

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET U SARAJEVU
UNIVERZITET U SARAJEVU
ODSJEK ZA AUTOMATIKU I ELEKTRONIKU
Postdiplomski studij

Predmet: METODE I TEHNIKE IDENTIFIKACIJE
Predmetni nastavnik: Red. Prof. Dr. Adnan Salihbegović, dipl. el. ing.

IDENTIFIKACIJA POSTROJENJA ZA
NAMOTAVANJE PLASTIČNE MREŽE NA KOTUR
(Seminarski rad #7)

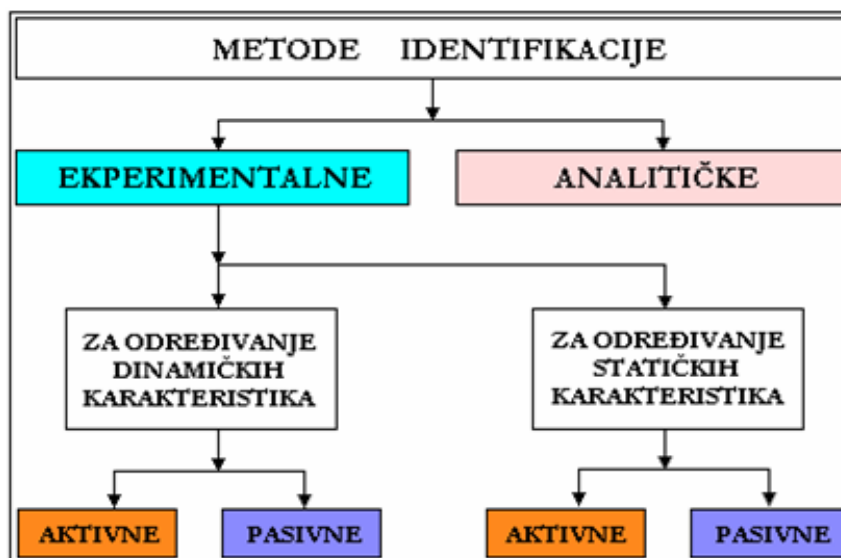
Sadržaj	
Sažetak	3
1 Uvod	4
1.1 Dinamika	5
1.2 Linearnost	5
1.3 Diskretni i kontinualni modeli	5
1.4 Stacionarnost (vremenska invarijantnost)	5
2 Primjena SIT toolbox-a za identifikaciju sistema u okviru MATLAB-a	6
2.1 Terminologija koja se koristi u SIT paketu	6
2.1.1 Estimacioni podaci (estimation data)	6
2.1.2 Validacioni podaci (validation data)	7
2.1.3 Prikazi modela (model views)	7
2.1.4 Prikazi podataka (data views)	7
2.1.5 Skupovi modela (model sets) ili strukture modela (model structures)	7
2.1.6 Metode parametarske identifikacije (parametric identification methods)	7
2.1.7 Neparametarske identifikacione metode (nonparametric identification methods)	7
2.1.8 Validacija modela (model validation)	7
2.2 Osnovne informacije o dinamičkim modelima	7
2.3 Osnovni dinamički model	8
2.4 Varijante opisa modela	8
2.4.1 ARX modeli	8
2.4.2 Linearni modeli u prostoru stanja (linear state-space models)	9
2.5 Multivarijabilni sistemi (MIMO - Multi Input, Multi Output)	9
3 Opis konkretnog problema	10
4 Parametarska identifikacija	14
4.1 ARX model	14
4.2 PEM metoda	16
4.3 PEM metoda za strukturu modela sa izlaznom greškom (output error model)	18
4.4 Metoda n4sid (N4weight opcija postavljena na CVA - canonical variable algorithm)	19
4.5 Metoda n4sid (N4weight opcija postavljena na MOESP)	21
5 Identifikacija procesa uz pomoć vještačke neuronske mreže	25
6 Zaključak	28
7 Literatura	28

Sažetak

U okviru rada je napravljen kratak uvod u teoriju identifikacije. Navedeni su principi metoda i tehnika koje se danas najčešće primjenjuju u praksi identifikacije dinamičkih procesa. Pri tome je stavljen poseban akcenat na primjenu datih tehnika u okviru MATLAB-ovog SIT toolbox-a. Nadalje, ukratko je opisan tehnološki proces namotavanja plastične mreže na kotur, koji treba biti identificiran na osnovu izmjerenih ulazno-izlaznih podataka. Testirane su neparametarske metode identifikacije koje se baziraju na korelacionoj analizi podataka. Takođe, primijenjeni su i razni parametarski modeli, kao *arx*, *pem*, *n4sid*, sa raznim varijantama internih postavki. Sve metode su praćene adekvantim kvalitativnim i kvantitativnim pokazateljima performanse. Na kraju su testirane i mogućnosti identifikacije pomoću vještačke neuronske mreže, s ciljem kompenzacije eventualnih nelinearnosti procesa.

1 Uvod

Identifikacija sistema je naučno-tehnička disciplina koja se bavi pronalaženjem skupa formula, tabela i grafova koji kvantitativno opisuju statičke i dinamičke veze među veličinama koje su relevantne za posmatrani sistem. Na Slici 1 je prikazan primjer grube klasifikacije metoda koje se koriste za identifikaciju [1].



Slika 1. Gruba podjela identifikacionih metoda

Analitičke metode identifikacije se odnose na iznalaženje matematičkog modela sistema koji jednoznačno odražava dinamiku sistema u potpunosti. Zahtijevaju poznavanje svih prirodnih fenomena koji se odvijaju u okviru sistema, kao i mogućnost njihovog matematičkog opisa. Dobijanje ovako tačnog modela za složene procese je veoma teško, a rezultati se dobijaju u glomaznoj i, za praktične svrhe teško iskoristivoj formi [1]. U okviru ovog rada, biće analizirane i primijenjene neke od metoda ekperimentalne identifikacije. S druge strane, ekperimentalna identifikacija sistema omogućuje uspostavljanje matematičkog modela sistema na bazi izmjerenih podataka [2]. Eksperimentalne metode određivanja dinamičkih i statičkih karakteristika mogu se podijeliti na aktivne i pasivne. Korištenje aktivnih metoda zahtijeva uvođenje, u toku eksperimenta, specijalnih djelovanja na objekat koja izazivaju promjene izlaznih veličina. Pasivne metode koriste informacije koje se dobijaju arhiviranjem podataka sa objekta u njegovoj normalnoj eksploataciji. Korelacionom analizom ovih podataka se može estimirati model sistema. Ovdje nisu potrebna nikakva specijalna djelovanja [1].

Postoji mnogo razloga zašto se uopšte vrši identifikacija sistema. Neki od njih su [3]:

- uvećanje znanja o ponašanju sistema
- predikcija ponašanja sistema
- projektovanje upravljačkih zakona
- estimacija stanja
- potrebe simulacije
- dijagnoza kvara, itd.

Veliki dio teorije i tehnika identifikacije sistema odnosi se na dinamičke sisteme koji su linearni, koncentrisani, diskretni i imaju konačan red. Glavni razlog za to je što su takvi sistemi relativno jednostavni za analizu i razumijevanje, a opet široko primjenjivi [3]. U nastavku se razmatraju osobine gore navedenih sistema.

1.1 Dinamika

Izlaz dinamičkog sistema u nekom trenutku zavisi od istorije ponašanja samog sistema, kao i od trenutnog dejstva (i istorije dejstva) na taj sistem. Stoga sistem očito posjeduje "memoriju", koja se često povezuje sa akumuliranom energijom ili materijom. Ako je samo jedna varijabla nezavisna (najčešće vrijeme), sistem je sa koncentrisanim parametrima (za razliku od sistema sa distribuiranim parametrima). Red sistema jednak je broju nezavisnih početnih uslova koji se moraju poznavati (uz dejstvo) da bi se moglo odrediti buduće kretanje sistema. Čisto kašnjenje uzrokuje beskonačan red sistema, osim ako se ne nalazi na ulazu ili izlazu iz sistema, kada se može tretirati odvojeno od dijela sistema bez kašnjenja.

1.2 Linearost

Kod identifikacije sistema se, kao i kod projektovanja i analize sistema upravljanja, najviše pažnje poklanja linearnim sistemima. Razlozi za to su: poteškoće pri analizi, generalizaciji, pa čak i kategorizaciji nelinearnih sistema. Dalje, bitan faktor za to je postojenje već mnogobrojnih razvijenih moćnih alata za analizu i sintezu linearnih sistema. Posljedica osobine linearosti je mogućnost identifikacije MIMO sistema "sabiranjem" sistema sa jednim ulazom, jer se njihovi efekti mogu linearno separirati, a potom superponirati. S druge strane mnogi nelinearni sistemi se primjenom adekvatne nelinearne transformacije eksperimentalnih podataka mogu približiti linearnom sistemu (npr. kvadriranjem naponskog ili strujnog ulaza, ukoliko je dejstvo električna snaga) [2]. Često je moguće dobrom tačnošću nelinearan model linearizirati oko radne tačke.

1.3 Diskretni i kontinualni modeli

Većina algoritama identifikacije sistema pretpostavljaju postojanje diskretnog identifikacionog modela, koji se gradi na osnovu uzorkovanog mjerenja podataka. Uzimanje uzoraka se najčešće vrši u pravilnim vremenskim intervalima (T). Poznato je da će doći do preklapanja (*aliasing*) odgovarajućih informacija u kontinualnom domenu ako je frekvencija uzorkovanja manja od one koju nameće Nyquist-Shannon-ov uslov. Najčešće se uzima frekvencija uzorkovanja koja je za red veličine veća od minimalne. S druge strane, ukoliko se "pretjera" sa frekvencijom uzorkovanja, može se desiti da realni minimalno-fazni kontinualni sistem, bude interpretiran kao neminimalno-fazni diskretni sistem [3].

Dalje, nekad je važno estimirati karakteristiku kontinualnog modela iz diskretnih podataka. To se često radi posredno, upotrebom bilinearne transformacije:

$$s = \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} \quad (1)$$

gdje su s i z operatori u Laplace-ovom i Z domenu respektivno.

1.4 Stacionarnost (vremenska invarijantnost)

Nestacionarni sistemi sadrže vremenski promjenljive parametre. Neki nestacionarni sistemi se mogu aproksimirati stacionarnim, ukoliko se njihovi parametri mijenjaju vrlo sporo u odnosu na vrijeme koje je potrebno za odgovarajuću identifikaciju [4].

Klasične metode identifikacije odnose se isključivo na stacionarne sisteme. U posljednjih dvadeset godina počeli su se razvijati algoritmi identifikacije za nestacionarne sisteme. Najčešće implementacije ovakve identifikacije su on-line podešavanja modela u konturama adaptivnog upravljanja [3]. U narednom poglavlju je dat kratak opis mogućnosti SIT paketa.

2 Primjena SIT toolbox-a za identifikaciju sistema u okviru MATLAB-a

Toolbox pod nazivom : “System identification toolbox” – SIT, u okviru MATLAB-a je razvio Prof Dr. Lenneart Ljung sa Univerziteta u Linkopingu -Švedska.

SIT toolbox omogućuje uspostavljanje jednostavnih, tačnih modela složenih sistema pomoću sekvenci podataka koji mogu biti opterećeni šumom. On sadrži alat za kreiranje matematskih modela dinamičkih sistema baziranih na prikupljenim i observiranim ulazno/izlaznim podacima. Alat ima fleksibilan grafički interfejs za korisnika (Graphic user interface – GUI), koji pomaže organizaciji podataka i modela. Sadržane tehnike identifikacije su korisne za primjene u kojima je uključena analiza i dizajn sistema upravljanja kao i procesiranje signala te analiza vremenskih serija kao i analiza vibracija [2,4]. Pošto se matematski modeli dinamičkih sistema grade na bazi mjerenih podataka, potrebno je neko predznanje o tim modelima da bi se uspješno koristili alati iz SIT paketa [4].

SIT paket omogućuje gradnju matematskih modela dinamičkih sistema na bazi mjerenih podataka iz procesa. Model se u suštini dobija podešavanjem parametara unutar datog ili pretpostavljenog modela procesa, sve dok njegov izlaz ne koincidira što je više moguće sa mjerenjima izlaza iz procesa. Dobar test kvaliteta, odnosno validnosti modela je da se pažljivo posmatra izlaz iz modela i usporedi sa mjerenim izlazom i na nekom drugom skupu ulaza/izlaza koji nije bio korišten za razvoj modela, i da se vidi kako se uklapa (fituje) sa tim izlazima. Ovaj postupak se naziva validacijom podataka (“validation data”). Korisno je ponekad, takodjer pogledati i u dio podataka koje model nije bio u stanju da reprodukuje prema mjerenim podacima (tzv. residuali tj. “residuals”). Korištene tehnike identifikacije mogu se primjeniti na vrlo opšte oblike modela. Najčešći oblici modela su [2,4]:

- modeli u obliku diferentnih jednačina (ARX i ARMAX)
- modeli u prostoru stanja (state-space models)

Za parametarske metode identifikacije mora se unaprijed pretpostaviti struktura sistema. Ovo ponekada može biti relativno lako jer se traži pretpostavljanje reda sistema u obliku cjelobrojne vrijednosti, ili pak da bude još dodatnih parametara. Ako se pretpostavi da je sistem linearan, može se direktno procijeniti njegov impulsni ili step odziv korištenjem korelacione analize ili njegovog frekventnog odziva, korištenjem spektralne analize. Ovo omogućava dodatno korisno poređenje sa drugim procjenjenim modelima. SIT paket sadrži sve uobičajene tehnike za podešenje parametara u svim vrstama linearnih modela. To takodjer omogućuje ispitivanje osobina modela i provjeru njihove korisnosti, kao i predprocesiranje i uređenje (filtriranje) prikupljenih podataka mjerenja. Rad sa linearnim modelima ne predstavlja neko veliko ograničenje, pošto su mnoge nelinearnosti u modelima takve prirode da omogućuju da se podaci mjerenja mogu nelinearno transformirati. Korištenjem informacija iz fizikalne slike procesa čiji model gradimo, identificirajući njegove parametre, možemo tražiti transformacije varijabli koje omogućuju da poznate nelinearnosti prevedemo transformacijama koordinata u linearne modele [2,4].

2.1 Terminologija koja se koristi u SIT paketu

2.1.1 Estimacioni podaci (estimation data)

predstavljaju skup podataka koji se koristi za fitovanje modela sa podacima. U GUI terminologiji (grafički korisnički interfejs), ovi podaci se takodjer zovu i radni podaci (*working data*)

2.1.2 Validacioni podaci (validation data)

predstavljaju skup podataka koji se koristi za validaciju (vrednovanje) modela. Ovo uključuje simulaciju modela sa ovim podacima i računanje ostataka (residuals) iz modela kada se primjene ovi podaci.

2.1.3 Prikazi modela (model views)

su različiti načini ispitivanja osobina modela. Oni uključuju prikaze nula i polova (zeros and poles), tranzijentni i frekventni odziv, i slične ostale ekrane.

2.1.4 Prikazi podataka (data views)

su različiti načini ispitivanja osobina skupova podataka. Najčešći i najkorisniji način je njihovo iscrtaavanje i pažljiva analiza. Time se mogu detektovati tzv. iskoci (outliers). Oni predstavljaju znak nepouzdanih mjerenja, koji mogu biti posljedica grešaka u radu mjernih instrumenata.

Frekventni sadržaj signala, u terminima periodograma ili spektralnih procjena (spectral estimates), daju dosta informacija pri analizi podataka.

2.1.5 Skupovi modela (model sets) ili strukture modela (model structures)

su familije modela sa podesivim parametrima. Procjena parametara (*parameter estimation*) se svodi na pronalaženje "najboljih" vrijednosti za ove parametre. Problem identifikacije sistema se sada svodi i na nalaženje dobre strukture modela kao i dobrih numeričkih vrijednosti za njegove parametre.

2.1.6 Metode parametarske identifikacije (parametric identification methods)

su tehnike procjene parametara za date strukture modela. U suštini, radi se o pronalaženju (numeričkim pretraživanjem), onih numeričkih vrijednosti parametara, koji daju najbolje slaganje između izlaza modela (simuliranog ili predskazanog (predicted)), i mjerenog izlaza.

2.1.7 Neparametarske identifikacione metode (nonparametric identification methods)

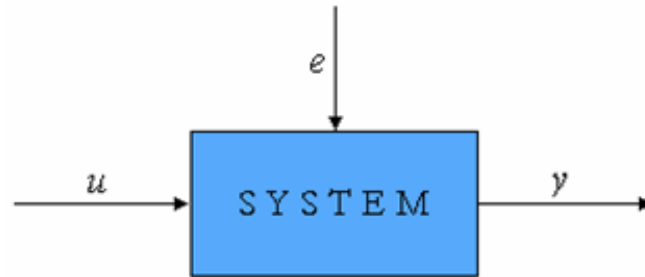
su tehnike procjene ponašanja modela bez nužnog korištenja datog parametriziranog skupa modela. Tipične neparametarske metode uključuju korelacionu analizu (*correlation analysis*), koja procjenjuje impulsni odziv sistema, i spektralnu analizu (*spectral analysis*), koja procjenjuje frekventni odziv sistema.

2.1.8 Validacija modela (model validation)

je proces povećanja povjerenja u kvalitet (izomorfnost) modela. U suštini, to se postiže intenzivnim testiranjem dobijenog modela da se ustanove svi njegovi aspekti. Od naročite važnosti je sposobnost modela da reproducira ponašanje skupa podataka za validaciju. Zbog toga je važno da se inspicira i dio podataka modela koji se ne uklapa u validacione podatke (ostaci, residuals) [2,4].

2.2 Osnovne informacije o dinamičkim modelima

Kako je već ranije navedeno, identifikacija sistema je gradnja njegovog dinamičkog modela. Zbog toga je potrebno neko apriorno znanje o procesu i modelima da bi se SIT mogao uspješno koristiti. Modeli opisuju relacije između signala mjerenja. Preporučljivo je praviti razliku između ulaznih i izlaznih signala. Tada su izlazi djelomično određeni i samim ulazima. Naprimjer, ako je objekat upravljanja avion, čiji su ulazi (upravljačke varijable), razne kontrolne površine na avionu kao što su krilca (ailerons), horizontalni rep (elevator), vertikalni repni djelovi (za kontrolu skretanja – attitude), itd. dok su izlazi naprimjer orijentacija aviona i njegova pozicija. U većini slučajeva, na izlaze utječe više signala nego što su samo mjerljivi ulazi. U primjeru letjelice, to bi, naprimjer, bili udari vjetera i efekti turbulencije. Takvi "nemjerljivi ulazi" se nazivaju signalima smetnji (disturbance) ili šuma (noise). Ako se ulazi, izlazi i smetnje označe sa u , y i e respektivno, veze među njima se mogu grafički prikazati kao na slijedećoj slici [2,4]:

Slika 2. Opšta predstava procesa: ulaz u , izlaz y i smetnja e

Svi ovi signali su funkcije vremena i vrijednost ulaza u bilo kojem vremenskom trenutku je $u(t)$. Često, kod primjene digitalnih sistema upravljanja i vođenja, samo se razmatraju diskretne vrijednosti ovog signala, pošto uređaji za mjerenje i obradu uzimaju i obrađuju ove podatke u trenucima uzorkovanja kT , $k \in \mathbf{N}$. Problem modeliranja je opis relacija koje postoje između ova tri signala [2,4].

2.3 Osnovni dinamički model

Osnovna relacija koja povezuje ove signale je linearna diferentna jednačina. Primjer ovakve jednačine je:

$$y(t) - 1.5y(t - T) + 0.7y(t - 2T) = 0.9u(t - 2T) + 0.5u(t - 3T) \quad (2)$$

Relacija ovog tipa kaže da se izlaz $y(t)$ može izračunati ako se zna ulaz i prethodne vrijednosti izlaza, a smetnja se može zanemariti, odnosno:

$$y(t) = 1.5y(t - T) - 0.7y(t - 2T) + 0.9u(t - 2T) + 0.5u(t - 3T) \quad (3)$$

Izlaz u trenutku t se dakle izračunava kao linearna kombinacija prethodnih ulaza i izlaza. Identifikacioni problem sastoji se u tome da se, koristeći mjerenja u i y , odrede:

- koeficijenti u ovoj jednačini (npr. -1.5, 0.7, itd)
- koliko mnogo prethodnih izlaza treba koristiti u opisu (2 u navedenom primjeru, tj. $y(t-T)$ i $y(t-2T)$)
- vrijeme kašnjenja u sistemu ($2T$ u primjeru, vidi se da će trebati proći $2T$ vremenskih jedinica prije nego što će promjena u utjecati na y)
- koliko mnogo zakašnjelih ulaza treba koristiti (dva u navedenom primjeru: $u(t-2T)$ i $u(t-3T)$). Broj zakašnjelih ulaza i izlaza se obično naziva redom modela (*model order*).

2.4 Varijante opisa modela

2.4.1 ARX modeli

Model koji je dat jednačinom (3) je primjer ARX modela. Postoji više varijanti ovog modela koje su poznate pod imenima:

- modeli sa izlaznom greškom (OE – *output error model*),
- ARMAX modeli,
- FIR modeli,

- BOX-Jenkins (BJ) modeli.

U osnovi, ovi modeli se mogu posmatrati kao varijante ARX modela, dozvoljavajući karakterizaciju osobina smetnji e .

2.4.2 *Linearni modeli u prostoru stanja (linear state-space models)*

Ovi modeli su također relativno lagani za korištenje. Bitna varijabla strukture sistema je red modela koji je skalarna varijabla, što znači da postoji samo jedan stepen slobode u traženju odgovarajućeg modela za opis podataka. Opšti linearni modeli se mogu simbolično opisati jednačinom:

$$y = \mathbf{G}u + \mathbf{H}e \quad (4)$$

koja kaže da je mjereni izlaz $y(t)$ suma doprinosa mjenog ulaza $u(t)$ i doprinosa koji šuma $\mathbf{H}e$. Simbol \mathbf{G} označava dinamičke osobine sistema, tj. kako se izlaz formira od ulaza. Za linearne sisteme \mathbf{G} predstavlja **prenosnu funkciju** sistema. Simbol \mathbf{H} se odnosi na šum, i naziva se **model smetnje**. On opisuje način formiranja smetnje na izlazu od istog standardiziranog izvora šuma $e(t)$. Modeli u prostoru stanja su čest oblik predstavljanja dinamičkih modela. Oni opisuju isti tip linearnih diferencijalnih relacija između ulaza i izlaza kao i ARX model, ali su tako organizirane da je samo jedno kašnjenje korišteno u izrazima. Da bi se ovo postiglo, uvedene su dodatne varijable, zvane varijable stanja (*state variables*). One nisu mjerljive ali se mogu rekonstruirati iz mjerljivih ulazno/izlaznih podataka. Za osnovno korištenje SIT toolboxa, dovoljno je znati **red** modela u prostoru stanja, povezan sa brojem zakašnjelih ulaza i izlaza, koji se koriste u odgovarajućim linearnim diferencijalnim jednačinama. Opis u prostoru opisan je slijedećim jednačinama:

$$\begin{aligned} x(t+1) &= \mathbf{A}x(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{K}e(t) \\ y(t) &= \mathbf{C}x(t) + \mathbf{D}u(t) + e(t) \end{aligned} \quad (5)$$

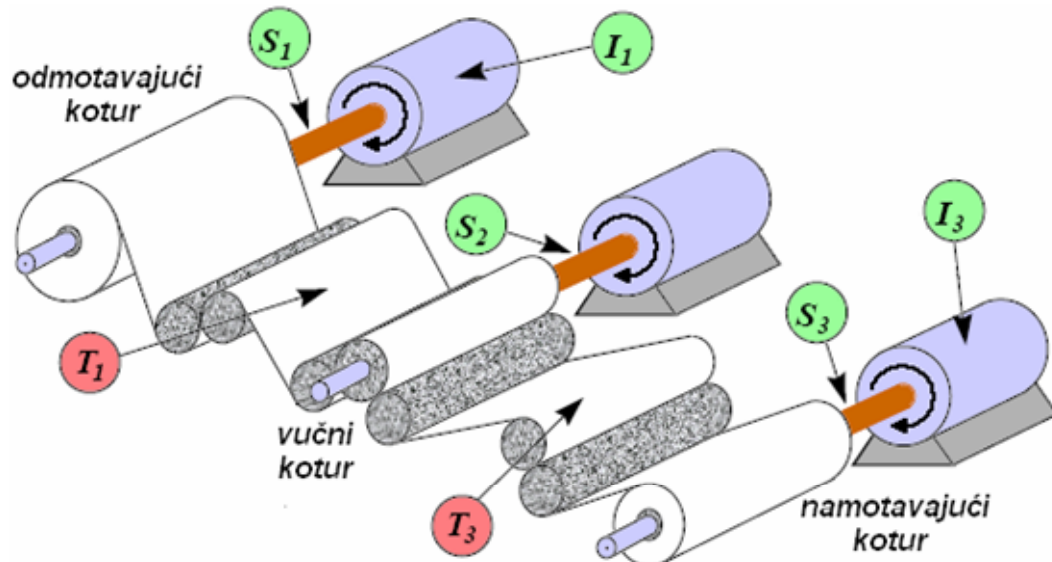
gdj gdje je $x(t)$ vektor varijabli stanja. Red modela je dimenzija ovoga vektora. Matrica \mathbf{K} određuje osobine smetnji. Ako je $\mathbf{K} = 0$, tada šum $e(t)$ utječe samo na izlaz, i ne gradi se nikakav specifični model za osobine šuma. Ovo korespondira sa $\mathbf{H} = 1$ u opštem modelu datom u (4), i obično se naziva **model sa izlaznom greškom (output error model)**. Kada je $\mathbf{D} = 0$, tada nema direktnog utjecaja sa $u(t)$ na $y(t)$. U tom slučaju utjecaj ulaza na izlaz prolazi preko $x(t)$ i bit će zakašnjen za najmanje jedan period uzimanja uzoraka. Prva vrijednost vektora varijabli stanja $x(0)$ odražava početne uslove za sistem na početku zapisa podataka. Kada se koriste modeli u prostoru stanja, tipična opcija je da li procijeniti \mathbf{D} , \mathbf{K} i $x(0)$ ili pretpostaviti da su jednaki nuli.

2.5 *Multivarijabilni sistemi (MIMO - Multi Input, Multi Output)*

Sistemi sa više ulaznih signala i/ili više izlaznih signala se zovu multivarijabilnim. Takvi sistemi su često mnogo veći izazov za gradnju modela. Naročito sistemi sa nekoliko izlaza mogu biti teški. Osnovni razlog teškoća je što međusprege nekoliko ulaza i izlaza vode ka kompleksnijim modelima. Strukture koje se koriste su bogatije u broju parametara koje treba identificirati da se dobije dobro uklapanje. SIT toolbox, kao i GUI općenito, dobro rade sa linearnim multivarijabilnim modelima. Svi ranije pomenuti modeli su podržani za jedan izlaz, višestruki ulaz. Za slučaj višestrukih izlaza, ARX modeli kao i modeli u prostoru stanja su pokriveni. Višestruki izlazi sa ARMAX i OE modelima su pokriveni za opis putem modela u prostoru stanja. ARMAX korespondira sa procjenom \mathbf{K} matrice, dok OE korespondira sa fiksiranjem \mathbf{K} na nulu. Ovo su inače iskačuće (pop-up) opcije u editoru za red GUI modela. Općenito govoreći, preferira se rad sa modelima u prostoru stanja za multivarijabilne sisteme, pošto se kompleksnost strukture modela lakše rješava. U suštini, ovdje se problem svodi na izbor reda modela.

3 Opis konkretnog problema

Glavni cilj ovog rada je primjena nekoliko identifikacionih tehnika za dobijanje matematičkog modela procesa namotavanja plastične mreže na kotur. Slika 3. prikazuje princip funkcionisanja samog postrojenja.



Slika 3. Proces namotavanja mreže na kotur

Plastična mreža se odmotava sa prvog kotura (odmotavajući kotur), ide preko vučnog kotura i konačno se namotava na namotavajući kotur. Koturi 1 i 3 su povezani sa istosmjernim motorima, koji su kontrolirani ulaznim strujama I_1 i I_3 . Ugaona brzina svakog kotura (S_1 , S_2 i S_3) kao i zatezanje u mreži između kotura 1 i 2 (T_1) i između kotura 2 i 3 (T_3) se mjeri pomoću odgovarajućih tahometara, dinamometara i mjerača tenzije. Ulazi su:

- 1) ugaona brzina kotura 1 (S_1),
- 2) ugaona brzina kotura 2 (S_2),
- 3) ugaona brzina kotura 3 (S_3),
- 4) struja u motor 1 (I_1),
- 5) struja u motor 2 (I_3).

Izlazi su:

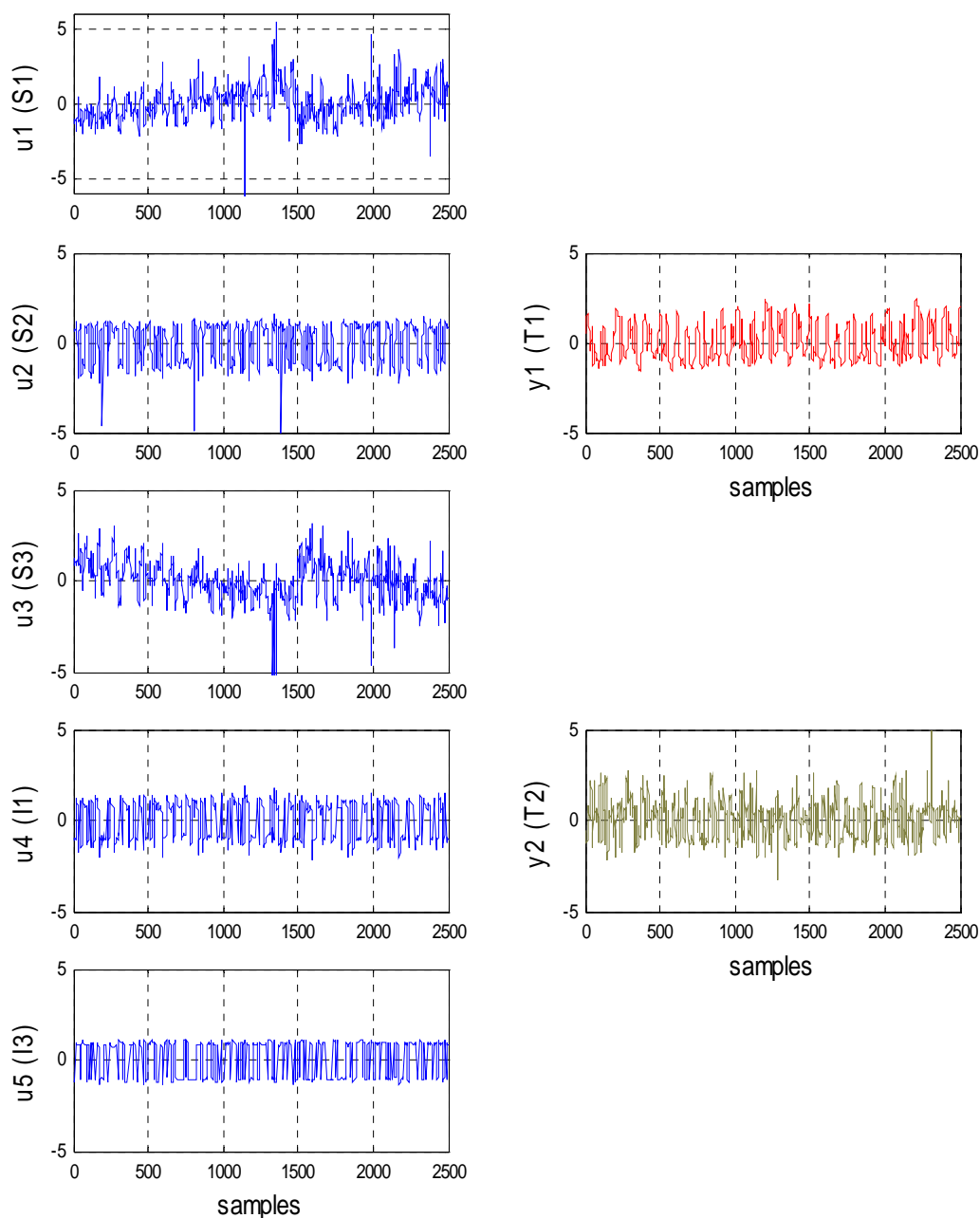
- 1) sila zatezanja u mreži između točkova 1 i 2 (T_1),
- 2) sila zatezanja u mreži između točka 2 i 3 (T_3).

Važnost upravljanja silama zatezanja leži u potrebi za kvalitetnim prenosom mreže, kao i za izbjegavanjem nabiranja i distorzije materijala i efekata klizanja. Ulazno-izlazna dinamička shema, prikazana je na Slici 4.



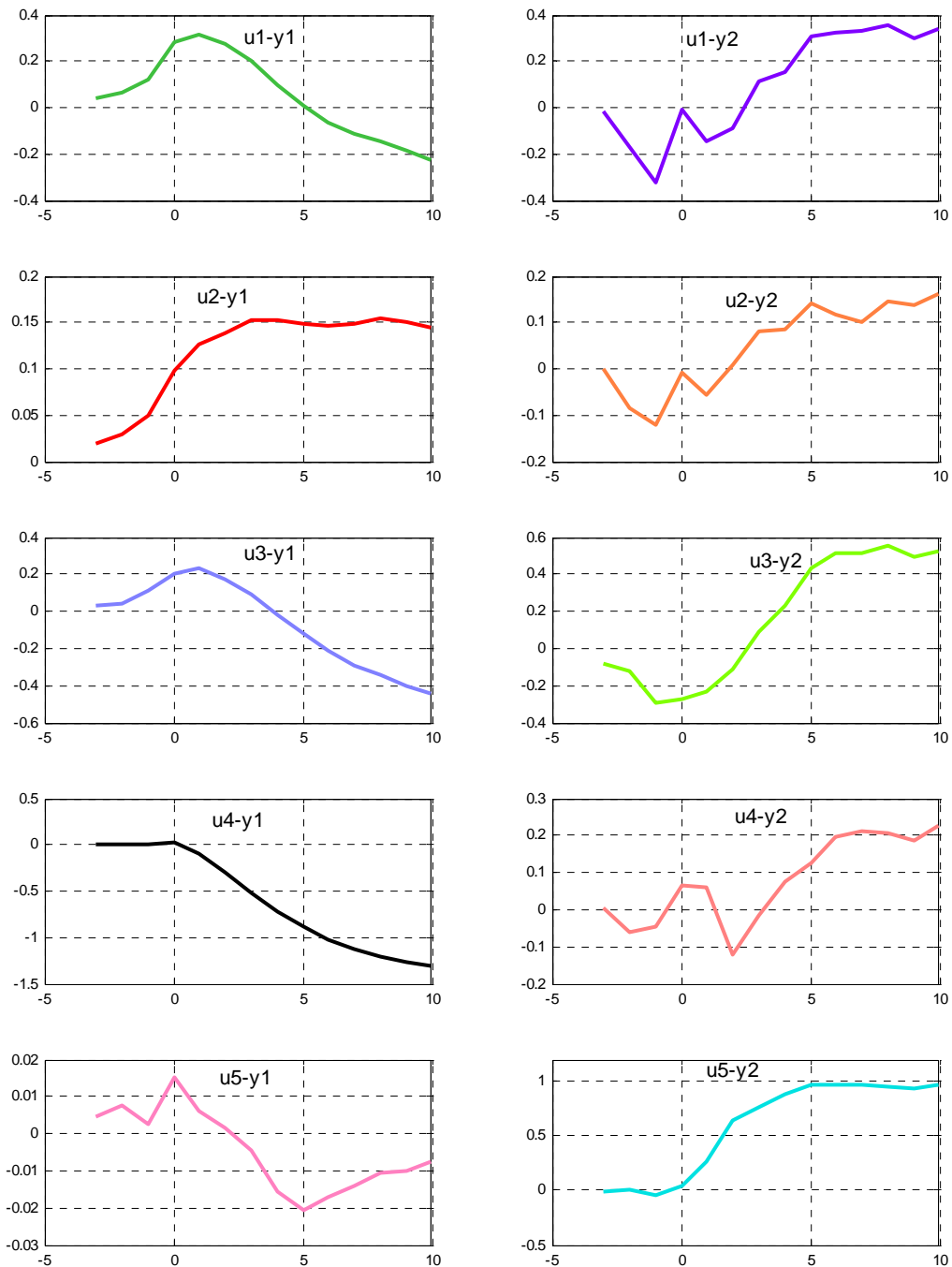
Slika 4. Ulazi i izlazi sistema

Profili snimljenih ulaznih i izlaznih veličina dati su na Slici 5. Na slici su uvedene i standardne oznake ulaza i izlaza.



Slika 5. Uzorkovani ulazi i izlazi procesa

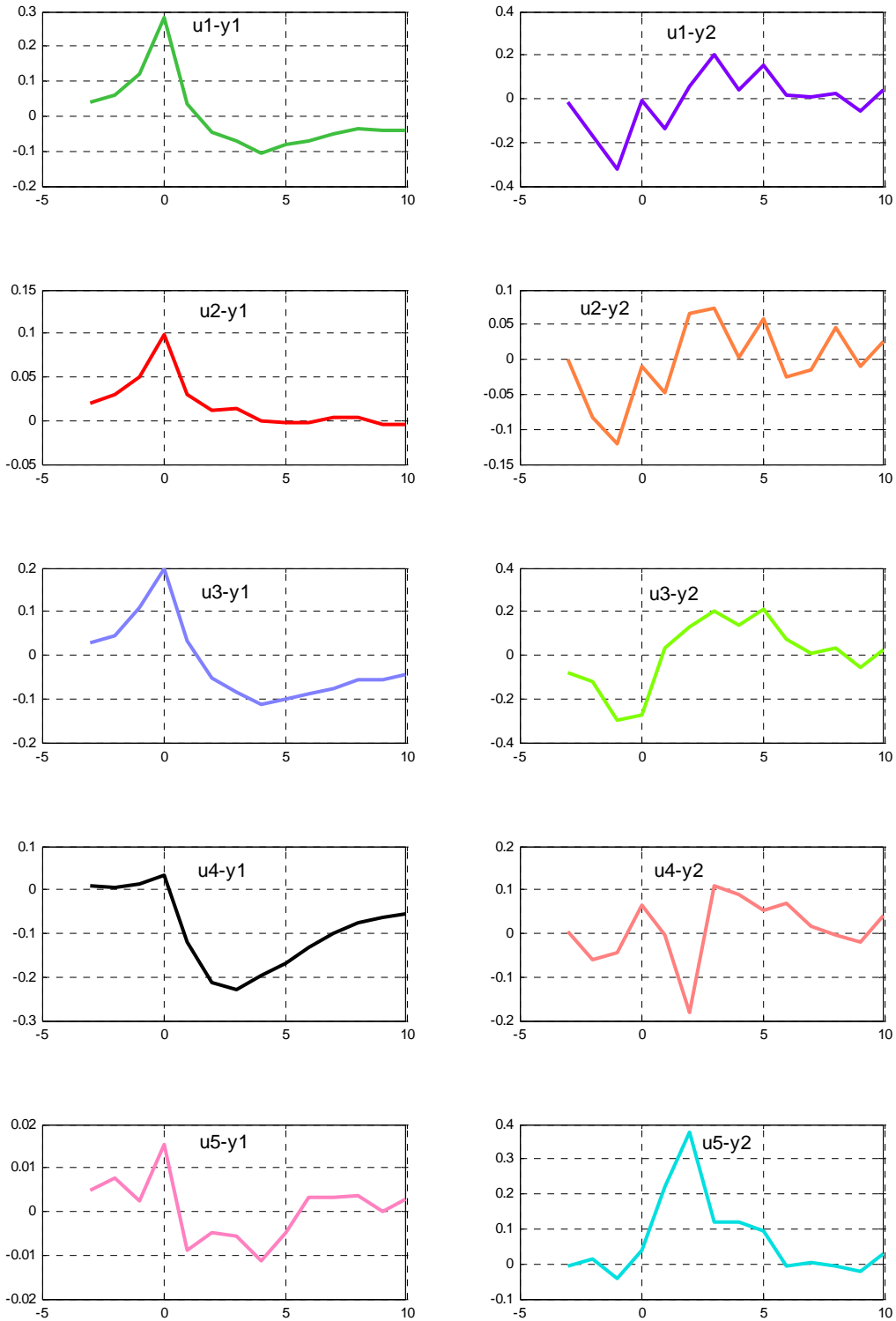
Običnim posmatranjem pojedinih ulaza i izlaza, teško je primijetiti da ne postoji korelacija između nekih od njih. Uz pomoć SIT toolbox-a, potrebno je izvršiti neparametarsku identifikaciju tako što će se odgovarajući step i impulsni odzivi estimirati korelacionim metodama. U nastavku će se, za samu estimaciju modela koristiti 70% uzoraka podataka (prvih 1750 uzoraka), a za validaciju estimiranog modela 30% podataka (zadnjih 750 uzoraka). Slika 6 pokazuje estimirane step odzive oba izlaza na svih pet ulaza.



Slika 6. Estimirani step odzivi pojedinih kanala

Može se primijetiti da je norma odziva prvog izlaza na peti ulaz za red veličine manja od normi ostalih odziva. Ovo daje dovoljno razloga za pretpostavku da se utjecaj ulaza u_5 na izlaz y_1 može zanemariti. Estimirane zavisnosti kanala u_1-y_1 kao i u_4-y_1 se lako interpretiraju, budući da pozitivne promjene struje I_1 i ugaone brzine S_1 prouzrokuju smanjivanje sile zatezanja T_1 . Interesantno je da je kanal u_1-y_1 protumačen kao neminimalno fazni sistem. S druge strane, povećanje ugaone brzine S_2 (u_2) prouzrokuje povećanje sile zatezanja T_1 (y_1). Takođe, jasno je da povećanje struje I_3 (u_5) i ugaone brzine S_3 (u_3) uzrokuju povećanje sile zatezanja T_3 (y_2). Ostaje nejasno zašto korelacije kanala u_3-y_1 i u_5-y_1 nisu saglasne. Takođe, logično bi bilo očekivati da ulazi u_1 (S_1) i u_4 (I_1) nisu korelirani sa izlazom y_2 (T_3), ili da njihove pozitivne promjene uzrokuju smanjivanje posmatranog izlaza. Očito je da SIT toolbox nije dao takvu estimaciju. Konačno, estimacija dinamike kanala u_2-y_2 nije u skladu sa

fizikalnom interpretacijom, budući da povećanje u_2 (S_2) prouzrokuje smanjenje tenzije y_2 (T_3). Razlozi ovakvih neslaganja estimiranih zavisnosti sa fizikalnom interpretacijom mogu se tražiti u nedovoljnom broju uzoraka za kvalitetnu korelacionu analizu i/ili značajnom dejstvu šuma. Odgovarajući impulsni odzivi su dati na sljedećoj slici.

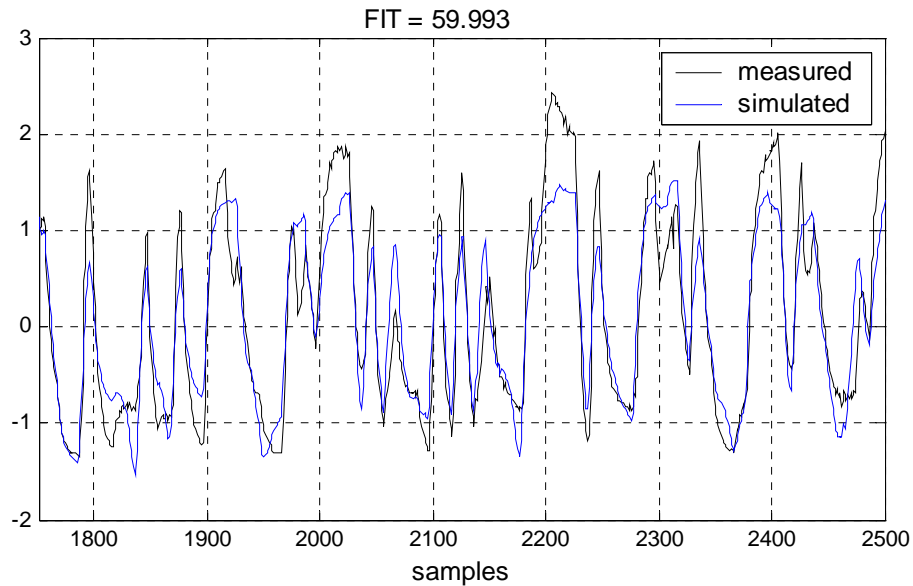


Slika 7. Estimirani impulsni odzivi pojedinih kanala

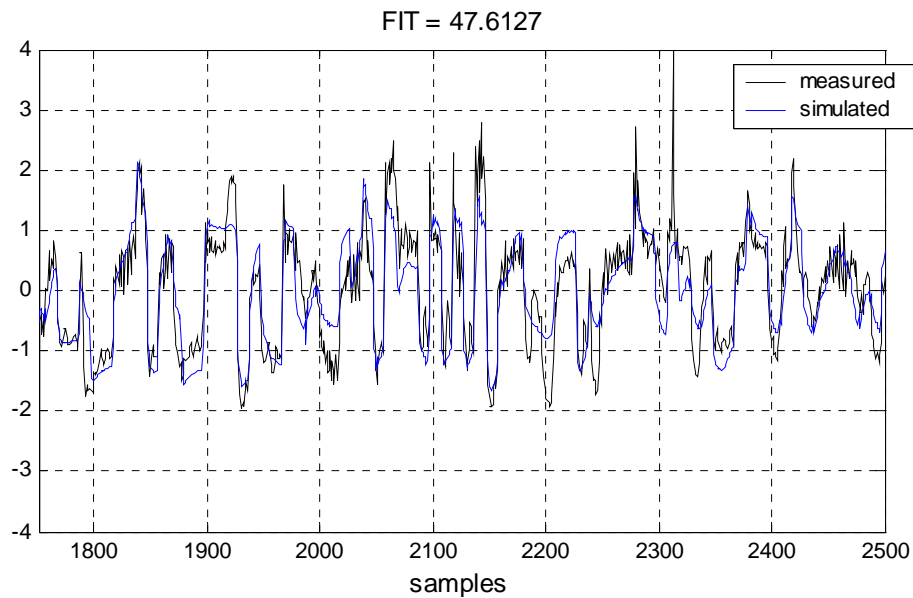
4 Parametarska identifikacija

4.1 ARX model

Testirajmo default-ni ARX model koji automatski nudi SIT paket ($n_a = 2$, $n_b = 2$, $n_k = 1$) - arx221, za unesene radne podatke.

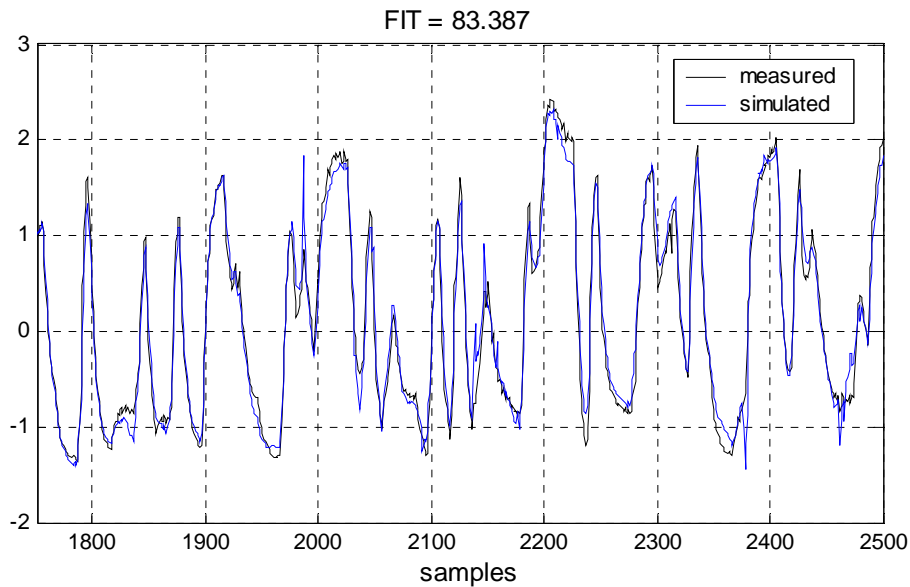
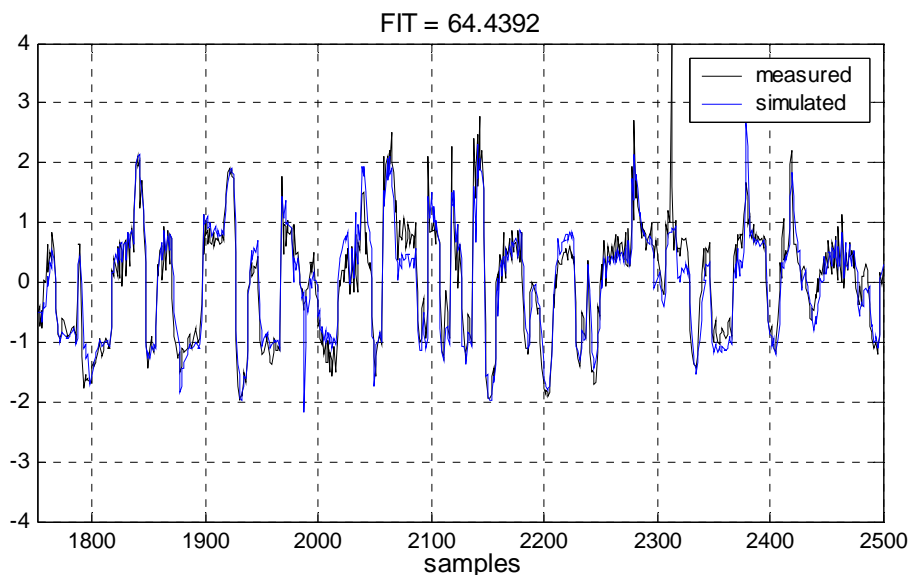


Slika 8. Rezultati: arx221 - y_1



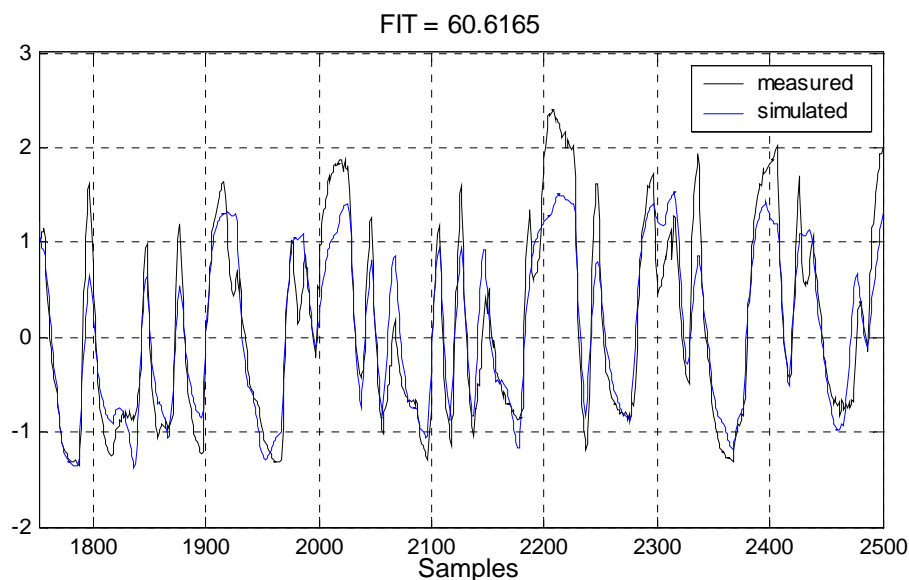
Slika 9. Rezultati: arx221 - y_2

Može se primijetiti da povećanje kašnjenja ulaza (određeno sa n_k), uzrokuje smanjenje procenta fitovanja. Probavanjem raznih varijanti za parametre n_a , n_b i n_c , može se zaključiti da je sub-optimalna postavka: $n_a = 4$, $n_b = 4$, $n_k = 0$. Povećavanjem reda sistema se mogu dobiti neznatno bolji rezultati.

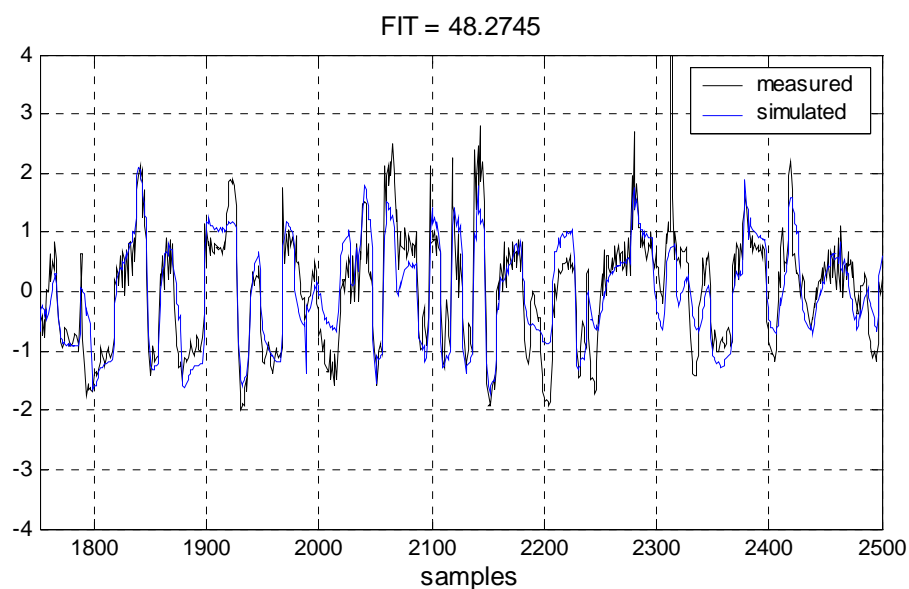
Slika 10: Rezultati: arx440 - y_1 Slika 11: Rezultati: arx440 - y_2

4.2 PEM metoda

Analizirajmo mogućnosti PEM metode za estimaciju modela u prostoru stanja. Default-ne postavke koje nudi SIT paket, za unesene radne podatke su: $n = 4$ (red modela), kao i kašnjenja odgovarajućih ulaza $[1 \ 1 \ 1 \ 1]$.

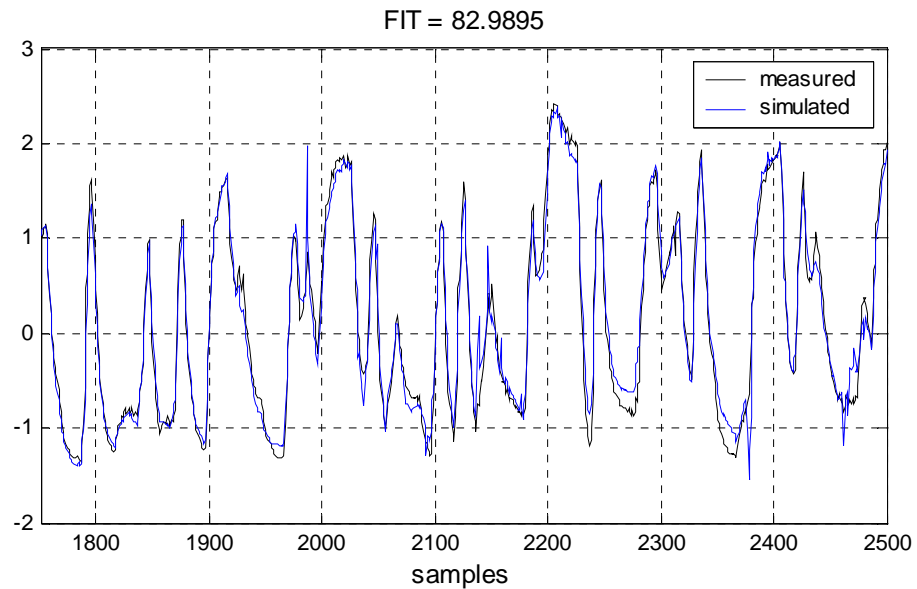
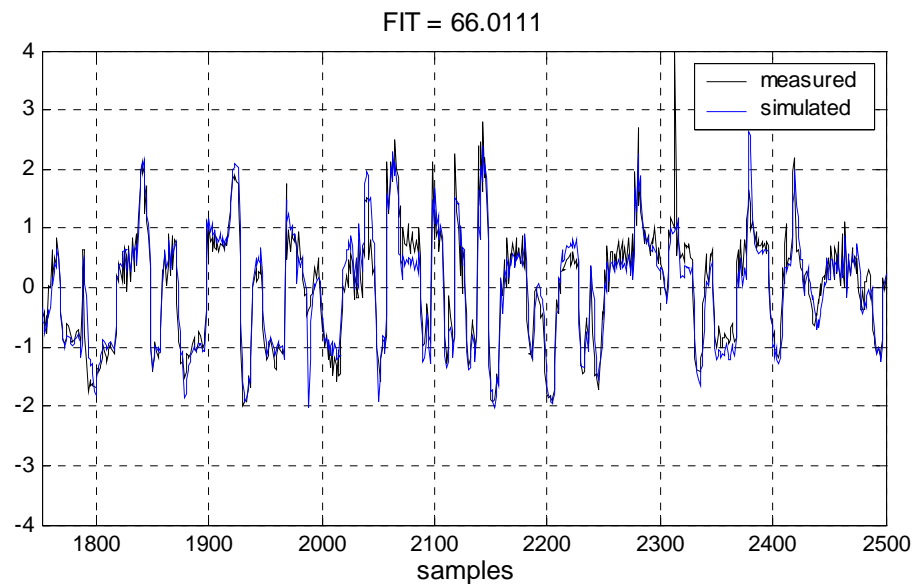


Slika 12. Rezultati: pss4 - y_1



Slika 13. Rezultati: pss4 - y_2

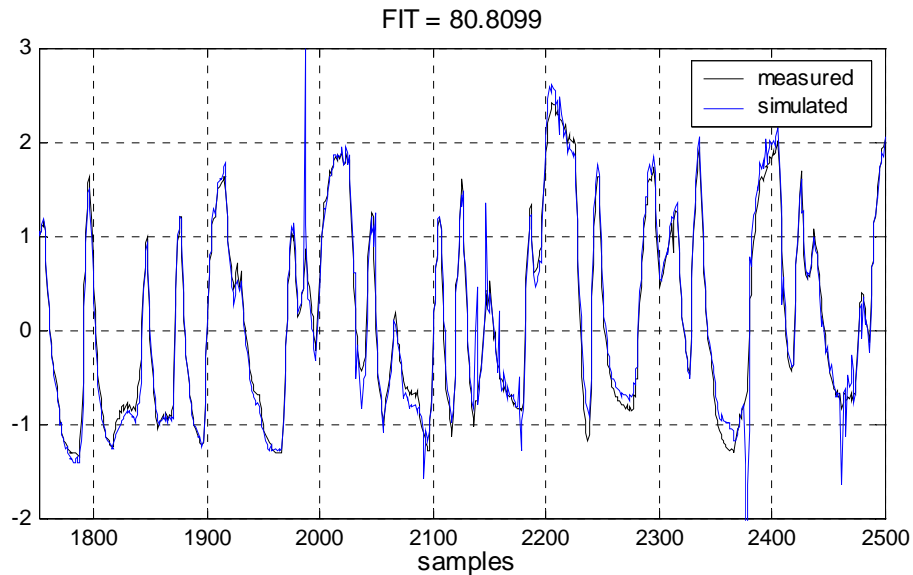
U skladu sa zaključcima, izvedenim iz analize ARX modela, logično je pokušati izbaciti kašnjenja ulaza, odnosno odgovarajuću matricu kašnjenja postaviti na $[0 \ 0 \ 0 \ 0]$. Slike 14. i 15. prikazuju rezultate koji opravdavaju pomenuti pokušaj.

Slika 14. Rezultati: pss4_00000 - y_1 Slika 15. Rezultati: pss4_00000 - y_2

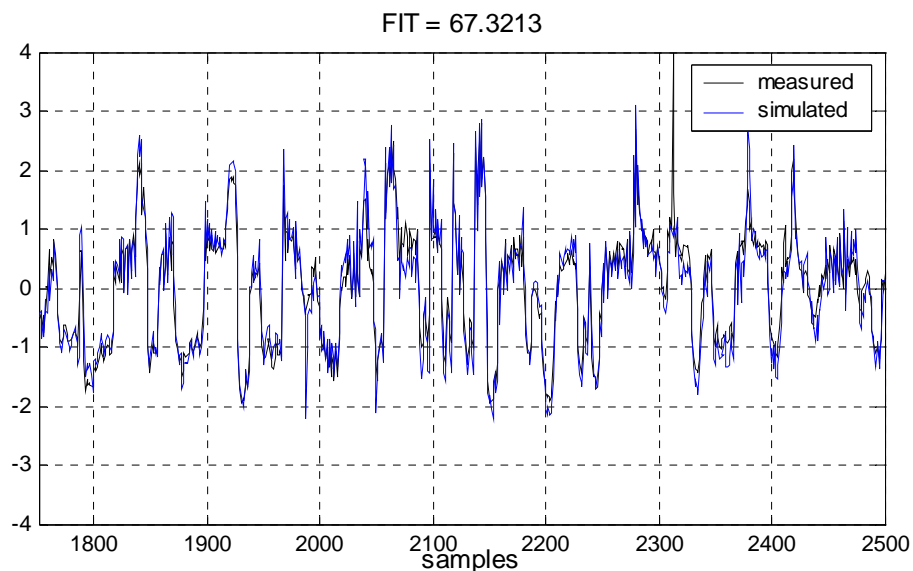
Lako se uvjeriti da se, povećavanjem reda sistema, uopšte ne povećava kvalitet fitovanja.

4.3 PEM metoda za strukturu modela sa izlaznom greškom (output error model)

Standardna PEM metoda za estimaciju modela u prostoru stanja analizirana u prethodnom potpoglavlju, uzima u obzir (i estimira) matricu \mathbf{K} , iz jednačine (5). U nastavku se analiziraju performanse algoritma estimacije za sistem četvrtog reda, ukoliko se matrica \mathbf{K} postavi na nulu. Sada, eventualne smetnje imaju utjecaja samo na izlaz.



Slika 16. Rezultati: pss4_OE - y_1

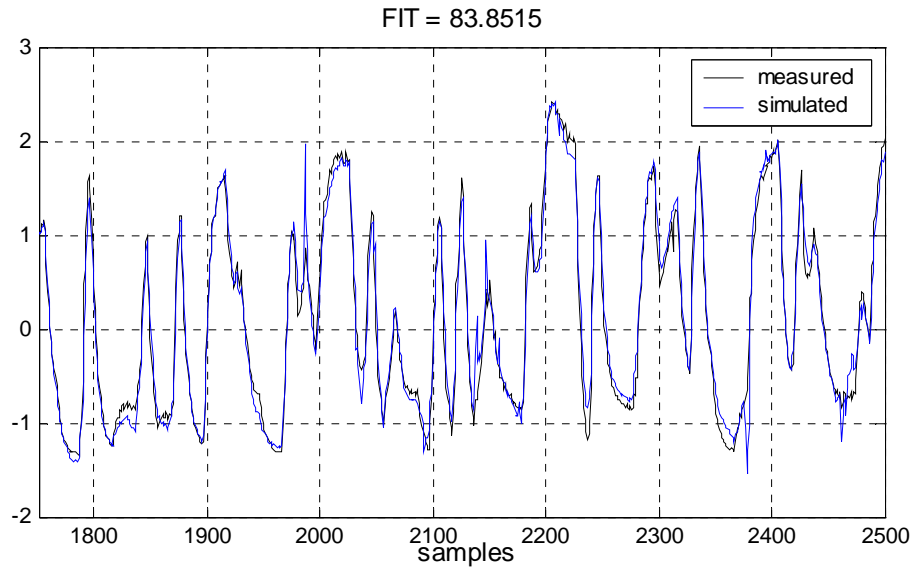


Slika 17. Rezultati: pss4_OE - y_2

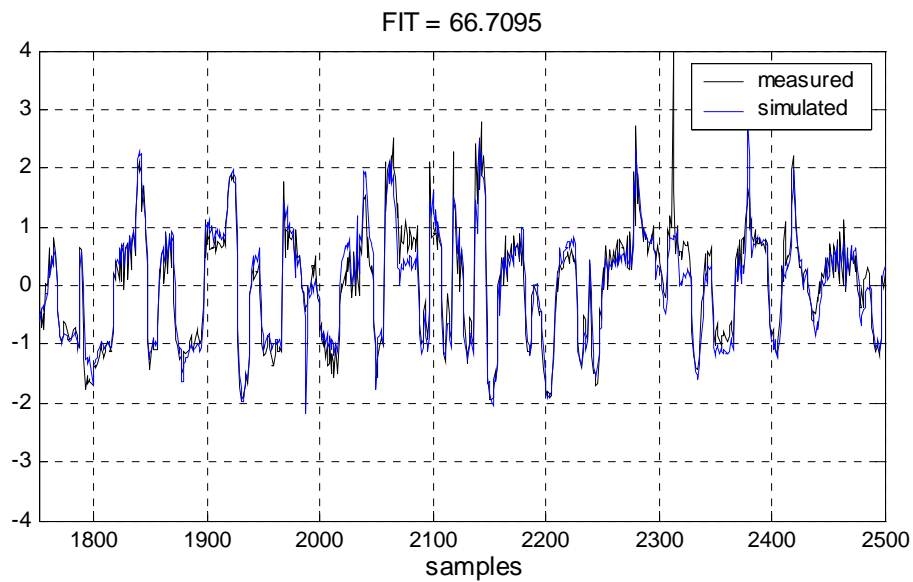
Ovdje je također analiziran slučaj bez kašnjenja ulaza i došlo se do istog zaključka, kao i u prethodnom slučaju, da povećanje reda sistema ne utječe bitno na kvalitet fitovanja.

4.4 Metoda n4sid (N4weight opcija postavljena na CVA - canonical variable algorithm)

Za postavke "order selection", "estimate \mathbf{K} " i matricu kašnjenja ulaza $[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, dobijeni su rezultati prikazani na slikama 18. i 19.

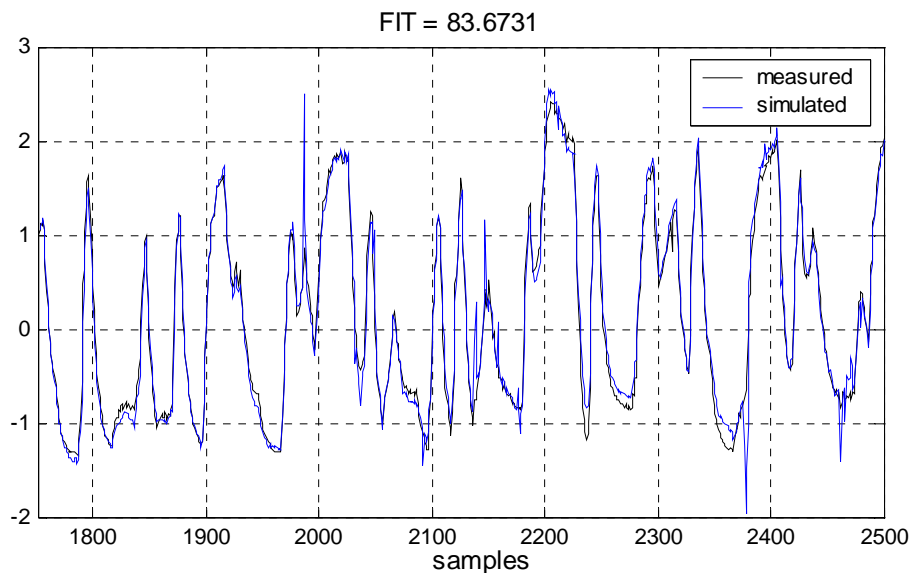


Slika 18. Rezultati: n4s6_cva - y_1

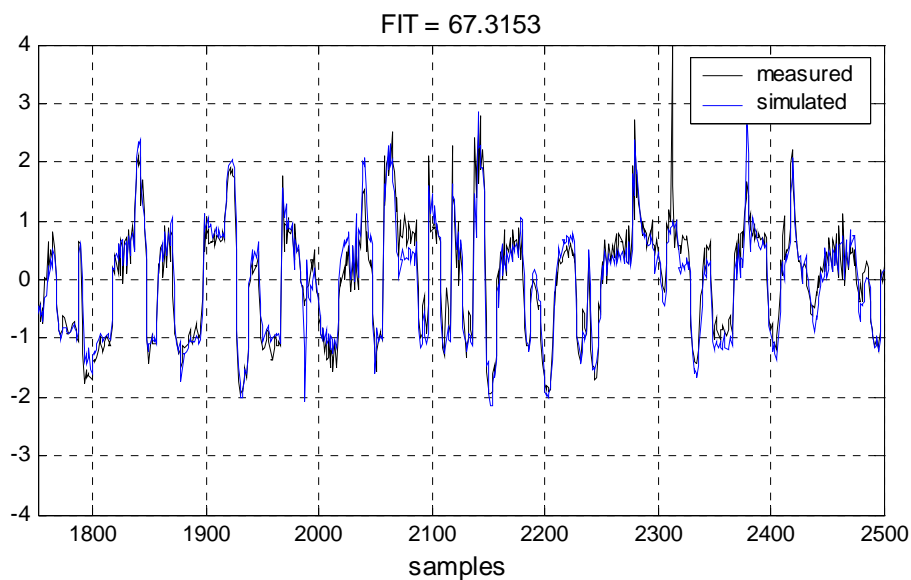


Slika 19. Rezultati: n4s6_cva - y_2

Za postavke "order selection", " $\mathbf{K} = 0$ " i matricu kašnjenja ulaza $[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, dobijeni su rezultati prikazani na slikama 20. i 21.



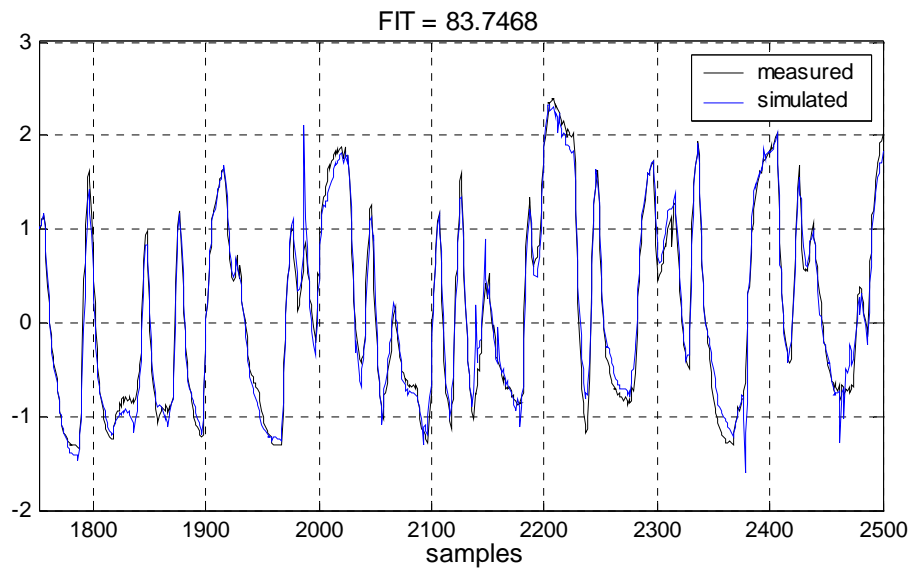
Slika 20. Rezultati: n4s6_cva_OE - y_1



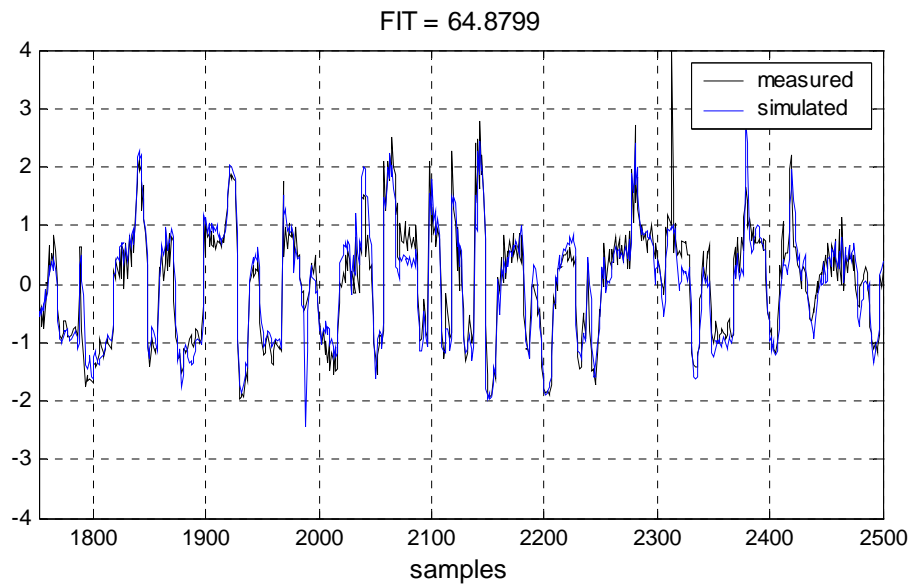
Slika 21. Rezultati: n4s6_cva_OE - y_2

4.5 Metoda *n4sid* (*N4weight* opcija postavljena na *MOESP*)

Za postavke "order selection", "estimate \mathbf{K} " i matricu kašnjenja ulaza $[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, dobijeni su rezultati prikazani na slikama 22. i 23.

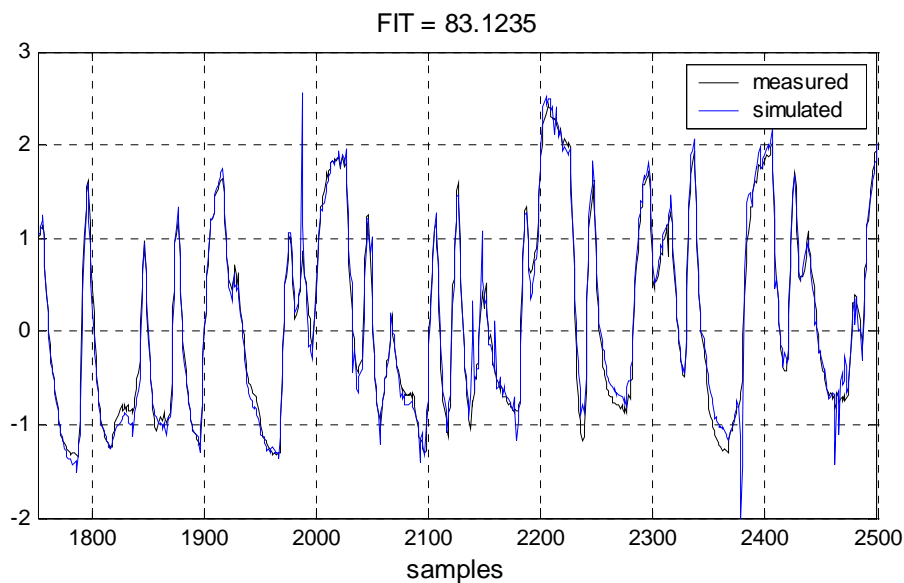


Slika 22. Rezultati: *n4s6_moesp - y₁*

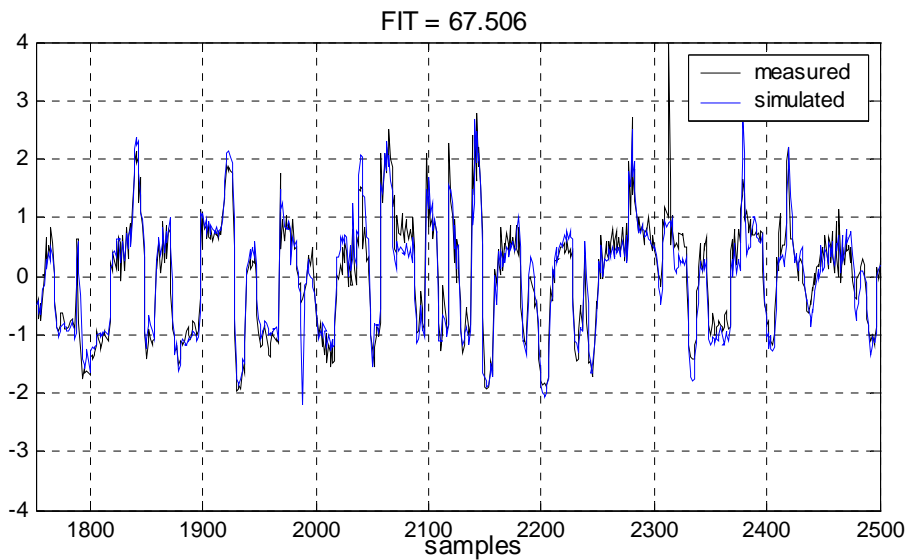


Slika 23. Rezultati: *n4s6_moesp - y₁*

Za postavke "order selection", " $\mathbf{K} = 0$ " i matricu kašnjenja ulaza $[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, dobijeni su sljedeći rezultati prikazani na slikama 24. i 25.



Slika 24. Rezultati: n4s6_moesp_OE - y_1



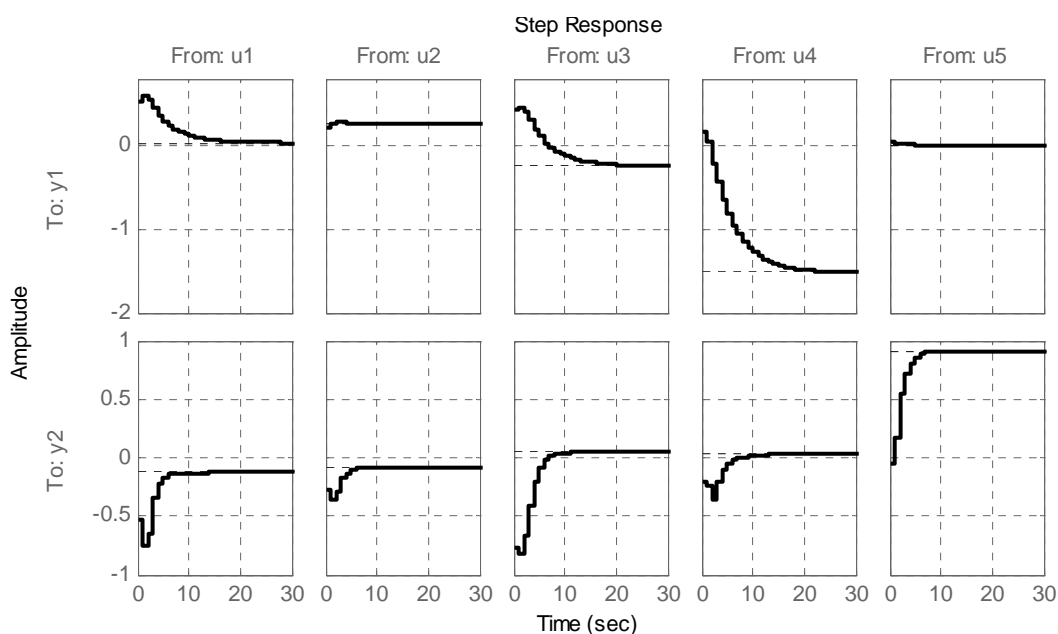
Slika 25. Rezultati: n4s6_moesp_OE - y_2

U Tabeli 1 su prikazani zbirni rezultati za testirane metode.

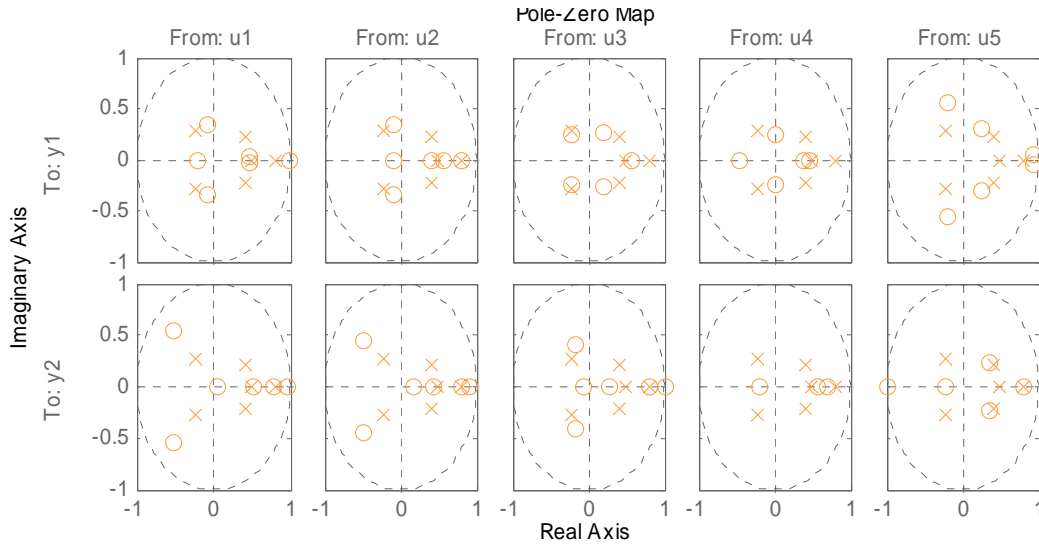
METODA	FIT - Y_1 (validacioni)	FIT - Y_2 (validacioni)	FIT - Y_1 (estimacioni)	FIT - Y_2 (estimacioni)	napomena
arx221	59.993	47.6127	59.1195	49.3525	
arx440	83.387	64.4392	82.931	64.8759	
pss4	60.6165	48.2745	60.0585	50.8952	[1 1 1 1 1]
pss4	82.9895	66.0111	83.1022	64.8907	[0 0 0 0 0]
pss4_OE	80.8099	67.3213	84.9987	60.5097	[0 0 0 0 0]
n4s6_cva	83.8515	66.7095	84.0991	66.1037	[0 0 0 0 0]
n4s6_cva_OE	83.6731	67.3153	85.5470	66.5231	[0 0 0 0 0]
n4s6_moesp	83.7468	64.8799	83.8766	65.3016	[0 0 0 0 0]
n4s6_moesp_OE	83.1235	67.5060	85.2362	66.6434	[0 0 0 0 0]

Tabela 1. Zbirni rezultati testiranih identifikacionih metoda

Evidentno je da su vrlo male razlike između testiranih metoda (barem kod onih koje se u prvih mah ne odbacuju, poput arx221 i pss4[11111]) s obzirom na pokazatelje performanse algoritma. Nema metode koja ima najbolja sva 4 fit pokazatelja. Ukoliko se, kao kriterij za izbor metode, uzme suma sva četiri fit faktora, optimalan izbor je model n4s6_cva_OE, odnosno model u prostoru stanja, šestog reda, sa matricom $\mathbf{K} = 0$. Na slijedećim slikama su date neke karakteristike ovog modela.



Slika 26. Step odzivi odgovarajućih kanala izabranog modela



Slika 27. Konfiguracija polova i nula za pojedine kanale

Inače, matrice koje determinišu sistem, u skladu sa notacijom iz jednačine (5) su:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0.8531 & -0.0213 & 0.0943 & 0.0517 & -0.0089 & 0.0245 \\ -0.0753 & 0.6288 & -0.1405 & 0.2189 & 0.0301 & 0.0910 \\ -0.2486 & 0.0064 & 0.2929 & -0.2027 & 0.2270 & -0.0425 \\ -0.0256 & -0.2349 & -0.2637 & -0.0438 & -0.4965 & 0.2431 \\ -0.0229 & 0.0510 & -0.1112 & 0.1518 & 0.4383 & 0.2425 \\ -0.0010 & 0.0496 & 0.0582 & -0.3445 & -0.2759 & -0.4769 \end{bmatrix}$$

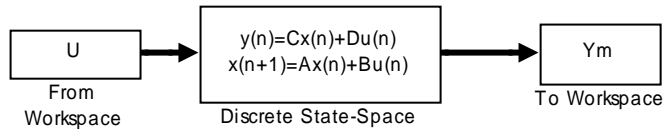
$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0.0011 & 0.0013 & 0.0012 & -0.0060 & 0.0018 \\ -0.0058 & -0.0009 & 0.0008 & -0.0078 & 0.0148 \\ -0.0353 & -0.0080 & -0.0326 & -0.0397 & -0.0006 \\ 0.0168 & 0.0124 & 0.0162 & -0.0229 & 0.0266 \\ 0.0012 & -0.0008 & -0.0113 & -0.0015 & 0.0036 \\ 0.0363 & 0.0115 & 0.0023 & 0.0259 & -0.0219 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 27.5254 & -4.1201 & -0.2778 & -0.1045 & 0.1987 & -0.1103 \\ -3.0052 & 24.7301 & -0.5871 & -5.3978 & -1.1545 & -0.3444 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0.5271 & 0.2190 & 0.4207 & 0.1636 & 0.0448 \\ -0.5278 & -0.2674 & -0.7724 & -0.2046 & -0.0562 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

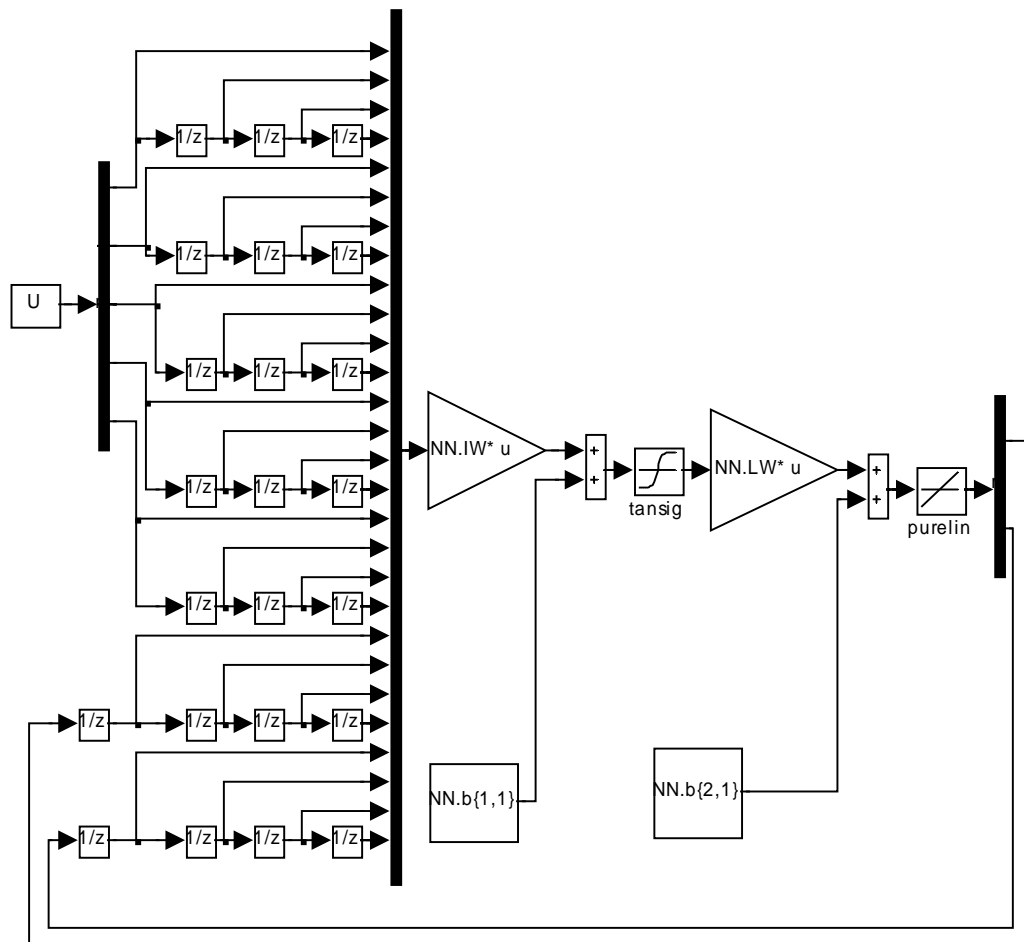
Jednostavan Simulink model ovakvog sistema je dat na slijedećoj slici.



Slika 28. Simulink model sistema u prostoru stanja

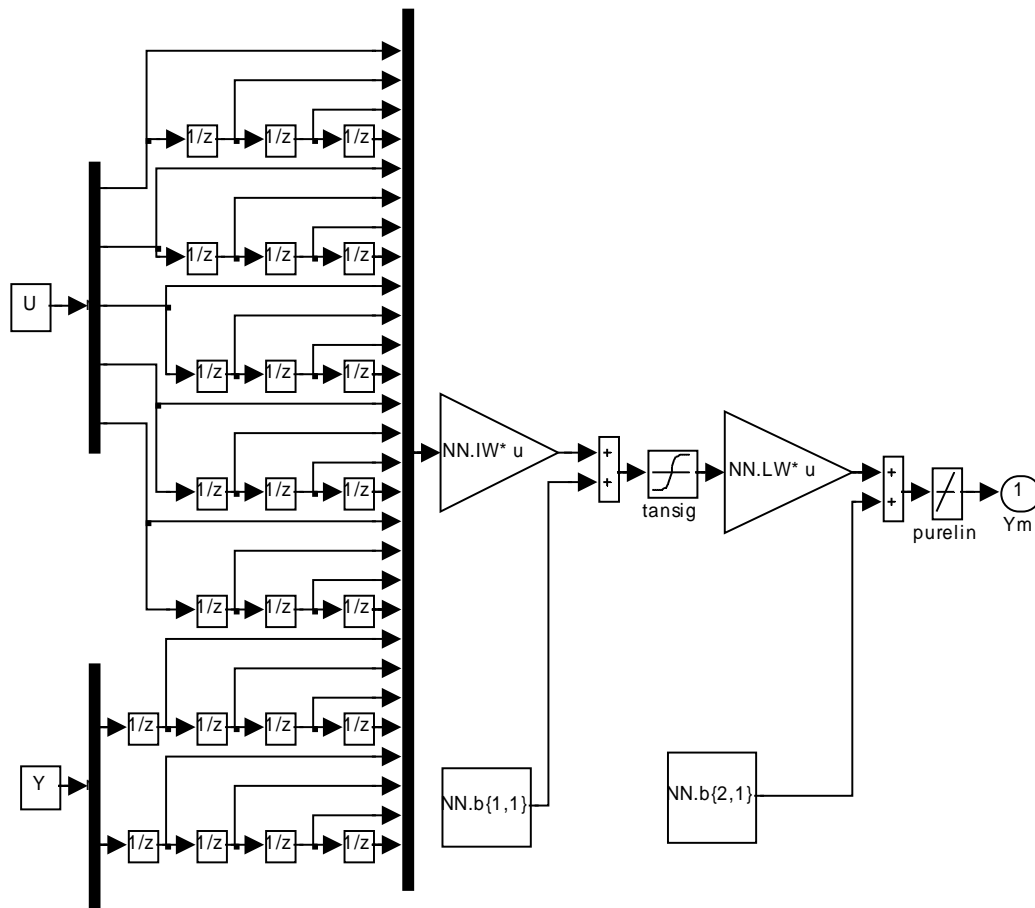
5 Identifikacija procesa uz pomoć vještačke neuronske mreže

Za potrebe identifikacije koristiće se dinamička neuronska mreža, koja je u principu, nelinearna varijanta arx440 modela. Struktura korištene mreže (Simulink predstava) prikazana je na Slici 29.



Slika 29. Struktura dinamičke neuronske mreže, korištene za identifikaciju

Sa slike se vidi da je mreža rekurentna, te je dinamika postignuta uvođenjem kašnjenja sa strane ulaza, kao i zakašnjelih izlaza koji se povratnom spregom vraćaju na ulaz mreže. Ovakva struktura se često koristi za on-line identifikaciju, kada je “zakačena” paralelno na proces. Međutim, na raspolaganju su samo izmjereni ulazno-izlazni podaci, koji se mogu koristiti za off-line identifikaciju. Problem je prilagoditi strukturu mreže za treniranje standardnim metodama (backpropagation) za feed-forward mreže. To je učinjeno na slijedeći način. Umjesto izlaza mreže i njihovih zakašnjelih vrijednosti, na ulaz mreže su dovedeni uzorci stvarnog izlaza procesa, kao i odgovarajuće zakašnjele vrijednosti (Slika 30).



Slika 30. Feed-forward struktura mreže, korištena za samo treniranje

Nakon treniranja mreže, i dobijanja sub-optimalnih vrijednosti za matrice težina i pomaka, te iste težine su korištene u dinamičkoj strukturi (Slika 29), koja se lako izmodelira u Simulink-u. Očito je da postoji neizvjesnost u smislu performansi ovako dobijenog modela, jer sada na neke ulaze mreže ne dolaze izlazi (i zakašnjele vrijednosti) procesa, nego izlazi same mreže. Međutim, i nakon ovakve aproksimacije, mreža daje jako dobre rezultate. Napomenimo još da je se trening skup sastojao od prvih 70% ulazno-izlaznih podataka, a da se posljednjih 30% koristilo za validaciju modela. Kvalitet fitovanja je računat po formuli:

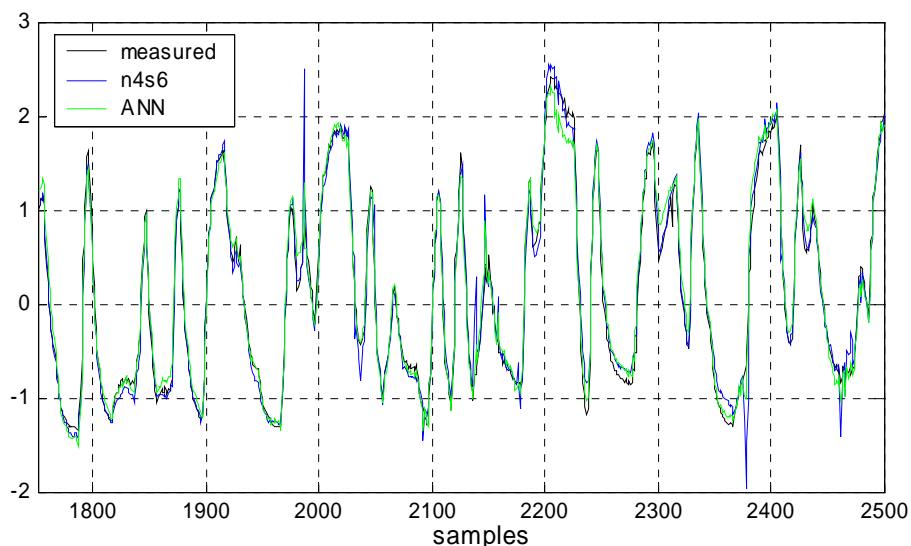
$$FIT_i = \left(1 - \frac{\sqrt{(y_i - \hat{y}_i)^T (\hat{y}_i - y_i)}}{\sqrt{(y_i - \bar{y}_i)^T (y_i - \bar{y}_i)}} \right) \cdot 100\% \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

Varijable (vektori) koji učestvuju u računanju kvaliteta fitovanja se iz Simulinka učitavaju u workspace. Ovo je urađeno i za Simulink modele i vještačke neuronske mreže i n4s6 strukturu. Dobijeni su slijedeći rezultati (Tabela 2).

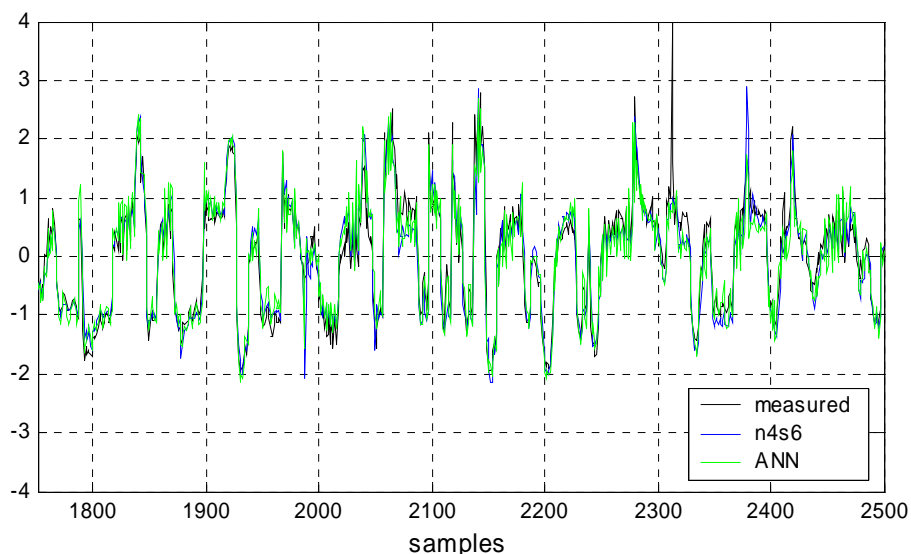
METODA	FIT - Y_1 (validacioni)	FIT - Y_2 (validacioni)	KVADRATNO ODSTUPANJE (Y_1)	KVADRATNO ODSTUPANJE (Y_2)
n4s6_cva_OE	83.6318	67.2928	20.5223	74.9434
ANN	86.6833	68.1037	13.5837	71.2730

Tabela 2. Poređenje n4s6 modela sa modelom ANN

Interesantno je da je ovakav način računanja fit-a pomoću učitavanja varijabli iz Simulink-a u workspace, dalo za nijansu drugačije rezultate za model n4s6 od onih koje je dao SIT toolbox (vidjeti Tabelu 1). Prikaz odziva oba modela, u odnosu na izmjerene podatke je dat na slikama 31. i 32.



Slika 31. Poređenje n4s6 modela sa modelom ANN – y_1



Slika 32. Poređenje n4s6 modela sa modelom ANN – y_2

6 Zaključak

U okviru rada je primijenjeno nekoliko standardnih metoda i tehnika identifikacije koje nudi MATLAB-ov SIT toolbox, za sisteme se više ulaza i izlaza. Modeli su linearni, dinamički, stacionarni sa koncentrisanim parametrima. Najbolje performanse je pokazao model šestog reda u prostoru stanja, dobijen n4sid metodom. Dobijeni model je ujedno i model sa izlaznom greškom.

S ciljem kompenzacije eventualnih nelinearnosti u samom procesu, testirane su mogućnosti vještačke dinamičke neuronske mreže. Za potrebe treniranja date mreže, u standardnom feed-forward obliku, napravljeno je adekvatno restrukturiranje, kako mreže, tako i trenirajućih podataka. Rezultati dobijeni nakon treniranja, sa stanovišta performanse modela, opravdali su upotrebu mreže. Model mreže, kao i najbolji od linearnih modela, realizirani su u okviru Simulink okruženja.

7 Literatura

- [1]. Božidar Matić: "Projektovanje sistema automatske regulacije i upravljanja tehnoloških procesa", SVJETLOST, Sarajevo, 1989.
- [2]. Lennart Ljung: "System Identification Toolbox – For Use With MATLAB"
- [3]. Jerzy Moscinski, Zbigniew Ogonowski: "Advanced control with MATLAB&Simulink", Prentice Hall Europe, 1995.
- [4]. Adnan Salihbegović: "Predavanja u okviru predmeta 'Metode i tehnike identifikacije'", Odsjek za AiE, Elektrotehnički fakultet u Sarajevu, Postdiplomski studij, generacija 2005/2006.
- [5]. Adnan Salihbegović: "Modeliranje dinamičkih sistema", SVJETLOST, Sarajevo, 1985.