

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br. 2075

**UPRAVLJANJE BRZIM RAZVIJAČEM PARE
POMOĆU PROGRAMIRLJIVOG LOGIČKOG
KOTROLERA**

Krešimir Božić

Zagreb, srpanj 2011.

Zahvala

Veliko hvala mojoj ženi, Maji, na strpljenju, podršci i razumijevanju!

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Razrada i rješavanje problema.....	2
2.1. Opis rada brzog razvijaača pare.....	2
2.1.1. Opis dijelova brzog razvijaača pare.....	2
2.1.1.1. Omekšivač vode.....	2
2.1.1.2. Napojni spremnik.....	2
2.1.1.3. Kotao.....	3
2.1.1.4. Hladnjak.....	4
2.1.1.5. Dimnjak.....	4
2.1.2. Faze rada brzog razvijaača pare.....	4
2.1.2.1. Punjenje napojnog spremnik.....	4
2.1.2.2. Paljenje plamenika.....	4
2.1.2.3. Održavanje radne točke.....	4
2.1.2.4. Gašenje.....	4
2.2. Nelinearni model.....	5
2.2.1. Nelinearna diferencijalna jednađba.....	5
2.2.2. Jednađba stanja mase pare u sustavu.....	5
2.2.3. Jednađba stanja energije vode u sustavu.....	6
2.2.4. Simulacija nelinearnog modela.....	7
2.3. Linearni model.....	9
2.3.1. Linearizacije nelinearnog modela.....	9
2.3.2. Simulacija linearnog modela.....	9
2.4. Usporedba nelinearnog i lineariziranog modela.....	11
2.5. Prijenosna funkcija sustava.....	13
2.6. Regulator sustava.....	14
2.6.1. Odziv sustava bez regulatora.....	14
2.6.2. Odziv sustava s regulatorom.....	14
3. Zaključak.....	16
4. Literatura.....	17
5. Sažetak.....	18
6. Summary.....	19

1. Uvod

Brzi razvijači pare proizvedeni na prostoru Hrvatske su još uvijek upravljani relejnom tehnologijom koja ne omogućava punu širinu upravljanja i prilagođavanja konkretnim mjestima uporabe kao što ih omogućavaju moderne tehnologije. S toga je cilj ovog završnog rada razvoj modernog upravljanja brzim razvijačem pare.

Kako se brzi razvijači pare uglavnom koriste za procese kod kojih se potreba za parom mijenja, modernim upravljanjem je moguće postići optimizirano upravljanje kako u dostizanju radne točke, tako i u prijelaznim fazama uzrokovnih promjenom opterećenja. Upravo iz tih razloga je upravljanje takvim sustavom kod kojih se izlazni parametri neprestano mijenjaju potrebno upravljanje koje će smanjiti gubitke, odnosno povećati korisnost stroja, i ubrzati odziv na promjene opterećenja s ciljem što bržeg dovođenja stroja u radnu točku uz minimalne gubitke.

2. Razrada i rješavanje problema

2.1. Opis rada brzog razvijaača pare

Osnovna namjena brzog razvijaača pare je razvoj pare u postrojenjima gdje je potreba za parom u relativno malim količinama (200 do 2000 kg/h) i nestalnog kapaciteta. Drugim riječima, potreba se u ciklusu rada (najčešće na dnevnoj razini) mijenja u nepredvidivim vremenskim intervalima i potrebnim količinama.

Na slici 1. se vidi primjer jednog brzog razvijaača pare od tvrtke Certuss GmbH.



Slika 1. Brzi razvijaač tvrtke Certuss GmbH

2.1.1. Opis dijelova brzog razvijaača pare

Brzi razvijaač pare čine pet cjeline. U nastavku su opisane pojedine cjeline.

2.1.1.1. Omekšivač vode

Omekšivač vode služi za omekšivanje "tvrde" vode. Odnosno, voda koja sadrži puno kamenca dugoročno oštećuje dijelove tako što začepi sve dijelove brzog razvijaača pare. Omekšivačem vode se ne upravlja već kotlovničar u određenim periodima provjerava tvrdoću vode jednostavnim metodama.

Samim time omekšivač vode nije predmet razmatranja ovog Završnog rada

2.1.1.2. Napojni spremnik

Osnovna funkcija napojnog spremnika je da vodu iz omekšivača zagrije kako bi se smanjila kondenzacija u kotlu. Temperatura mora biti u rasponu 60 C – 90 C.

Napojni spremnik se zagrijava proizvedenom parom.

Napojni spremnik nije predmet razmatranja ovog Završnog rada

2.1.1.3. Kotao

Kotao je centralni predmet promatranja u ovom Završnom radu.

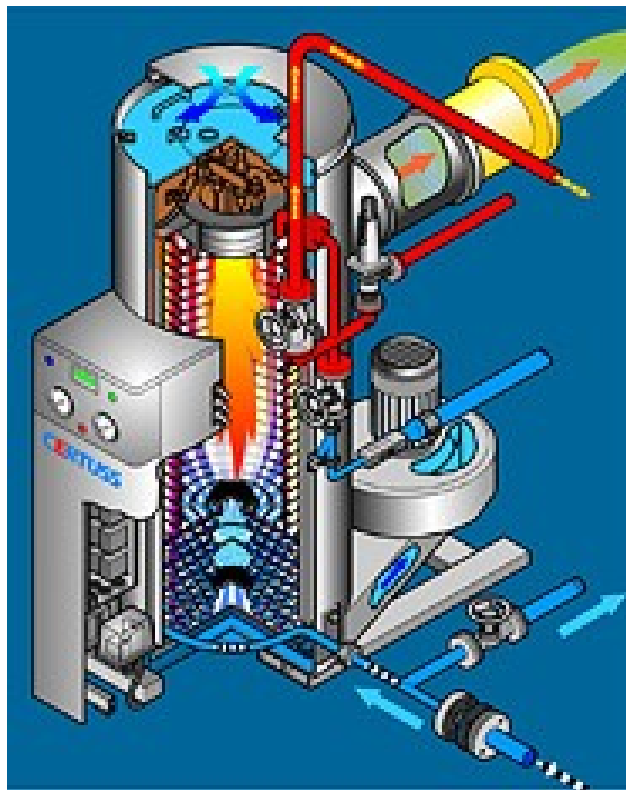
Kotao čine:

- plamenik kao izvor energije
- spirala cijevi kroz koju teče voda/para
- pumpa za vodu
- izlazni ventil

Navedeno nisu jedini dijelovi ovog kotla, ali su sa gledišta upravljanja najbitnija. Ostale dijelove na ovom mjestu nećemo navoditi.

Na izlazu iz kotla trebamo dobiti paru pritiska 6-8 bara. U svrhu dobivanja navedenog pritiska, upravljamo radom pumpe za vodu i plamenikom koji su linearno povezani, zbog čega se može reći da upravljamo samo plamenikom, a pumpa za vodu prati rad plamenika.

Na slici 2. je vidljiva unutrašnjost brzog razvijaača pare te najbitniji dijelovi i princip rada.



Slika 2. Presjek brzog razvijaača pare

Na slici se mogu vidjeti dva elementa koja su ključna za ovaj Završni rad, spirala i plamenik. Bitno je uočiti kako je spirala izrađena od cijevi koje su savijene u krug zbog čega nema akumuliranja pare u sustavu. Navedeno predstavlja određeni problem kod postavljanja matematičkog modela, ali o tome u nastavku.

2.1.1.4. Hladnjak

Funkcija hladnjaka je u spuštanju temperature vode koja izlazi iz sustava kao nusproizvod. Voda koja se ispušta u kanalizaciju ne smije biti veća od 40 C pa je potrebno po potrebi istu hladiti. Hlađenje se postiže dodavanjem hladne vode.

Hladnjak nije predmet razmatranja ovog Završnog rada

2.1.1.5. Dimnjak

Dimnjak izbacuje dimne plinove iz kotla. Rad dimnjaka se temelji na podtlaku koji se stvara zbog visine dimnjaka. Dimnjakom se ne upravlja, već se samo mjeri temperatura dimnih plina. Previsoka temperatura dimnih plinova ukazuje na grešku u radu i time mjerena veličina utječe na rad.

Dimnjak nije predmet razmatranja ovog Završnog rada

2.1.2. Faze rada brzog razvijaača pare

2.1.2.1. *Punjenje napojnog spremnik*

Prije nego se kotao pusti u pogon mora biti osigurano da je sistem napunjen vodom jer bi u protivnom došlo do pregrijavanja cijevi i time njihovo uništenje.

Punjenje se pokreće okretom odgovarajućeg prekidača u položaj 1 i pritiskom na gumb start.

Kada je sistem napunjen vodom, na jednom kraju izlazi voda nakon čega kotlovničar prebacuje sklopku u položaj 2. Ova radnja se ne odvija automatski jer se paljenje kotla, prema zakonu, ne smije raditi bez nadzora. Iskustva iz prakse pokazuju da kupci nisu spremni platiti rješenje pa u okviru ovog rada ne smatram potrebnim navedeni problem rješavati.

2.1.2.2. *Paljenje plamenika*

Nakon što kotlovničar pokrene drugu fazu rada plamenik se pali, dok pumpa i dalje tjera vodu. Period od paljenja plamenika do trenutka kada iz kotla izlazi čista para se obavlja bez automatske regulacije zbog problema koji kasnije biti detaljnije opisan.

2.1.2.3. *Održavanje radne točke*

Glavni zadatak upravljanja je održavanje radne točke. Radna točka je definirana tlakom pare na izlazu i smije poprimiti vrijednosti između 6-8 bara. Odnosno, radna točka je 7 bara.

2.1.2.4. *Gašenje*

Kotao u fazi gašenja treba izbaciti paru i opasne plinove koji su eventualno ostale u ložištu.

2.2. Nelinearni model

2.2.1. Nelinearna diferencijalna jednačba

Matematički model se temelji na dva stanja:

1. stanje mase pare u sustavu
2. stanje energije vode u sustavu

Pa prema tome imamo dvije osnovne diferencijalne jednačbe za sustav:

$$\frac{dm_{pare}}{dt} = \dot{m}_{ulaz} - \dot{m}_{izlaz} \quad 2-1$$

$$\frac{dQ_{vode}}{dt} = \dot{Q}_{ulaz} - \dot{Q}_{izlaz} \quad 2-2$$

U nastavku su pojedinačno razrađene diferencijalne jednačbe.

2.2.2. Jednačba stanja mase pare u sustavu

Rješavanje problema jednačbe stanja mase pare u sustavu se svodi na rješavanje ulaznog i izlaznog protoka mase.

Dok je izlazni protok razmjerno jednostavan za odrediti jer predstavlja poremećaj koji se može nalaziti u određenim granicama (što ne vrijedi za upravljanje), ulazni protok je znatno teže odrediti i zahtjeva veliko znanje iz termodinamike. Kako termodinamika nije temeljni problem ovog Završnog rada, ulazni protok ćemo aproksimirati znajući protok, tlak i temperaturu u radnoj točki:

$$\dot{m}_{ulaz} = \dot{m}_{isparavanja} = k \frac{T_{izlaz}}{p_{pare}} \quad 2-3$$

Kako znamo da nam protok u radnoj točki mora biti približno 800 kg/h, na temperaturi od 436 K i tlaku o 7 bara (7×10^5 Pa), dobivamo da nam je:

$$k = 12.785 \cdot 10^5 \frac{kg}{h} \frac{Pa}{K} \quad 2-4$$

Tlak pare nam nije stanje sustava prema tome moramo isti izraziti Zakonom idealnih plinova koji glasi:

$$pV = nRT \quad 2-5$$

Uvrštavanjem i sređivanjem izraza dobivamo konačni oblik oblik maseni protok isparavanja:

$$\dot{m}_{\text{isparavanja}} = k \frac{M_{\text{pare}}}{R} \frac{(V_{\text{spirale}} - \frac{m_{\text{vode}}}{\rho_{\text{vode}}})}{m_{\text{pare}}} \quad 2-6$$

gdje je:

$$m_{\text{vode}} = \frac{\rho_{\text{vode}} \cdot S}{2} (L + x_{Ti}) \quad 2-7$$

$$x_{Ti} = \rho_{\text{vode}} S c_{\text{vode}} (T_{\text{izlazna}} - T_{\text{ulazna}}) L \frac{v}{H_{\text{plamenik}}} \quad 2-8$$

$$v = q_{\text{pumpe}} \frac{x}{(S \rho_{\text{vode}})} \quad 2-9$$

$$H_{\text{plamenik}} = h_{\text{plamenik}} y \quad 2-10$$

M_{pare} - molekularna masa vode

R - univerzalna plinska konstanta

V_{spirale} - ukupni unutrašnji volumen spirale

L - duljina cijevi u spirali

S - površina unutarnjeg promjera cijevi

x_{Ti} - mjesto u spirali gdje vode dosegne temperaturu T_{izlazna}

q_{pumpe} - maksimalni protok pumpe za vodu

h_{plamenik} - maksimalna snaga plamenika

c_{vode} - toplinski kapacitet vode

Relacija 2-8 opisuje mjesto u spirale na kojoj je voda dosegla izlaznu temperaturu.

$$\dot{m}_{\text{izlaz}} = 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot z \quad 2-11$$

2.2.3. Jednadžba stanja energije vode u sustavu

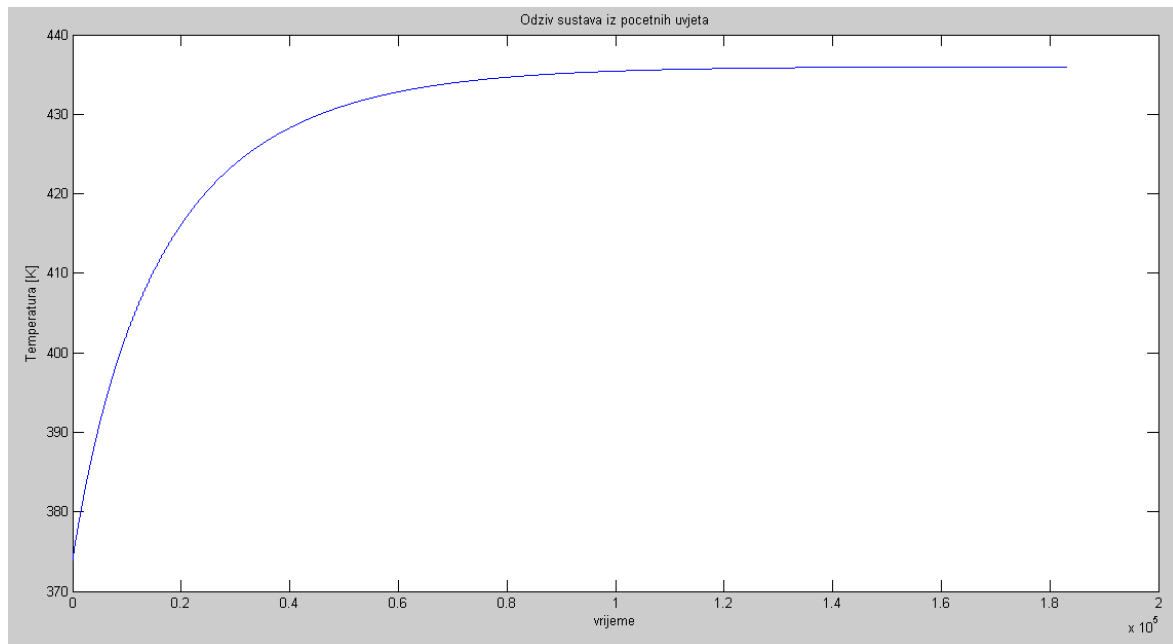
Općenitu jednadžbu 2.2 proširujemo na sljedeći način:

$$\frac{dQ_{\text{vode}}}{dt} = \dot{Q}_{\text{ulaznaVoda}} + H_{\text{plamenik}} - \dot{Q}_{\text{ispravanje}} \quad 2-12$$

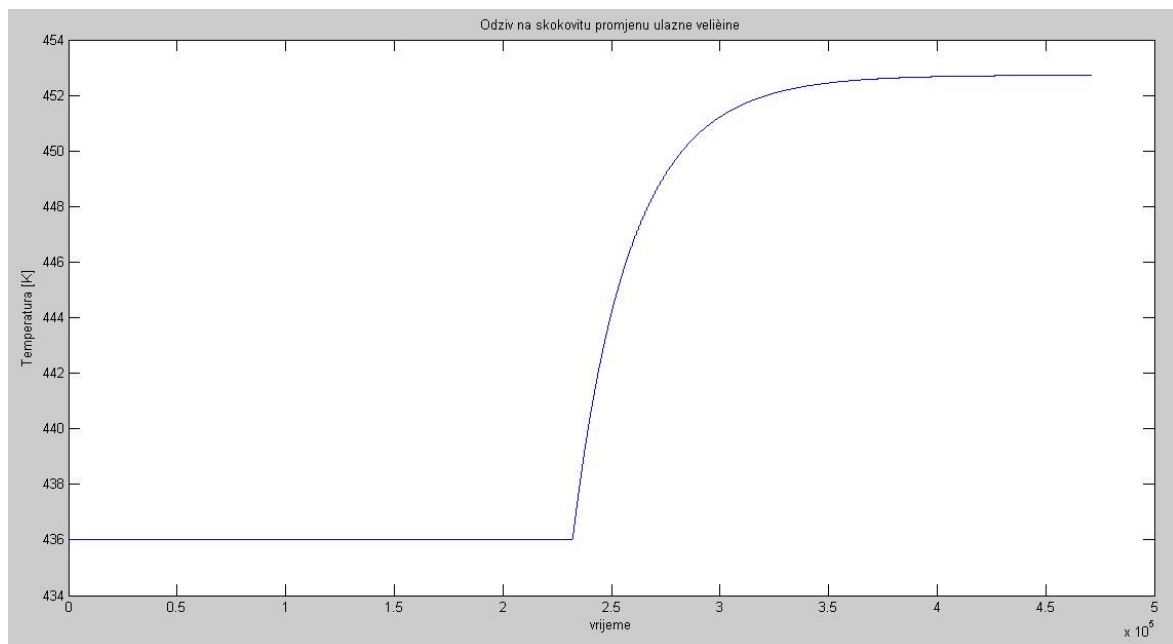
gdje je:

na uvjete stacionarnog stanja gdje simuliramo promjenu ulaza – Slika 5.

Odziv s početnim uvjetima nam je bitan za početak rada razvijača pare kada prelazimo u automatski režim rada, dok je odziv na promjenu ulazne veličine bitan zbog rada u radnoj točki.



Slika 4. Odziv nelinearnog sustava iz početnih uvjeta



Slika 5. Odziv nelinearnog sustava na skokovitu promjenu ulazne veličine

Iz grafova se vidi da je odziv stabilan i realan kako za odziv iz početnih uvjeta tako i za odziv u radnoj točki zbog promjene ulazne veličine.

2.3. Linearni model

2.3.1. Linearizacije nelinearnog modela

Zbog nelinearnosti sustava potrebno je isti linearizirati u okolini radne točke kako bi kasnije tim sustavom mogli upravljati regulatorom.

Radna točka definirana količinom izlazne pare od 800 kg/h i tlakom od 7 bara što predstavlja temperaturu od 436 K.

Iz nelinearnog modela se dobivaju sljedeće vrijednosti za rad pumpe za vodu – x, rad plamenika – y, za izlaz pare – z, masu pare u sustavu - m_{pare} , te temperaturu – T_{izlazna} :

$$x = 0.8$$

$$y = 0.74912233$$

$$z = 0.8$$

$$m_{\text{pare}} = 0.259 \text{ kg}$$

$$T_{\text{izlazna}} = 436 \text{ K}$$

Linearni model prikazan u prostoru stanja glasi:

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} m_{\text{pare}} \\ \frac{d}{dt} T_{\text{izlazna}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_{\text{pare}} \\ T_{\text{izlazna}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 & B_2 & B_3 \\ B_4 & B_5 & B_6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

2-17

gdje su:

$$A1 = -3.0906 \cdot 10^3$$

$$A2 = -1.6892$$

$$A3 = 309.9021$$

$$A4 = 0.1767$$

$$B1 = -196.3660$$

$$B2 = 209.7025$$

$$B3 = -1000$$

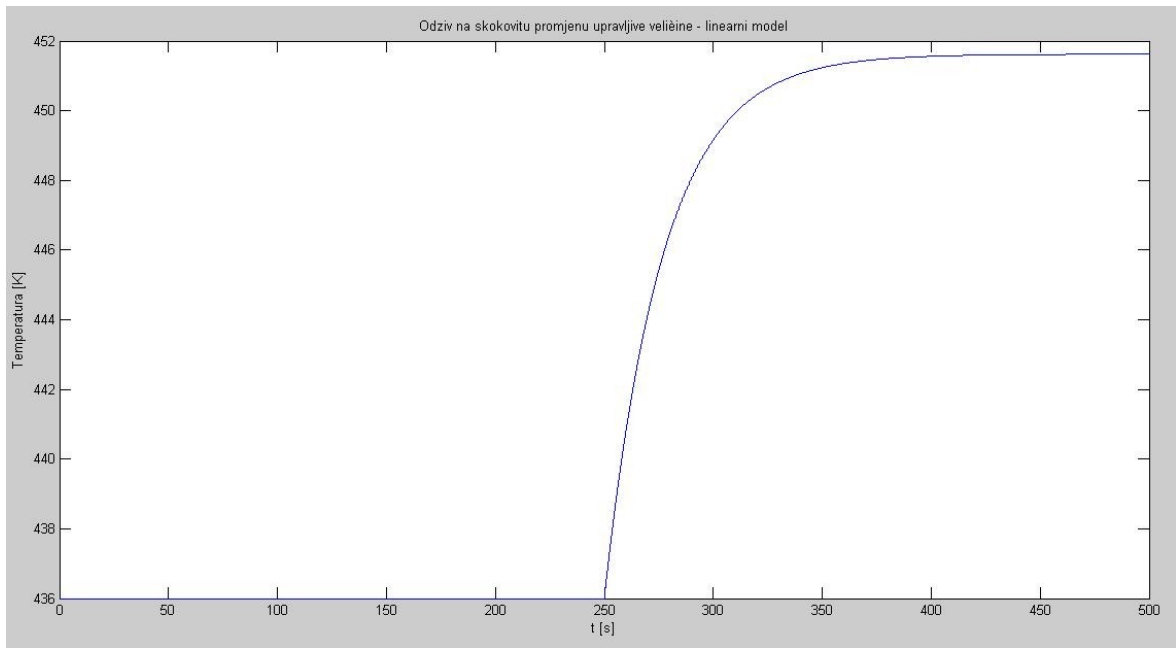
$$B4 = 4.3275$$

$$B5 = 88.8589$$

$$B6 = 0$$

2.3.2. Simulacija linearnog modela

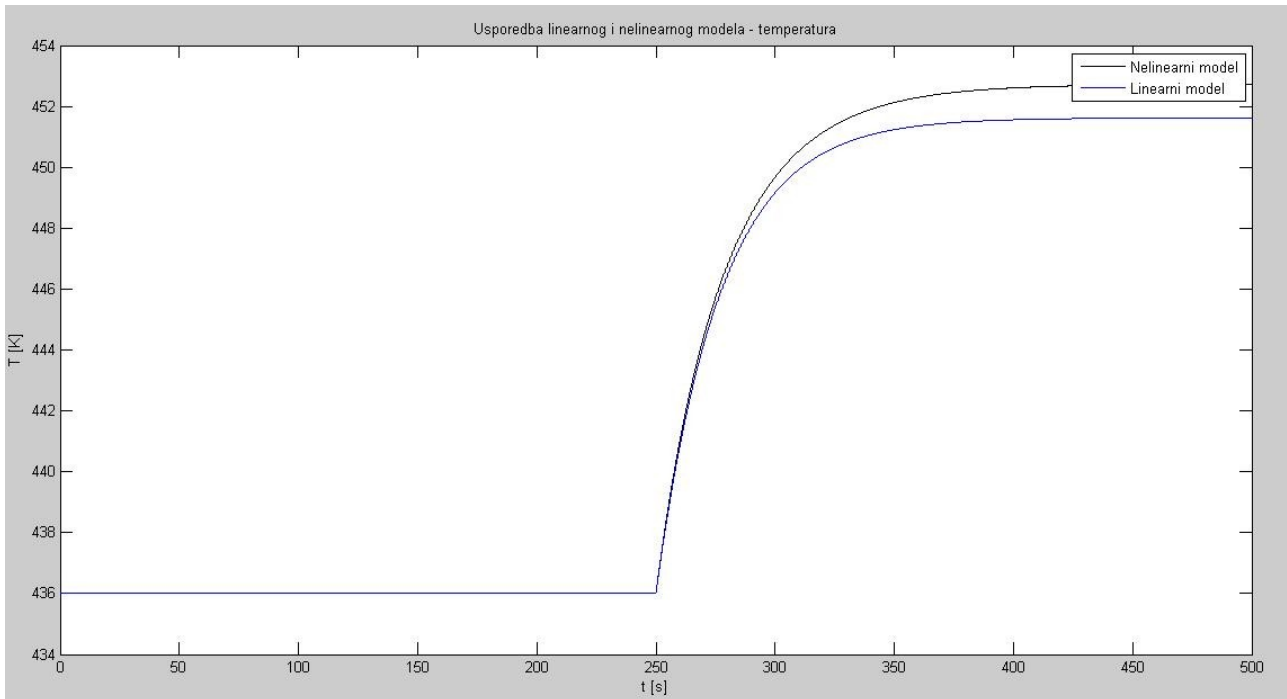
Kako nema smisla linearni model simulirati za bilo koju točku koja nije radna, na ovom mjestu ćemo simulirati samo odziv na skokovitu promjenu upravljive veličine y. Odnosno, odziv sustava iz početnih vrijednosti nećemo simulirati. Rezultat je prikazan na slici 6.



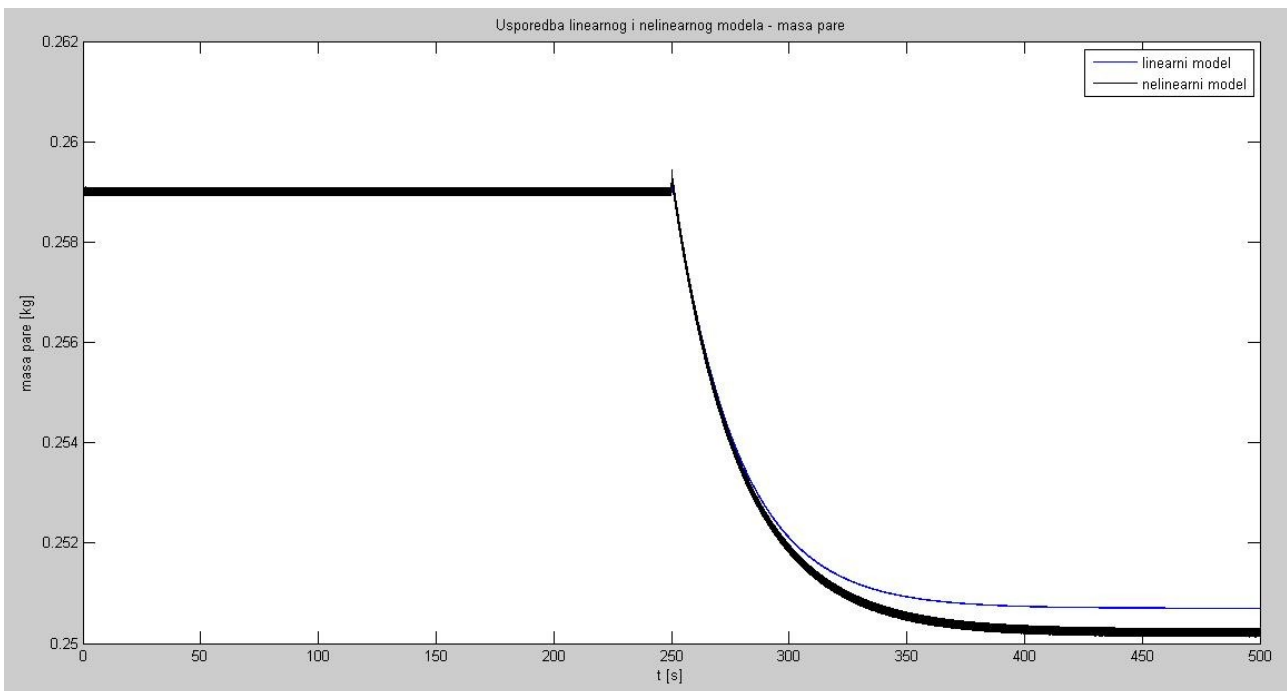
Slika 6. Odziv na skokovitu promjenu upravljive veličine

2.4. Usporedba nelinearnog i lineariziranog modela

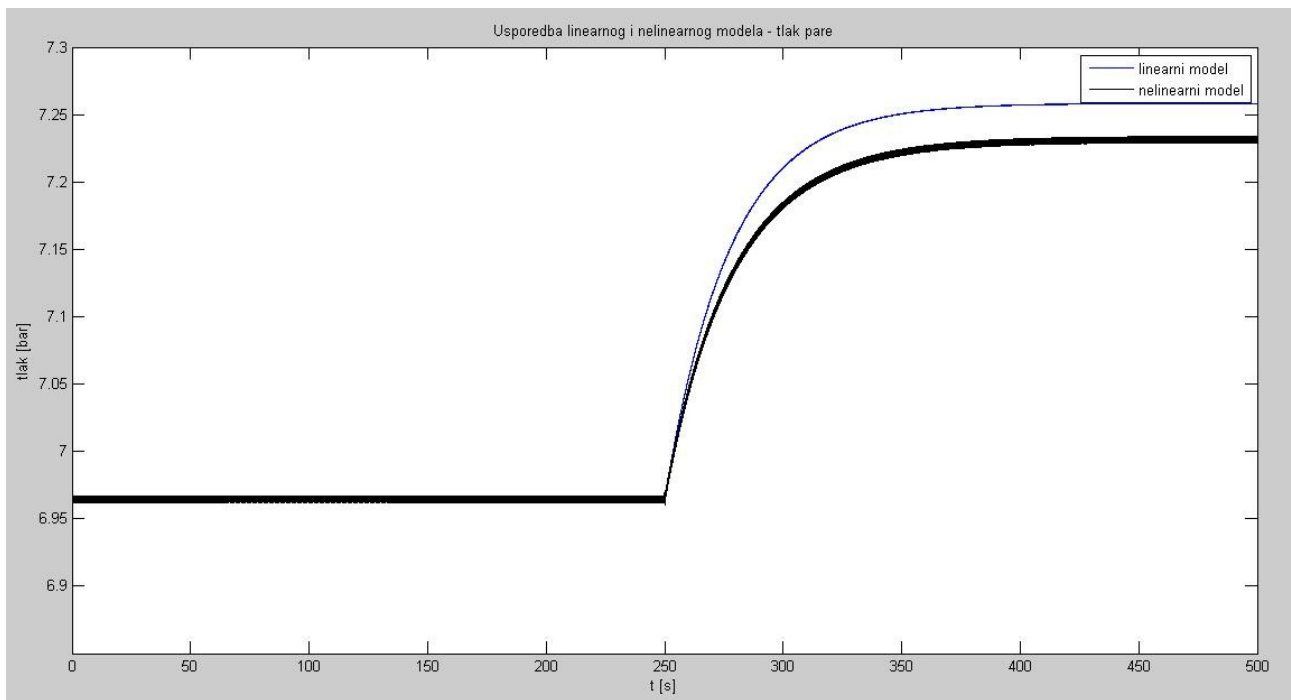
Linearni model ne smije se bitno razlikovati od nelinearnog modela u okolini radne točke. Iz tih razloga provodimo usporedbu rezultata nelinearnog modela i lineariziranog modela s obzirom na promjenu upravljive veličine. Simulaciju provodimo za dva stanja sustava (masu pare i izlaznu temperaturu vode) i za mjerenu veličinu – tlak. Simulacija se provodi za promjenu upravljive veličine za 0.5%.



Slika 7. Usporedba linearnog i nelinearnog modela – izlazna temperatura



Slika 7. Usporedba linearnog i nelinearnog modela – masa pare



Slika 8. Usporedba linearnog i nelinearnog modela – tlak pare

2.5. Prijenosna funkcija sustava

Nakon što smo zaključili da su nam i nelinearni i linearni model dovoljno dobri za daljnja razmatranja, prilagođavamo model realnim uvjetima upravljanja. To se odnosi na dvije činjenice:

1. mjerena veličina je tlak
2. ulazne veličine rada plamenika i pumpe za vodu (x i y) su linearno povezane

Kada zamijenimo navedene varijable, dolazimo do sljedećeg prostora stanja:

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} m_{pare} \\ \frac{d}{dt} T_{izlazna} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_{pare} \\ T_{izlazna} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 & B_2 \\ B_3 & B_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y \\ z \end{bmatrix} \quad 2-18$$

$$[p] = [C_1 \ C_2] \cdot \begin{bmatrix} m_{pare} \\ T_{izlazna} \end{bmatrix} + [D_1 \ D_2] \cdot \begin{bmatrix} y \\ z \end{bmatrix} \quad 2-19$$

gdje su:

$$A1 = -3.0906 \cdot 10^3$$

$$A2 = -1.6892$$

$$A3 = 3.909$$

$$A4 = 17.6720$$

$$B1 = 0$$

$$B2 = -1000$$

$$B3 = 1.3507 \cdot 10^4$$

$$B4 = 0$$

$$C1 = 26.6047$$

$$C2 = 0.0304$$

$$D1 = 0$$

$$D2 = 0$$

Kako y predstavlja upravljivu veličinu, a z poremećaj na koji ne možemo utjecati, tražimo prijenosnu funkciju:

$$G(s) = \frac{P(s)}{Y(s)} \quad 2-20$$

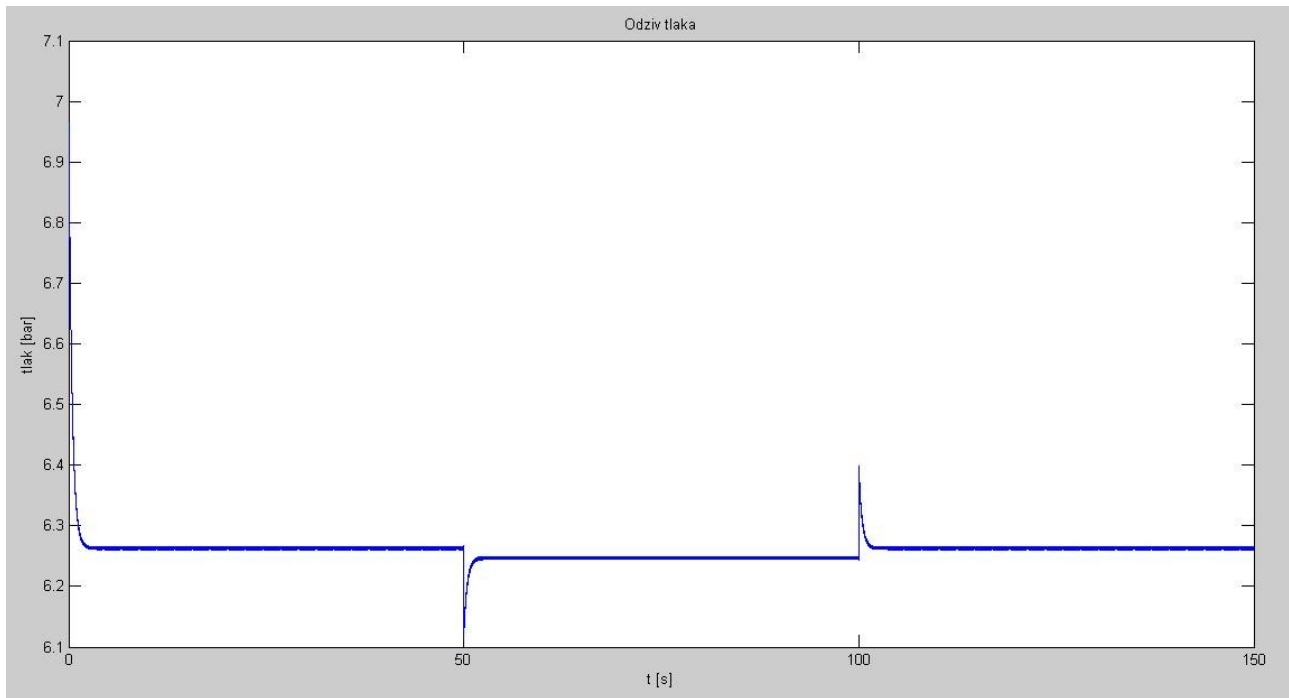
Korištenjem relacija 2-18 i 2-19, dolazimo do prijenosne funkcije:

$$G(s) = \frac{4.11s + 6668}{s^2 + 3123s + 113.4} \quad 2-21$$

2.6. Regulator sustava

2.6.1. Odziv sustava bez regulatora

Na slici 9 se vidi odziv sustava bez regulatora, odnosno uz regulator s jediničnim pojačanjem. Iz slike se vidi da sustav nije u radnoj točki što ukazuje na potrebu za integralnim djelovanjem.



Slika 9. Odziv tlaka

2.6.2. Odziv sustava s regulatorom

Sustav je testiran s četiri različita regulatora:

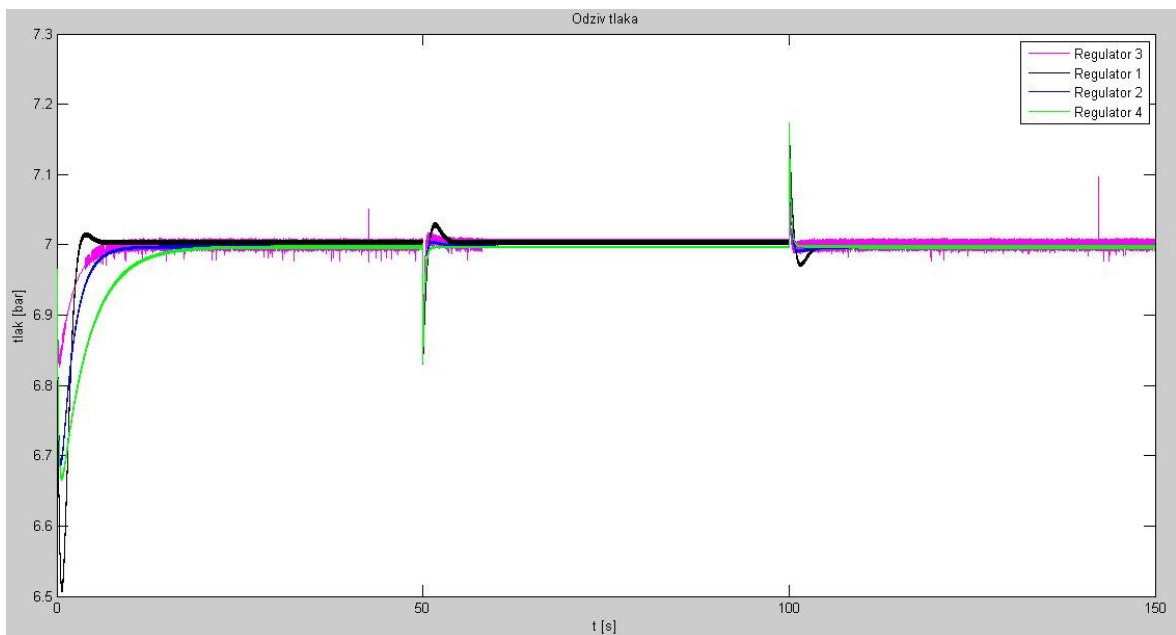
1. PI regulator s $K_r=1$, $T_i=1$
2. PI regulator s $K_r=2$, $T_i=2$
3. PI regulator s $K_r=4$, $T_i=2$
4. PI regulator s $K_r=2$, $T_i=4$

Odziv tlaka na skokovitu promjenu poremećaja prikazan na slici 10, a odziv upravljive veličine y na slici 11. Iz odziva se prvo primjećuje Regulator 3 koji zbog prevelikog pojačanja ima šum u odzivu, te samim time nije dobar za ovaj sustav.

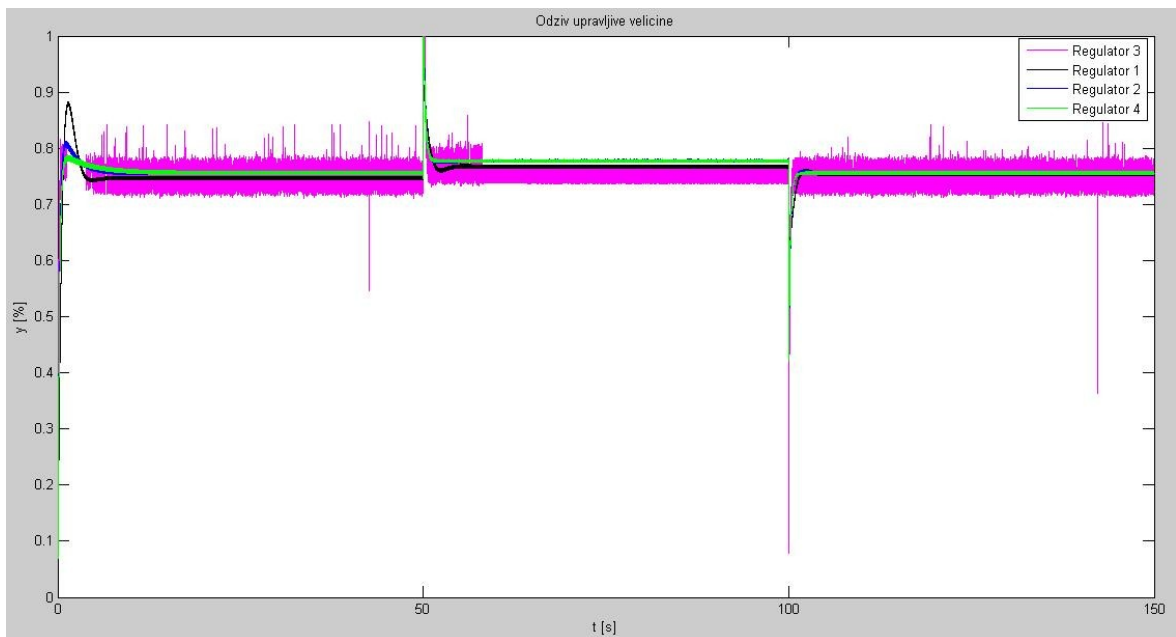
Što se tiče ostalih regulatora, s obzirom na stacionarnu točku sva tri su dovoljno dobri. Iako bi se iz grafa moglo zaključiti da Regulator 1 nema dobru stacionarnu točku u središnjem dijelu, iz očitanih vrijednosti se vidi da odstupanje nije veliko, te se može zanemariti.

Kada se promatra brzina odziva, daleko najbolja varijanta je Regulator 4 koji prvi

kompenzira promjenu poremećaja i to bez nadvišenja.



Slika 10. Odziv tlaka



Slika 11. Odziv upravljive veličine

S obzirom da nam je u radu kotla jednako bitan i odziv za početak rada i odziv u stacionarnoj točki, smatram Regulator 2 najboljim rješenjem koji oba zahtjeva dovoljno dobro ispunjava.

3. Zaključak

U Završnom radu je predstavljen nelinearni model brzog razvijača pare koji ujedinjuje znanja iz fizike, matematike, strojarstva, kemije i elektrotehnike. Iz simulacijskih rezultata se da očitati da model dobro opisuje sustav.

Kod postavljanja nelinearnog modela uzeta su dva stanja sustava u obzir – stanje mase pare i stanje temperature. Iz navedenih stanja se dobilo vladanje tlaka s obzirom na poremećaj i upravljivu veličinu.

Nakon postavljanja i simuliranja nelinearnog sustava, pristupilo se linearizaciji oko radne točke, što je isto tako uspješno obavljeno.

Na posljetku je projektiran regulator na osnovu odziva nelinearnog sustava.

4. Literatura

- [1] Kraut, Bojan, "Krautov strojarski priručnik", Kratis, Zagreb, 1997.
- [2] Interpolacija, <http://hr.wikipedia.org/wiki/Interpolacija> , travanj-srpanj 2011.
- [3] Water (data page),
http://en.wikipedia.org/wiki/Steam_table#Water.2Fsteam_equilibrium_properties, travanj-srpanj 2011.
- [4] Toplinska energija tijela,
<http://www.holo.hr/Formule/Pregled/tabid/62/cid/F3/fid/Fiz07-01/Default.aspx>, travanj-srpanj 2011.
- [5] Properties of Saturated Steam – Pressure in Bar
http://www.engineeringtoolbox.com/saturated-steam-properties-d_457.html, travanj-srpanj 2011.
- [6] Density of Fluids – Changing Pressure and Temperature
http://www.engineeringtoolbox.com/fluid-density-temperature-pressure-d_309.html, travanj-srpanj 2011.
- [7] Bratina, Božidar, "Modeliranje parnega kotla na biomaso", Diplomski rad, Fakulteta elektrotehnike, računalništvo in informatike, 2004

5. Sažetak

U radu je opisano modeliranje nelinearnog vladanja brzog razvijča pare. Opisuje komplicirano vladanje brzog razvijča pare i prikazuje rezultate simuliranja nelinearnog i lineariziranog modela. Za simulaciju brzog razvijča pare je korišten programski alat Matlab/Simulink s različitim PI regulatorima na nelinearnom modelu sustava. Prikazane su prednosti i mane pojedinih regulatora.

6. Summary

This thesis is about modelling, where a non-linear dynamic model of a fast steam generator is presented. It describes complicated dynamics of the steam generator and shows simulation results of the non-linear and linearized model. Matlab/Simulink software is used for simulation of the steam generator, with different PI regulation on non-linear model, where the advantages and disadvantages of the different regulation are shown.