T_R$ , padat će  $\Delta h_1/dt$  pa je UPV (-).

**Strukturni model**



Slika 4. Strukturni model jednadžbe (32)  
Figure 4. Equation structural model (32)

**Dijagram toka**



Slika 5. Dijagram toka jednadžbe (32)  
Figure 5. Equation flow diagram (32)

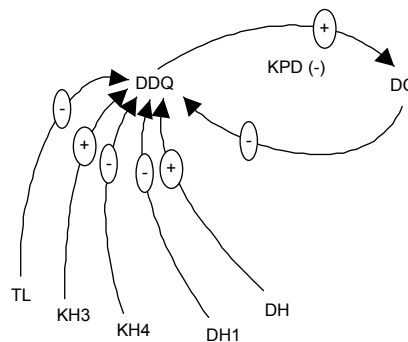
Za jednadžbu (34) vrijede sljedeći simulacijski modeli:

**Mentalno-verbalni model**

Ako raste varijabla  $k_{h3}$  i ako raste  $\Delta h$ , rast će i  $d\Delta q/dt$  (promjena brzine strujanja vodene pumpe), pa će promatrana UPV biti pozitivna (+); ako rastu varijable  $k_{h4}$ ,  $\Delta h_1$ ,  $\Delta q$  i  $T_L$ , padat će promjena brzine strujanja vodene pumpe, pa će uzročno-posljedična veza biti negativna, UPV (-).

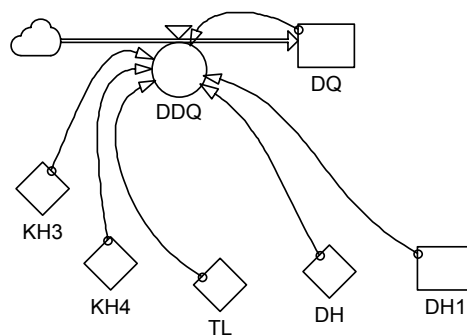
Vrijedi: KPD (-):DDQ=>(+) DQ=>(-)DQ.

**Strukturni model**



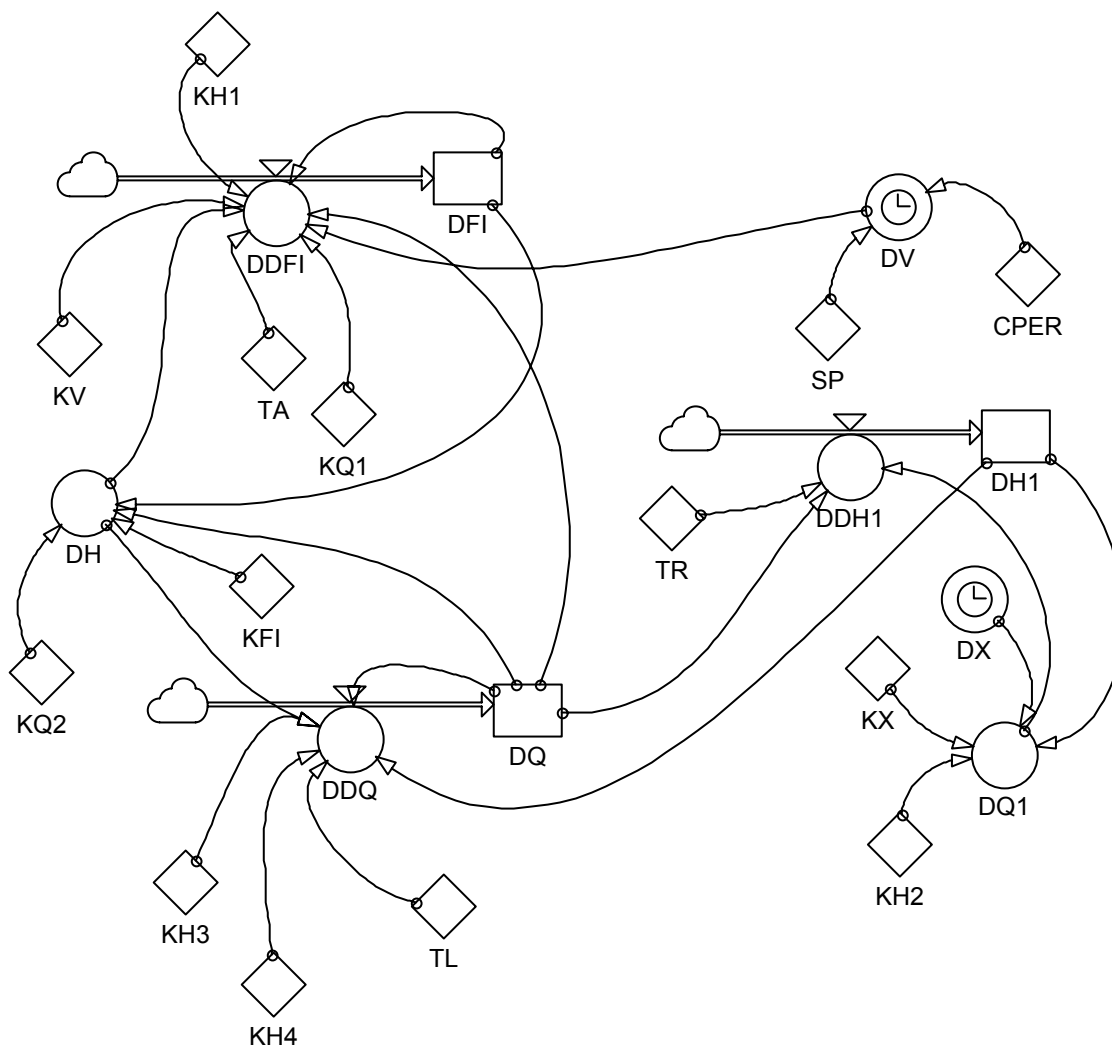
Slika 6. Strukturni model jednadžbe (34)  
Figure 6. Equation structural model (34)

**Dijagram toka**



Slika 7. Dijagram toka jednadžbe (34)  
Figure 7. Equation flow diagram (34)

Sve navedene jednadžbe stanja zajedno tvore globalni dijagram toka dinamičkog sustava:



Slika 8. Globalni dijagram toka promatranog sustava u POWERSIM simulacijskom jeziku

Figure 8. Global flow diagram of observed system in POWERSIM simulation language

Listing-program sustava u POWERSIM simulacijskom jeziku bit će:

```

init DFI = 0
flow DFI = +dt*DDFI
init DH1 = 0
flow DH1 = +dt*DDH1
init DQ = 0
flow DQ = +dt*DDQ
aux DDFI = (KV*DV-KQ1*DQ-KH1*DH-DFI)/TA
aux DDH1 = (DQ-DQ1)/TR
aux DDQ = (KH3*DH-KH4*DH1-DQ)/TL
aux DH = KFI*DFI-KQ2*DQ
aux DQ1 = KX*DX+KH2*DH1
aux DV = STEP(30*SIN(6.283*TIME/SP),10)+20*CO
S(6.283*TIME/CPER)
aux DX = STEP(10,40)-STEP(5,50)+STEP(5,60)
const CPER = 33
const KFI = 1
const KH1 = 1
const KH2 = 0,8
const KH3 = 0,8
const KH4 = 0,5
const KQ1 = 1
const KQ2 = 1,5

```

const KV = 1,2

const KX = 1

const SP = 9

const TA = 3

const TL = 1

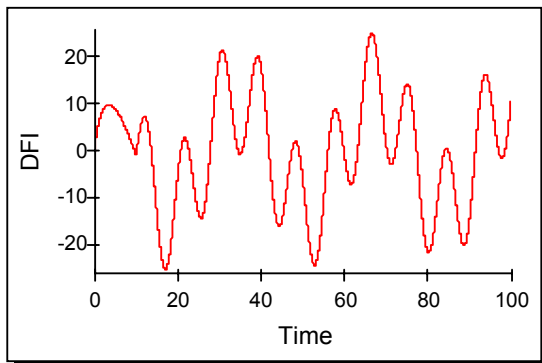
const TR = 5

### 3. Rezultati simulacije

#### *Simulation Results*

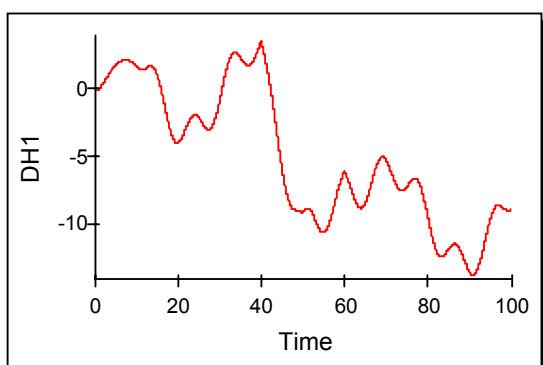
Grafički rezultati simulacije:

Dijagrami ovisnosti varijabla o vremenu:



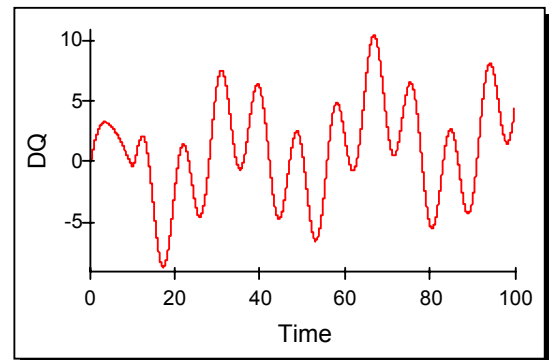
Slika 9. Brzina osovine pumpe

*Figure 9. Speed of pump rotation*



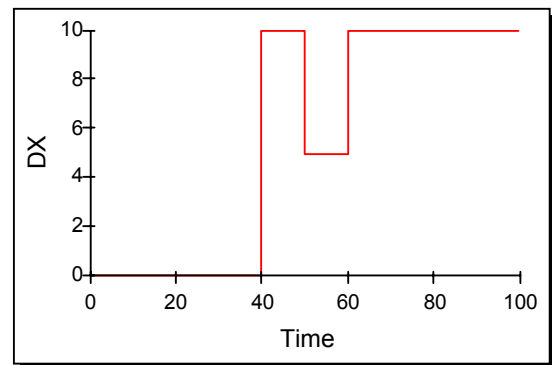
Slika 10. Razina visine stupca fluida u tanku

*Figure 10. Level of fluid in tank*



Slika 11. Brzina strujanja u cjevovodu

*Figure 11. Water pump flow speed*

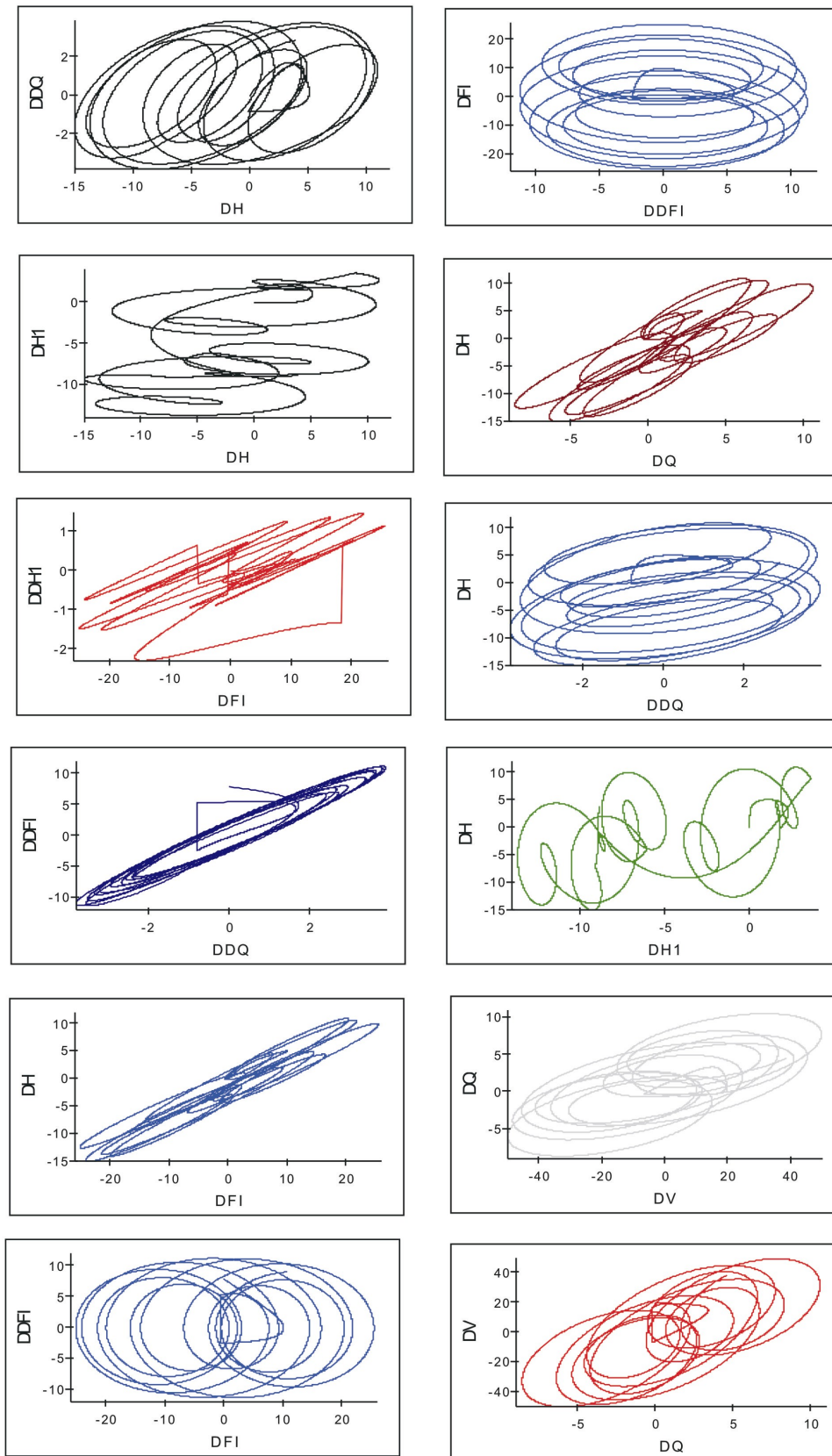


Slika 12. Otvaranje ventila definirano skokovito sa STEP-funkcijom

*Figure 12. Opening of valves as defined discrete with STEP function*

Primjenom ove znanstvene metodologije na raznovrsne sustave, pa i one nižega reda, kao što je ovaj sustav (trećeg reda), i primjenom odgovarajućih softverskih paketa (alata), mogu se dobiti dijagrami međuovisnosti pojedinih varijabla - fraktalni dijagrami, koji daju dodatnu "sliku" o stanju promatranog sustava.

Dijagrami međuovisnosti pojedinih varijabla:



Sl. 13. Dijagrami međuovisnosti pojedinih varijabla  
 Figure 13. Diagrams of correlation of particular variables



Brza i oštra varijacija brzine plinova utječe na znatnu varijaciju brzine osovine pumpe. Taj efekt uzrokuje ukupnu efikasnost sustava, jer operacijska točka sustava je pomicanje oko njegove nominalne vrijednosti. Za bolji rad sustava preporučuje se uključivanje u sustav automatskog regulatora koji bi održavao konstantnu brzinu osovine.

Linearni matematički model sustava daje približnu ideju o dinamici pri malim promjenama varijable oko operacijske točke. Nelinearnim modelom mora se koristiti radi boljih rezultata simulacije. Kada je cjevovod velike dužine (između pumpe i spremišnog tanka), hidraulički je šok elastičan. U tom je slučaju moguće pokrenuti valoviti proces u sustavu. To će dati dodatno opterećenje jedinici i oscilacije u omjeru strujanja i visine stupca fluida.

#### 4. Zaključak

##### Conclusion

Sustavna dinamika je takva znanstvena metodologija koja omogućuje simulacije najsloženijih sustava. U prikazanom primjeru metodologija očito pokazuje visoku kvalitetu simulacija složenih dinamičkih sustava, i daje priliku svakom zainteresiranom studentu ili inženjeru da s pomoću iste metodologije modelira, optimira i simulira bilo koji scenarij postojećih realiteta. Nadalje, korisnici ove metodologije simuliranja kontinuiranih modela na digitalnom računaru, otvaraju sebi mogućnost stjecanja najnovijih znanja u ponašanju dinamičkih sustava. Metodologija je značajna i po tome što ne obuhvaća samo kompjutorski tip modeliranja već jasno determinira i mentalno, strukturno i matematičko modeliranje realiteta sustava.

#### Literatura

##### References

1. Jay W. Forrester, 1973/1971. *Principles of Systems*. MIT Press, Cambridge Massachusetts, USA

2. A. Munitić, 1989. *Kompjuterska simulacija uz pomoć sistemske dinamike*, BIS, Split
3. George P. Richardson, and Pugh III L. Aleksander, 1981. *Introduction to System Dynamics Modelling with Dynamo*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA
4. A. Munitić, M. Oršulić, M. Krčum, J. Dvornik, lipanj-2002., "Sustavsko dinamičko simulacijsko modeliranje pogonskog sustava - Brodsko sidreno vitlo pogonjeno asinkronim motorom", *Naše more*, broj 1-2/2002, Dubrovnik
5. A. Munitić, M. Oršulić, M. Krčum and J. Dvornik, System Dynamic simulating modelling of driving system "Anchor windlass driven by asynchronous motor", *MESM 2002*, Sarjah, 28-30. September, 2002, pages 6.
6. A. Munitić, M. Oršulić, L. Milić and J. Dvornik, "System Dynamics Modelling of Complex Electro Mechanical System", *IASTED, AMS 2002*, Cambridge, USA, 4-6., November, 2002, 511-515.
7. Munitić A., Z. Kulenović, J. Dvornik, *Computing "Simulation of Driving System - Ship/Piston Compressor- Electric motor"*, *IASTED, MS 2003*, 24-26 February 2003, Palm Springs, CALIFORNIA, USA, 515-520
8. A. Munitić, M. Oršulić, J. Dvornik, L. Milić, "Kompjuterska simulacija i optimizacija brodskih elektro-mehaničkih sustava", *Naše more*, broj 5-6/2002, Dubrovnik
9. K. Ormandzhiev, H. Hristov, P. Ivanov, Investigation of a dynamics system for transformation of wind energy into hydraulic, *MEET/MARIND*, Varna, Bulgaria, October, 2002., 217-222.
10. H. Hristov, P. Ivanov, K. Ormandzhiev, Possibility analysis for collaboration of windturbine coupled with a hydraulic pump, *International Scientific Conference, Unitex 01*, Technical University of Grabovo 22-23 November 2001, 269-274.
11. *Windpumpsystem zur Be- und Entwässerung*, Schriftenreihe des Fachberichts Internationale, Agrarentwicklung der TU Berlin, Berlin, 1989.

---

Rukopis primljen: 18.2.2004.