

IDENTIFIKACIJA I UPRAVLJANJE CNG SISTEMOM OPISANOG IRACIONALNOM FUNKCIJOM PRENOSA**IDENTIFICATION AND CONTROL OF CNG SYSTEM DESCRIBED BY IRRATIONAL TRANSFER FUNCTION**Filip Stojanović, *Fakultet Tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj – U ovom radu prikazan je jedan pristup modelovanja složenog dinamičkog proces koji obuhvata identifikaciju strukture modela kao i estimaciju parametara modela. Opisani pristup biće prikazan na primeru modelovanja dinamičkog pritiska u CNG (Compressed Natural Gas) sistemu. Identifikovani model je potom korišćen za projektovanje optimalnog regulatora za upravljanje datim sistemom.

Ključne reči: Identifikacija, PID kontroler, CNG, common rail

Abstract - The purpose of this article presents a modeling approach to a complex dynamic process which includes model structure identification as well as model parameter estimation. The described approach will be exemplified by the modeling of dynamic compression in the CNG (Compressed Natural Gas) system.

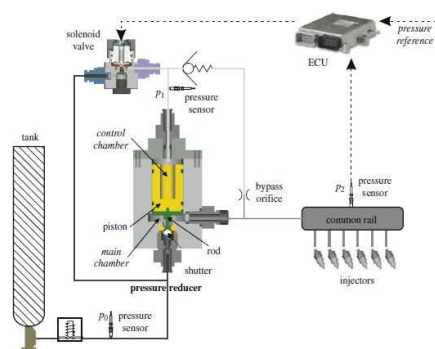
Keywords: Identification, PID controller, Common rail

1. UVOD

Rastuća potražnja za motorima sa smanjenim troškovima goriva ili sistemima podsticaja za smanjeni porez i mobilnost, koji se primenjuju u mnogim zemljama, podstakla je proizvođače automobila da razviju sisteme koji rade na alternativnim gorivima. Benzinski motori sa unutrašnjim sagorevanjem koji rade na komprimovanom prirodnom gasu bazirani su na proverenim tehnologijama i obično imaju nižu emisiju izduvnih gasova i niže troškove goriva nego vozila na benzin i dizel. Očekuje se da će broj vozila sa pogonom na CNG (engl. *Compressed Natural Gas*) nastaviti da raste u idućim godinama. Mnogo je razloga za povećanu upotrebu alternativne tehnologije pogonskog sklopa CNG kao goriva. U motorima sa unutrašnjim sagorevanjem, koji su opremljeni sistemom ubrizgavanja *common rail injection* sistem, tačnost merenja vazduha i goriva striktno zavisi od regulacije pritiska. Tačnost u merenju je teško postići posebno za sisteme sa komprimovanim prirodnim gasom, jer kompresibilnost gasa čini proces isporuke goriva složenijim. Takođe, on sagoreva praktično bez čestica. U radu se govori o identifikaciji sistema nelinearnog modela (zbog složenosti nelinearnog sistema radi se sa linearnim sistemom, tako da se opisuje

ponašanje sistema oko neke radne tačke), njegovih parametara, kao i o modelovanju tog sistema.

Ovaj rad je posebno usmeren na definisanje dovoljno jednostavnog modela, koji je potom korišćen za projektovanje kontrolera za upravljanje opisanom sistemom. Sve pretpostavke su jasno specificirane u svakoj fazi postupka modelovanja. Konačni rezultati su potvrđeni upoređivanjem sa eksperimentalnim skupom podataka. Izgled CNG sistema koji je bio predmet istraživanja dat je na slici 1.

Slika 1: *Common rail sistem.* (Slika preuzeta iz [1])**2. MOTORI SA CNG SISTEMOM**

Prirodni gas, kao alternativno gorivo sa povoljnim ekološkim karakteristikama, je veoma atraktivan za primenu u današnje vreme i u budućnosti. Kao motorno gorivo, on se koristi u sabijenom obliku, gde se čuva u rezervoarima i pod pritiskom od 300 bar-a. Da bi se koristio u sklopu automobila potrebno je izvršiti redukciju pritiska i ugraditi *common rail* sistem za ubrizgavanje. Kako bi se postigla precizna regulacija pritiska u *common rail*-u, zapremina u reduktoru pritiska se deli na gornju „kontrolnu (upravljačku) komoru” i donju „glavnu komoru”. Komore su razdvojene pokretnim klipom i obe se napajaju gorivom iz rezervoara. Vertikalno pomeranje tog klipa zavisi od upravljanja i pritiska u glavnoj komori. Dotok pritiska kontrolne komore podešava se elektro-hidrauličnim solenoidnim ventilom, dok se dotok u glavnu komoru reguliše pomeranjem poklopca koji se nalazi na samom klipu. Protok u upravljačkoj komori će dovesti do porasta pritiska gasa na gornjoj površini klipa i time će se pomeriti ka dole. Time se i poklopac pomera te omogućava veći dotok u glavnu komoru čime povećava pritisak. Nasuprot tome,

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bila dr Mirna Kapetina, docent.

zatvaranje ventila smanjuje pritisak na gornjoj površini klipa koji se kreće na gore, poklopac se zatvara preko opruge i pritisak se smanjuje. Stoga, pošto se *common rail* puni gorivom koje dolazi iz upravljačke i glavne komore, elektronska upravljačka jedinica (ECU) može regulisati pritisak tako što pravilno upravlja servo ventilom. Precizna regulacija pritiska za ubrizgavanje je složena zbog sabijenosti stanja gasa, zbog čega se kao rešenje nameće projektovanje upravljanja zasnovano na modelima. Modelovanje CNG sistema sa ubrizgavanjem je korisno kako za analizu tako i za projektovanje upravljanja.

3. IDENTIFIKACIJA CNG SISTEMA

Model CNG sistema za ubrizgavanja razmatra dve zapremine kojima se upravlja, tj. upravljačku komoru i *common rail* krug (uključujući glavnu komoru i *common rail*).

Pretpostavimo da je pritisak u upravljačkoj komori p_1 , pritisak u glavnoj komori p_2 i da su x_1 i x_2 njihova promenljiva stanja, respektivno. Signali solenoidnog ventila ET_{sv} i injektora ET_{inj} kao ulazne promenljive u_1 i u_2 , takođe respektivno. Tj. $x_1 = p_1$, $x_2 = p_2$, $u_1 = ET_{sv}$ i $u_2 = ET_{inj}$.

U literaturi postoje različiti modeli ovakvog sistema [1]. Oni su po svojoj strukturi složeni i veoma nelinearni. Kako je većina metoda za projektovanje regulatora namenjena za linearne sistema i za takve pokazuje dobre performanse, cilj je modelovati proces linearnim sistemom u okolini radne tačke.

Ukoliko prostorna komponenta dinamike procesa nije od interesa, i želimo da uzmememo samo vezu ulaza i izlaza, onda je pogodan način za opisivanje takvih sistema opisivanje uz pomoć raznih oblika iracionalnih funkcija prenosa [2]. Kada govorimo o frakcionim modelima, njihova osnovna karakteristika je da dopuštaju amplitudsku karakteristiku koja je proizvoljnog negativnog nagiba. Kao posledica toga, logaritamska amplitudska frekvencijska (Bodeova) karakteristika kod frakcionih sistema može da sadrži segmentne proizvoljnog nagiba.

Obično se to zapisuje kao $\alpha \times 20\text{dB/dec}$, gde α može imati različite vrednosti. Ako to uporedimo sa sistemima celobrojnog reda, videćemo da se kod njih javljaju segmenti čiji su nagibi isključivo jednaki celobrojnom umnošku 20 dB/dec. Još jedna od osobina frakcionih sistema jeste da oni imaju fazno kašnjenje koje je konstantno. Promenom reda ta vrednost se može kontinualno podešavati. Kao posledica toga, asimptotsko fazno kašnjenje kod sistema frakcionog reda na visokim učestanostima može imati proizvoljnu vrednost. Kod klasičnih sistema to fazno kašnjenje može imati samo vrednosti celobrojnih umnožaka pravog ugla ($n\frac{\pi}{2}$) [2]. Postoje nekoliko skupova podataka koji su dobijeni eksperimentalnim putem iz FIAT-ovog istraživačkog centra (*Valenzano, Italy*) [1]. Jedan od tih skupova podataka korišćen je u ovom radu najpre za identifikaciju strukture modela nad kojim će kasnije biti vršeno upravljanje tj. za projektovanje optimalnog regulatora za upravljanje datim sistemom. Kako bi bilo intuitivnije, u tabeli 1 su napomenute i date osnovne veličine tj. ulazi i izlazi iz postojećeg skupa podataka. To su veličine koje figurišu u modelu (i samom sistemu, naravno) i koje su korišćene pri identifikaciji.

Tabela 1: Veličine u sistemu.

Veličine	
Simboli	Signal
$ET_{ev} (u_1)$	solenoidnog ventila [A]
$ET_{inj} (u_2)$	injektora (jedan injektor) [A]
$p_1 (x_1)$	pritisak upravljanja (engl. <i>control pressure</i>) [bar]
$p_2 (x_2)$	pritisak u šini (engl. <i>common rail pressure</i>) [bar]

Identifikacija sistema vršena je iz dva dela. Prvi deo sistema činio je deo sistema od u_1 do p_1 , dok je drugi deo sistema nad kojim je vršena identifikacija bio deo sistema od p_1 do p_2 . Metod identifikacije sastoji se od sledećih koraka:

- formiranje diskretnog ARX modela visokog reda na osnovu raspoloživih skupova podataka,
- analiza frekvencijske karakteristike dobijenog modela i identifikacija adekvatne strukture frakcionog sistema na osnovu Bodeove karakteristike,
- estimacija parametara modela primenom PSO algoritma [3].

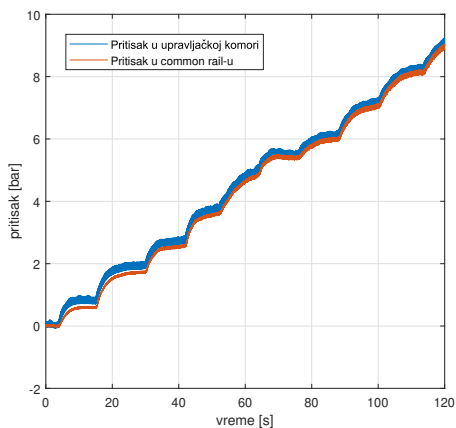
3.1 Identifikacija frekvencijskih karakteristika

U naučnoj literaturi postoji veći broj metoda za identifikaciju modela frakcionog reda [5]. Različiti pristupi za modelovanje uslovljeni su različitim podacima koji su raspoloživi i nameni modela. U sklopu ovog rada na raspolaganju su bili podaci u vremenskom domenu. Takve podatke je bilo moguće iskoristiti da bi se formirao autoregresioni model sa egzogenom (spoljašnjom) pobudom (eng. *Auto-Regressive with eXogenous input model*), tj. ARX model visokog reda. Dalja analiza frekvencijskih karakteristika tog modela omogućila je procenu strukture frakcionog modela nižeg reda koji će dovoljno dobro aproksimirati frekvencijske karakteristike dobijenog ARX modela. Ovi postupci će biti opisani u nastavku.

Kako je već navedeno, predloženo je da se skupovi podataka u vremenskom domenu iskoriste za formiranje ARX modela visokog reda. Strukturu ovog modela možemo posmatrati kao vremenski diskretan proces opisan diferencnom jednačinom:

$$A(q)y(k) = B(q)u(k-1) + e(k), \quad (1)$$

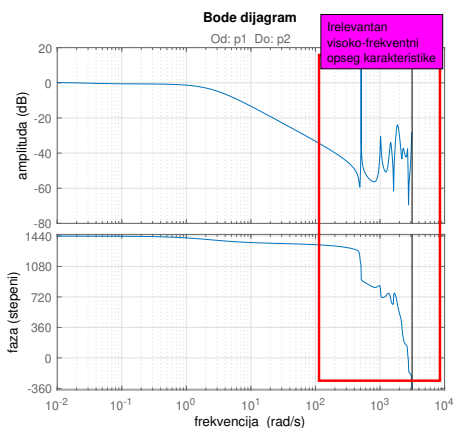
gde y predstavlja izlaz iz procesa, u je zadati ulaz, a e je poremećaj. $A(q)$ i $B(q)$ su polinomi gde promenljiva q predstavlja operator jediničnog prednjačenja. Ti polinomi su reda n i $n-1$, respektivno. Kažemo da red modela n mora biti dovoljno veliki kako bi se mogla opisati sva dinamika sistema. Pre bilo čega, tj. bilo koje identifikacije nekog linearnog modela, neophodan je izbor radne tačke. Radne tačke u ovom slučaju jesu 4.596 i 3.688. Ulazni pritisci sa varijacijom signala oko radne tačke dati su na slici 2.



Slika 2: Varijacije signala oko radne tačke, pri čemu se signali koriste kao ulazni i izlazni podaci u procesu identifikacije. (Perioda uzrokovanja je 1ms, a Nikvistova frekvencija je 500Hz)

3.2 Formiranje diskretnog ARX modela

Empirijskim putem, nakon nekoliko numeričkih testova, određeno je da je odgovarajući ARX model 20-og reda, jer modeli nižeg reda nisu mogli adekvatno da predstavljaju frekventnijske karakteristike u opsegu koji je bio od interesa. Na slici 3 prikazana je frekventnijska karakteristika modela koji je dobijen. Lako se može uočiti da je amplitudska frekventnijska karakteristika približno linearna po segmentu, međutim, takođe sa nagibom koji nije celobrojni umnožak od 20 dB/dec.



Slika 3: Bodeova karakteristika ARX modela.

3.3 Identifikacija frakcionog modela

Ukoliko analiziramo amplitudsko frekventnijsku karakteristiku ARX modela sa slike 3 dolazimo do modela sledeće strukture

$$G(s) = \frac{k}{\left(\frac{s}{\omega_1} + 1\right)^{\alpha_1}} \quad (2)$$

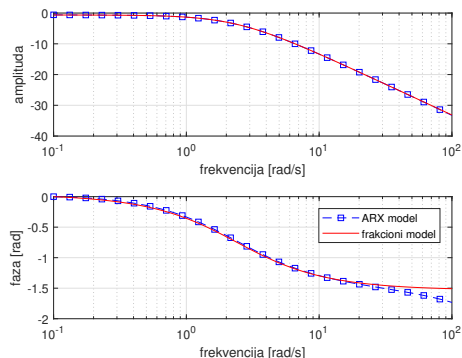
Parametri u jednačini su pojačanje k , prelomna frekvencija ω_1 i koeficijent necelog reda α_1 . Vrednosti parametara modela određene su minimizacijom greške amplitudskih odziva dobijenog ARX modela i frakcionog modela, odnosno, minimizacijom kriterijuma optimalnosti koji je naveden

$$J = \sum_{k=1}^N \left| 20 \log |G(j\xi_k)| - 20 \log \left| \frac{B(e^{j\xi_k T})}{A(e^{j\xi_k T})} \right| \right|, \quad (3)$$

gde $\xi_k, k \in \{1, \dots, N\}$ predstavljaju ugaone frekvencije uniformno raspoređene u opsegu od $\omega_{min} = 0.1$ rad/s do $\omega_{max} = 100$ rad/s, a $N = 100$.

4. NUMERIČKI REZULTATI SIMULACIJE

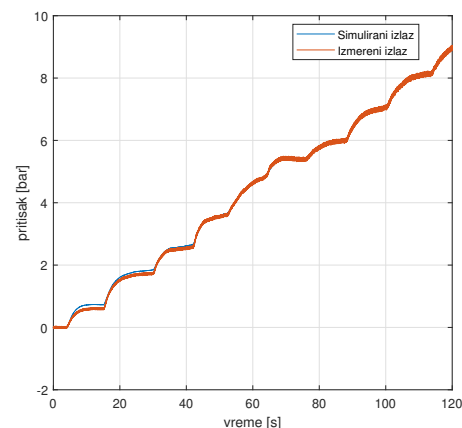
Nakon optimizacije frakcionog modela (2) PSO algoritmom u cilju dobijanja parametara frakcionog modela, ti parametri prikazani su u $k = 0.929843$, $\omega_1 = 2.385601$ i $\alpha_1 = 1.002118$. Na osnovu dobijenih parametara optimizacije, sa slike 4 možemo videti slaganje frakcionog i ARX modela u frekventnijskom domenu.



Slika 4: Frekventnijske karakteristike dobijenog ARX modela i optimalnog frakcionog modela prikazane u relevantnom.

4.1 Validacija frakcionog modela

Na slici 5 prikazani su izlazi iz ARX modela i podataka koji su eksperimentalno dobijeni u vremenskom domenu.



Slika 5: Prikaz validacije modela: poređenje rezultata simulacije dobijenog ARX modela sa eksperimentalnim rezultatima.

Ovakav postupak identifikacije formiran je za modelovanje sistema od signala u_1 do x_1 , kao i od x_1 do x_2 za više skupova podataka. Kao rezultat toga dobijene su dve funkcije prenosa G_1 i G_2 koje u proizvodu čine funkciju prenosa procesa koja opisuje uticaj ulaza ventila u_1 na pritisak p_2 , odnosno promenljivu x_2 . S obzirom da se radi, o kako je već rečeno, frakcionim funkcijama, kako bi se obavila simulacija, one su aproksimirane racionalnim funkcijama nekog višeg reda. Pošto govorimo o rednoj vezi ove dve funkcije, onda će proizvod novoformiranih funkcija $G_1(s)$ i $G_2(s)$ činiti funkciju procesa celokupnog sistema $G_p(s)$. Funkcija prenosa celokupnog procesa data je u jednačini. Takva

funkcija prenosa (4) je dalje poslužila za formiranje optimalnog regulatora

$$G_p(s) = \frac{1201 \cdot 10^4 s^4 + \dots + 1665 \cdot 10^8}{s^6 + 33870 s^5 + \dots + 1118 \cdot 10^7 s + 2864 \cdot 10^6} \quad (4)$$

5. OPTIMALNI PID REGULATOR

U ovom poglavlju biće reči o optimalnom PID regulatoru koji je korišćen za sistem koji je prethodno modelovan.

5.1 PID regulator za CNG sistem

Najpre su definisane su mere za ocenu kvaliteta regulacije koje su primenjene da bi se pronašli optimalni parametri za PID regulator kojim se vrši upravljanje. Kriterijum optimalnosti i odgovarajuća ograničenja koja su u izvedbi predstavljena kao kaznene funkcije treba da garantuju kvalitet regulacije. Optimizacijom su dobijeni parametri PID regulatora koji su se pokazali kao dobri. Zahvaljujući tim merama performansi sistema projektovan je odgovarajući PID regulator za upravljanje dinamičkim pritiskom CNG sistema.

Funkcija prenosa sistema navedena je u prethodnom delu rada dok regulator treba da bude u formi

$$G_c(s) = \frac{K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s}{s T_f + 1} \quad (5)$$

Kriterijum optimalnosti je integral apsolutne greške koji se definiše kao:

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (6)$$

Ograničenja su data kao:

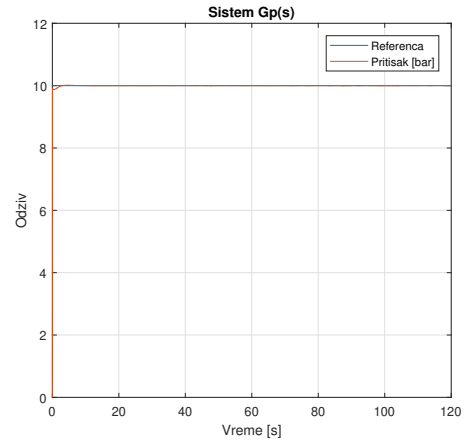
$$M_s^{min} \leq \max_{\omega \geq 0} \left| \frac{1}{1 + G_c(j\omega)G_p(j\omega)} \right| \leq M_s^{max},$$

$$Q = \max_{\omega \geq 0} \left| \frac{k_i \frac{G_p(j\omega)}{j\omega}}{1 + G_c(j\omega)G_p(j\omega)} \right| \leq Q^{max},$$

$$M_p^{min} \leq \max_{\omega \geq 0} \left| \frac{G_c(j\omega)G_p(j\omega)}{1 + G_p(j\omega)G_c(j\omega)} \right| \leq M_p^{max},$$

Parametri M_s^{min} i M_s^{max} su minimalna i maksimalna vrednost vrednosti M_s , a njihove vrednosti su redom 1.7 i 2. Parametar Q^{max} predstavlja ograničenje na rezonantni vrh frekvencijske karakteristike, a već je pokazano da je ta vrednost 1.01. Parametri M_p^{min} i M_p^{max} predstavljaju minimalnu i maksimalnu dozvoljenu vrednost M_p i te vrednosti su 1.3 i 1.6, respektivno. Parametar M_n^{max} predstavlja maksimalnu dozvoljenu osetljivost na šum i ima vrednost 20. Navedena ograničenja se dodaju u kriterijum optimalnosti uz pomoć kaznenih funkcija, te se dobija konačni kriterijum optimalnosti koji predstavlja funkciju prilagođenosti za PSO algoritam.

Posle optimizacije PSO algoritmom dobijaju se parametri PID regulatora $K_p = 2.35$, $K_i = 0.95$, $K_d = 1.85$ i $T_f = 0.1$. Na slici 6 prikazan je odziv CNG sistema koji je modelovan i na koji deluje izlazni poremećaj u vidu signala injektora, kada se njime upravlja PID regulatorom sa gore navedenim parametrima. Sa slike 6 se takođe može videti da regulator uspešno može da se izbori sa ovom vrstom poremećaja i da eliminiše njegovo dejstvo u pristojnom vremenskom intervalu.



Slika 6: Odziv CNG sistema upravljani PID regulatorom.

Stoga, govorimo o sistemu koji je stabilan i koji zadovoljava kriterijume performansi i robusnosti.

6. ZAKLJUČAK

Ovaj rad se bavi problemom identifikacije modela i upravljanjem CNG sistemom. Predstavljena je ideja da se fenomen nelinearnog procesa modeluju frakcionim modelom u frekvencijskom domenu, a verifikacija je izvršena poređenjem dobijenih rezultata simulacije sa eksperimentalnim podacima. Dobijeni model je potom poslužio za projektovanje optimalnog regulatora koji je pokazao zadovoljavajuće performanse u rezultatima simulacije.

7. LITERATURA

- [1] P. Lino, B. Maione and A. Rizzo, "Nonlinear modelling and control of a common rail injection system for diesel engines.", *Applied Mathematical Modelling*, 9(31), 1770–1784, 2007.
- [2] M. N. Kapetina, "Adaptivna estimacija parametara sistema opisanih iracionalnim funkcijama prenosa.", Novi Sad, 2017.
- [3] Ž. Kanović, M. R. Rapaić and Z. D. Jeličić, "Generalized particle swarm optimization algorithm - theoretical and empirical analysis with application in fault detection.", *Applied Mathematics and Computation*, 217(24):10175–10186, 2011.
- [4] M. N. Kapetina, P. Lino, G. Maione and M. R. Rapaić, "Estimation of non-integer order models to represent the pressure dynamics in commonrail natural gas engines.", *In 20th IFAC World Congress Toulouse, France.*, 15116–15121, 2017.
- [5] S. Victor, R. Malti, H. Garnier and A. Oustaloup. "Parameter and differentiation order estimation in fractional models.", *Automatica* 49(4):926 – 935, 2013.

Kratka biografija:



Filip Stojanović rođen je u Vranju 1995. god. Nakon završetka gimnazije, 2014. god. upisuje Fakultet tehničkih nauka smer Elektrotehnika i računarstvo čije osnovne studije završava 2018. Kontakt: filipicastojanovic@gmail.com