

# Identifikacija lineariziranega modela sinhronskega generatorja

Jožef RITONJA, Martin PETRUN, Danilo KLASINC

**Izvleček:** Članek predstavlja uporabo rekurzivne identifikacijske metode najmanjših kvadratov z eksponentnim pozabljanjem za identifikacijo parametrov poenostavljenega lineariziranega vhodno-izhodnega modela sinhronskega generatorja, ki obratuje v sinhronizmu z močnim elektroenergetskim sistemom. Uporaba identifikacijske metode nadomesti potrebo po poznavanju ali meritvah konstrukcijskih podatkov sinhronskega generatorja in povezovalnega voda. V članku je prikazana podrobna analiza vpliva parametrov identifikacijske metode na hitrost in natančnost identifikacije. Na osnovi analize so postavljene smernice za izbiro parametrov identifikacijske metode. Uporabnost dobljenih rezultatov je potrjena s primerjavo časovnih odzivov nelinearnega dq-modela in identificiranega lineariziranega vhodno-izhodnega modela sinhronskega generatorja z napetostnim regulacijskim sistemom, ki obratuje sinhrono z močnim elektroenergetskim sistemom.

**Ključne besede:** sinhronski generator, identifikacija, rekurzivna identifikacijska metoda najmanjših kvadratov

## 1 Uvod

Za gospodarno in zanesljivo delovanje sinhronskih generatorjev v elektroenergetskem sistemu je potrebno uporabiti ustrezne regulacijske sisteme [1]. Za načrtovanje in sintezo teh regulacijskih sistemov je potrebno poznavanje ustreznih matematičnih modelov sinhronskih generatorjev. Razvoj, klasifikacija in izpeljava najpogosteje uporabljenih dinamičnih matematičnih modelov sinhronskih generatorjev, priključenih na omrežje sinusne napetosti konstantne amplitude in frekvence, so podrobneje predstavljene v članku [2].

V [2] je prikazano, da so znani matematični modeli v primeru poznanih podatkov primerni za analizo, simulacije, načrtovanje in sintezo regulacijskih sistemov sinhronskih generatorjev. V praksi pa je njihova uporabnost velikokrat omeje-

na zaradi nepoznavanja številnih konstrukcijskih in funkcionalnih podatkov sinhronskih generatorjev in regulacijskih elementov, ki so potrebni za izračun parametrov teh matematičnih modelov. V [2] je kot predlagana rešitev predstavljena kombinirana iterativna uporaba teoretičnega modeliranja in identifikacije. V ta namen je bil izpeljan matematični model sinhronskega generatorja, ki je priključen na omrežje sinusne napetosti konstantne amplitude in frekvence. Ta model smo imenovali poenostavljen lineariziran vhodno-izhodni model sistema SMIB (SMIB = single machine connected to the infinite bus). Za določitev parametrov tega modela ni nujno poznavanje konstrukcijskih in funkcionalnih podatkov sinhronskega generatorja, ampak je možna določitev parametrov s pomočjo identifikacijskih metod.

Predstavljeni model zadovoljivo opisuje strukturo sinhronskega generatorja, priključenega na neskončne zbiralke. Na osnovi poznane strukture sistema lahko izberemo identifikacijsko metodo, s pomočjo katere izračunamo parametre modela. Tako dobljen model je primeren za razvoj regulacijskih sistemov sinhronskega generatorja.

V članku je podrobno predstavljena parametrična identifikacijska metoda najmanjših kvadratov z eksponentnim pozabljanjem. Predstavljen je osnovni algoritem identifikacijske metode in izpostavljeni so parametri, ki vplivajo na kvaliteto identifikacije. Temeljito je analiziran in predstavljen vpliv identifikacijskih parametrov na hitrost in natančnost identifikacije. Za sinhronski generator z napetostnim regulacijskim sistemom so predstavljeni rezultati simulacij popolnega nelinearnega dq-modela 7. stopnje in identificiranega poenostavljenega lineariziranega vhodno-izhodnega modela 3. stopnje.

## 2 Poenostavljen lineariziran vhodno-izhodni model sistema SMIB

Za uspešno uporabo parametričnih identifikacijskih metod je potrebno čim bolj natančno poznavanje zgradbe vhodno-izhodnega modela identificiranega sistema. V [2] izpeljan poenostavljen lineariziran vhodno-izhodni model sistema SMIB z napetostnim regulacijskim sistemom je predstavljen s šestimi prenosnimi funkcijami, ki opisujejo

Izr. prof. dr. Jožef Ritonja, univ. dipl. inž., dr. Martin Petrun, univ. dipl. inž., oba Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko; Danilo Klasinc, univ. dipl. inž., Dravske elektrarne Maribor

povezavo med dvema vhodoma in tremi izhodi. Vhoda modela sta odstopanje mehanskega navora pogonske turbine  $T_{m\Delta}(t)$  in odstopanje referenčne vrednosti statorske napetosti  $V_{t,ref\Delta}(t)$ , izhodi modela pa so odstopanje statorske napetosti  $V_{t\Delta}(t)$ , odstopanje električnega navora  $T_{e\Delta}(t)$  in odstopanje rotorske kotne hitrosti  $\omega_{\Delta}(t)$ . Podroben opis odvisnosti parametrov modela od podatkov sinhronskega generatorja in napetostnega regulacijskega sistema je podan v [2].

Takšna struktura matematičnega modela omogoča neposredno uporabo parametričnih identifikacijskih metod za določitev njegovih parametrov. Uporaba identifikacijskih metod ne zahteva odklopa sinhronskega generatorja od omrežja in je možna med njegovim koristnim delovanjem. Na ta način je možna enostavna, hitra in poceni določitev poenostavljenega modela sistema SMIB.

### ■ 3 Uporaba identifikacijskih metod za določitev parametrov matematičnih modelov

V nasprotju s teoretičnim modeliranjem, ki temelji na podlagi fizikalnih zakonitosti, temelji eksperimentalno modeliranje ali identifikacija na sintezi matematičnih modelov s pomočjo meritev. Pri tem so zelo dobrodošla tudi predhodna znanja o procesu, ki jih lahko pridobimo tako s teoretično analizo kot tudi z eksperimenti in izkušnjami. Ta znanja nam omogočijo ter olajšajo načrtovanje in izvedbo identifikacijskega procesa.

Na podlagi meritev vhodne  $u(t)$  in izhodne veličine  $y(t)$  procesa lahko s pomočjo identifikacijskega postopka določimo parametre matematičnega modela. Za vzbujanje procesa, ki ga želimo identificirati, lahko v določenih primerih uporabimo naravne vzbujalne signale (signale, ki sami po sebi nastopajo v procesu), v večini primerov pa so potrebni ustrezni umetni preizkusni signali, ki zadostno vzbudijo proces

za potrebe identifikacije. Rezultat identifikacije je vhodno-izhodni matematični model [3], [4].

Parametri v eksperimentalnem modelu so le številčne vrednosti, katerih funkcijska povezava s fizikalnimi podatki o procesu ostane neznana. Prav tako lahko z meritvijo vhodnih in izhodnih signalov dobimo samo vhodno-izhodne modele, ne pa tudi modelov, ki opisujejo notranjo zgradbo procesov. Kljub temu pa imajo dobljeni vhodno-izhodni modeli visoko uporabnost in kar nekaj prednosti. Z njimi lahko običajno točneje opišemo trenutno dinamično obnašanje procesa, model procesa pa dobimo enostavneje in z manjšimi stroški. Potrebno je tudi bistveno manj znanj (podatkov) o procesu, ki ga modeliramo. Identificirani model sicer velja le za raziskovalni proces in določeno stanje obratovanja, zato pa lahko to stanje opišemo relativno točno. Ker je postopek identifikacije nezahteven in hiter, lahko matematični model prilagajamo z različnimi stanji obratovanja in delovnimi točkami, kar je velika prednost pri kompleksnih in nelinearnih procesih, kot je na primer obravnavo sistema SMIB.

Najprimernejši matematični model za modeliranje obravnavanega sistema je **parametrični, časovno diskretni model, ki omogoča sprotno (on-line) ocenjevanje parametrov modela**. Takšen model lahko zapišemo v obliki diskretne prenosne funkcije  $G_p(z^{-1})$  (1), kjer sta red modela  $m$  in mrtvi čas  $d$  predhodno izbrana.

$$G_p(z^{-1}) = \frac{y_u(z)}{u(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_m z^{-m}} z^{-d} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_m z^{-m}} z^{-d} = \quad (1)$$

V enačbi lahko predpostavimo, da je  $b_0 = 0$ , saj so sistemi z možnostjo skočne spremembe v praksi izjemno redki, če ne nemogoči, zagotovo pa to ne velja za sisteme SMIB.

Slabost izbire parametričnega modela je, da moramo poznati struk-

turo in red modela, ki ga želimo identificirati. V primeru obravnave sistema SMIB lahko strukturo in red modela določimo na podlagi teoretičnih modelov, ki so predstavljeni v [2]. V praksi se lahko potrebni red modela za identifikacijo sistema SMIB tudi spremeni, za ugotavljanje ustreznega reda pa obstajajo določeni praktični postopki, ki so podrobneje opisani v [3].

Kot najboljša parametrična identifikacijska metoda za ocenjevanje parametrov modela SMIB sistema se je izkazala **rekurzivna metoda najmanjših kvadratov z eksponencialnim pozabljanjem (RLSFF)**. Izbiro te metode upravičujejo naslednje prednosti:

- je zelo enostavna in računsko nezahtevna in omogoča sprotno ocenjevanje parametrov modela,
- je robustna in zelo dobro konvergira,
- je dolgo poznana in temeljito preizkušena v mnogih različnih aplikacijah,
- potrebuje krajši čas za uspešno identifikacijo parametrov kot druge metode,
- ima dobre numerične lastnosti,
- omogoča identifikacijo parametrov v zaprti zanki ipd.

### ■ 4 Rekurzivna identifikacijska metoda najmanjših kvadratov z eksponencialnim pozabljanjem

Za potrebe regulacijskih sistemov potrebujemo sprotno ocenjevanje parametrov matematičnega modela, saj potrebujemo ocene parametrov že med meritvijo. Z uporabo metode RLSFF lahko parametre na novo ocenimo po vsakem koraku meritev, pri tem pa ni potrebno shranjevanje podatkov prejšnjih meritev, kot je to potrebno pri nerekurzivnih metodah. Metodo RLSFF lahko zapišemo z enačbami (2) do (4), podrobnejša izpeljava metode je prikazana v [3].

$$\theta(k+1) = \theta(k) + \gamma(k) [y(k+1) - \psi^T(k+1)\theta(k)] \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\gamma}(k) = \mathbf{P}(k+1)\boldsymbol{\psi}(k+1) = \frac{\mathbf{P}(k)\boldsymbol{\psi}^T(k+1)}{\boldsymbol{\psi}^T(k+1)\mathbf{P}(k)\boldsymbol{\psi}(k+1) + \lambda} \quad (3)$$

$$\mathbf{P}(k+1) = \frac{1}{\lambda} [\mathbf{I} - \boldsymbol{\gamma}(k)\boldsymbol{\psi}^T(k+1)] \mathbf{P}(k) \quad (4)$$

V enačbah (2) do (4) predstavljata  $\boldsymbol{\psi}^T$  podatkovni vektor (5) in  $\boldsymbol{\theta}$  vektor ocenjenih parametrov (6), ki sta odvisna od predpostavljene strukture in reda modela  $m$ .

$$\boldsymbol{\psi}^T(k) = [-y(k-1), \dots, -y(k-m) | u(k-d-1), \dots, u(k-d-m)] \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\theta}(k) = [a_1, \dots, a_m | b_1, \dots, b_m] \quad (6)$$

Parameter  $\lambda$  predstavlja faktor pozabljanja [3]. Za faktor pozabljanja mora veljati  $1 \geq \lambda > 0$ . Izbira vrednosti je kompromis med boljším sledenjem spremembam procesa, vendar večjo občutljivostjo na motnje ( $\lambda \rightarrow 0$ ) ali počasnejšim sledenjem ter manjšim vplivom motenj ( $\lambda \rightarrow 1$ ). Pri večjih vrednostih dosežemo tudi boljšo konvergenco. V praksi se uporabljajo vrednosti med  $1 \geq \lambda > 0.9$  [3]. Faktor pozabljanja  $\lambda$  je lahko konstanten, lahko pa metodo priredimo tudi tako, da se faktor pozabljanja  $\lambda$  med procesom identifikacije spreminja.

Pri ocenjevanju parametrov najprej izračunamo korekturni vektor  $\boldsymbol{\gamma}(k)$ , podan z enačbo (3), nato nove ocene parametrov  $\boldsymbol{\theta}(k+1)$  z uporabo enačbe (2). Izračunu ocen parametrov  $\boldsymbol{\theta}(k+1)$  nato sledi izračun kovariančne matrike za naslednji korak  $\mathbf{P}(k+1)$  po enačbi (4). V naslednjih korakih se zaporedje izračunov ponavlja. Vrednosti korekturnega vektorja  $\boldsymbol{\gamma}$  in ocenjenih parametrov  $\boldsymbol{\theta}$  na ta način dobimo takoj po zajemu novega para podatkov izmerjenih vhodne in izhodne spremenljivke procesa  $u(k)$  in  $y(k)$ . Tako imamo nove ocene parametrov na razpolago takoj po vsakem zajemu novega para meritev.

V začetku rekurzivnih algoritmov moramo poznati še začetni vredno-

sti  $\boldsymbol{\theta}(0)$  in  $\mathbf{P}(0)$ . Začetni vrednosti lahko določimo na več načinov, kot sta na primer start identifikacijskega algoritma z nerekurzivno metodo ali uporaba ocen iz predhodnih znanj [3], [4]. Vendar je v splošnem enostavneje in primerneje, če na podlagi poznavanja teoretičnega ozadja identifikacije enostavno izberemo ustrezne začetne vrednosti [3]. Matriko začetnih vrednosti lahko podamo z izrazom (7):

$$\mathbf{P}(0) = \alpha \mathbf{I} \quad (7)$$

kjer je  $\mathbf{I}$  enotska matrika,  $\alpha$  pa izbrana začetna vrednost kovariančne matrike. Iz analize, pobleže predstavljene v [3], je razvidno, da je izbira  $\alpha$  obratno sorazmerno odvisna od kvadrata sprememb signalov  $u(t)$  in  $y(t)$ , ki jih uporabimo za potrebe identifikacije. To pomeni, da lahko ob velikih spremembah signalov uporabimo manjše začetne vrednosti  $\alpha$ , če pa merimo majhne spremembe signalov, moramo uporabiti velike vrednosti  $\alpha$ .

Pri izbiri začetnih vrednosti je kritična izbira začetnih vrednosti kovariančne matrike  $\mathbf{P}(0)$ , medtem ko so začetne vrednosti ocenjenih parametrov  $\boldsymbol{\theta}(0)$  bistveno manj pomembne in jih lahko zaradi enostavnosti postavimo na  $\boldsymbol{\theta}(0) = \mathbf{0}$ . Začetna vrednost kovariančne matrike namreč določa vrednost ojačanja  $\boldsymbol{\gamma}$ . Če bodo začetne vrednosti matrike velike, bo to pomenilo visoko začetno ojačanje  $\boldsymbol{\gamma}$ , kar bo povzročilo hitre spremembe vrednosti ocenjenih parametrov  $\boldsymbol{\theta}$  v naslednjem koraku. Če pa bodo začetne vrednosti  $\mathbf{P}(0)$  majhne, se bodo ocenjene vrednosti  $\boldsymbol{\theta}$  le malo spremenile.

Z drugimi besedami lahko zapišemo, da začetne vrednosti  $\mathbf{P}(0)$  določajo, koliko zaupamo začetnim vrednostim  $\boldsymbol{\theta}(0)$ . Če imamo točne začetne vrednosti  $\boldsymbol{\theta}(0)$ , lahko  $\mathbf{P}(0)$  vsebuje majhne vrednosti  $\alpha$ . V tem primeru ne potrebujemo velike spremembe ocen parametrov  $\boldsymbol{\theta}$  v naslednjih korakih, saj smo že blizu pravih vrednosti. Če pa imamo neznane vrednosti  $\boldsymbol{\theta}(0)$ , ki so potencialno daleč od pravih vredno-

sti, pa je smiselno izbrati ustrezno visoke začetne vrednosti  $\alpha$  kovariančne matrike  $\mathbf{P}(0)$ . Na ta način se bomo hitreje približali pravih vrednostim ocenjenih parametrov. Kot vidimo, imamo z izbiro začetnih vrednosti  $\mathbf{P}(0)$  neposreden vpliv na hitrost spreminjanja parametrov. S tem lahko dosežemo tudi ustrezno konvergenco parametrov. Vendar moramo biti pozorni, da vrednosti niso previsoke, saj lahko to povzroči prevelik skok v izbiri ocenjenih parametrov v naslednjem koraku. V [3] je na primer izpostavljeno, da je v splošnem dobra začetna izbira  $\alpha$  med 100 in 10000, vendar je za določitev optimalne začetne vrednosti pogosto potrebna eksperimentalna analiza.

## ■ 5 Analiza vpliva parametrov identifikacijske metode na kvaliteto identifikacije

V tem poglavju so sistematično prikazani vplivi posameznih parametrov, ki neposredno vplivajo na delovanje identifikacijskega algoritma. Na podlagi analize v tem poglavju so načrtane smernice in pripravljeni napotki za izvedbo identifikacije na realnem sistemu SMIB. Pri analizi vpliva parametrov identifikacijske metode na kvaliteto identifikacije so izbrana naslednja izhodišča:

- čas vzorčenja  $T_s = 0,005$  s,
- dolžina simulacije  $T_{sim} = 10$  s,
- red matematičnega modela  $m = 4$ ,
- zakasnitev izhoda  $d = 0$ ,
- začetni pogoji identifikacije  $\alpha = 10^{10}$ ,  $\boldsymbol{\theta}(0) = \mathbf{0}$ ,
- faktor pozabljanja  $\lambda = 0,99$
- identifikacija prenosne funkcije med referenčno napetostjo regulatorja  $u(t) = V_{t,ref\Delta}(t)$  in izhodno močjo  $y(t) = T_{e\Delta}(t)$ ,
- delovna točka SG  $P = 1$ ,  $\cos\varphi = 0,85$ ,

- zanemarimo pojav motenj v merilnih signalih.

V nadaljevanju je prikazana sistematična analiza vpliva variacij posameznih parametrov identifikacijske metode na kvaliteto identifikacije, kjer so vrednosti ostalih parametrov nespremenjene.

### 5.1 Preizkusni vzbujaalni signali

Poenostavljen lineariziran model sistema SMIB (v nadaljevanju krajše PLM sistema SMIB) z regulacijo napetosti ima red  $m = 4$ . Za uspešno vzbujanje takšnega sistema je potreben vzbujaalni signal, ki zagotavlja stalno vzbujanje reda najmanj  $m = 4$  [3]. V nadaljevanju sta predstavljena dva umetna vzbujaalna signala, kjer znaša amplituda obeh uporabljenih signalov 5 % glede na referenčno vrednost statorske napetosti:

- prvi vzbujaalni signal je sinusne oblike  $u(t) = 0,05\sin(2\pi t)$  (slika 1a);
- drugi vzbujaalni signal je psevdonaključen binarni signal (PRBS), pridobljen s pomočjo premikalnega registra s šestimi

stopnjami (slika 2a). Takšen signal ustvari binarno vsebino dolžine  $N = 63$ , kar pomeni, da zagotovi stalno vzbujanje reda  $m = 63$ . Za takt signala je uporabljen čas  $\beta = 0,1$  s.

Na naslednjih slikah  $a_{1,2,3,4}$  in  $b_{1,2,3,4}$  označujejo parametre identificirane prenosne funkcije,  $a_{r1,2,3,4}$  pa predstavljajo parametre referenčne prenosne funkcije, ki jo identificiramo.

Iz rezultatov je razvidno, da sinusni vzbujaalni signal PLM sistema SMIB ne vzbudi dovolj, zato v tem primeru ocenjeni parametri, pridobljeni z identifikacijsko metodo, odstopajo od pravih vrednosti (slika 1d). Posledično odstopa tudi frekvenčna karakteristika diskretne prenosne funkcije identificiranega modela, ki je prikazana na sliki 3.

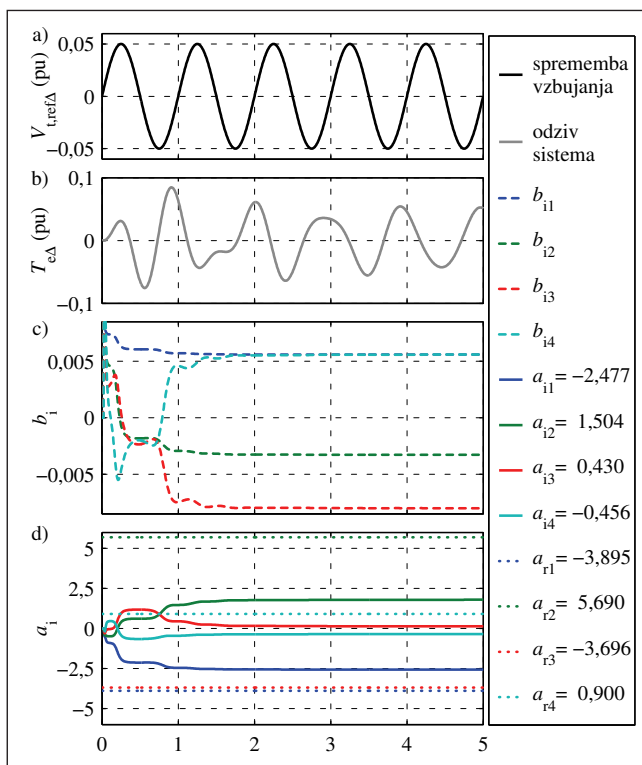
Na sliki 2a in 2b sta prikazana vzbujaalni PRB signal in posledično nihanje električne moči SG okoli delovne točke. Analiza konvergence ocenjenih parametrov pokaže, da le-ti zelo dobro in hitro konvergirajo k pravih vrednostim in jih v času 4 s tudi dosežejo (slika 2d). Posle-

dično se zelo dobro ujemata tudi frekvenčni karakteristiki identificiranega modela in obravnavanega PLM sistema SMIB (slika 3). Manjša odstopanja v fazni karakteristiki se pojavijo nad 10 Hz, kar pa je frekvenčno področje, ki ni zanimivo za delovanje večine regulacijskih sistemov sinhronskih generatorjev. Identificirani model je zato primeren za načrtovanje regulacijskih sistemov sinhronskih generatorjev.

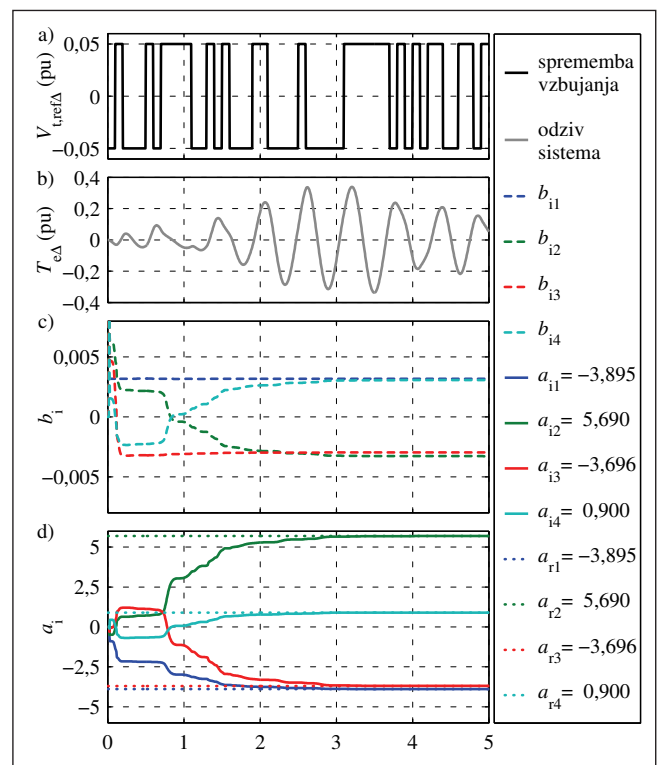
Rezultati analize so tako potrdili teoretično predpostavko, da je PRB signal najbolj primeren za vzbujanje sinhronskih generatorjev za potrebe identifikacije, zato bo takšna oblika preizkusnega signala uporabljena tudi v vseh analizah, ki sledijo v naslednjih poglavjih. Uspešna izvedba identifikacije modela je mogoča tudi pri manjših amplitudah PRB signala, npr. 1 %.

### 5.2 Čas vzorčenja

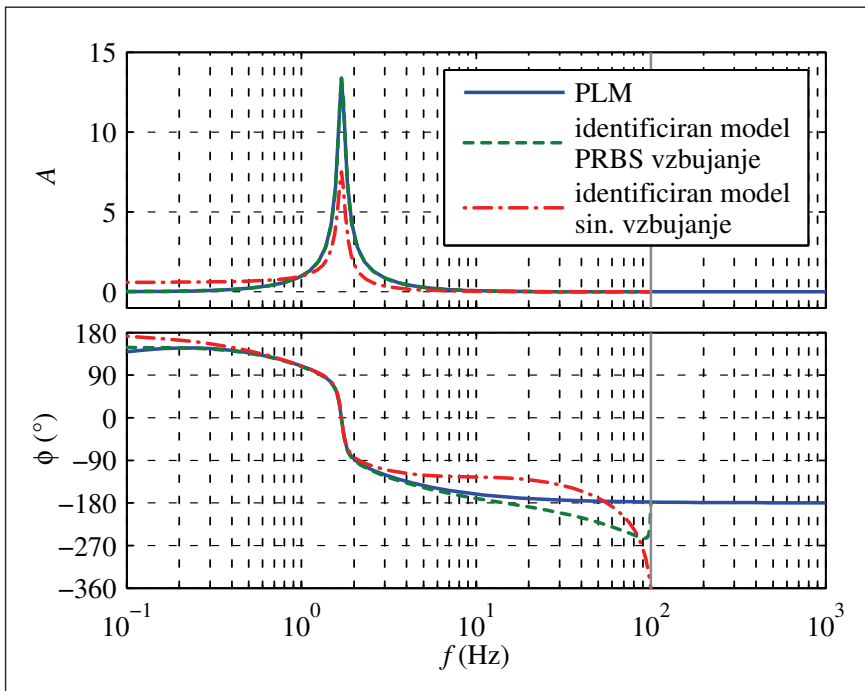
Čas vzorčenja  $T_s$  ima velik vpliv na identifikacijo modela [3]. Ker je uporabljen PRB vzbujaalni signal s taktom  $\beta = 0,1$  s, so za analizo izbra-



Slika 1. Sinusni vzbujaalni signal, posledično nihanje  $T_{e\Delta}$  okoli delovne točke ter ocenjeni parametri diskretne prenosne funkcije v odvisnosti od časa  $t$



Slika 2. PRB vzbujaalni signal, posledično nihanje  $T_{e\Delta}$  okoli delovne točke ter ocenjeni parametri diskretne prenosne funkcije v odvisnosti od časa  $t$



**Slika 3.** Primerjava frekvenčnih karakteristik PLM in identificiranih modelov

ni trije karakteristični časi vzorčenja glede na  $T_s = \beta/k$ , in sicer  $k = 1, 2$  in  $20$ . Tako dobimo  $T_s = 0,1$  s (najdaljši smiselni čas vzorčenja glede na takt PRB signala),  $T_s = 0,05$  s in  $T_s = 0,005$  s. Izbira takšnih časov je dodatno utemeljena v nadaljevanju. Na *sliki 4* so prikazani izmerjeni vhodni in izhodni signali za identifikacijo s časoma vzorčenja  $T_s = 0,1$  s (*slika 4c*) in  $T_s = 0,05$  s (*slika 4a*), ki imajo daljša časa vzorčenja kot vhodni in izhodni signal s  $T_s = 0,005$  s na *sliki 2*.

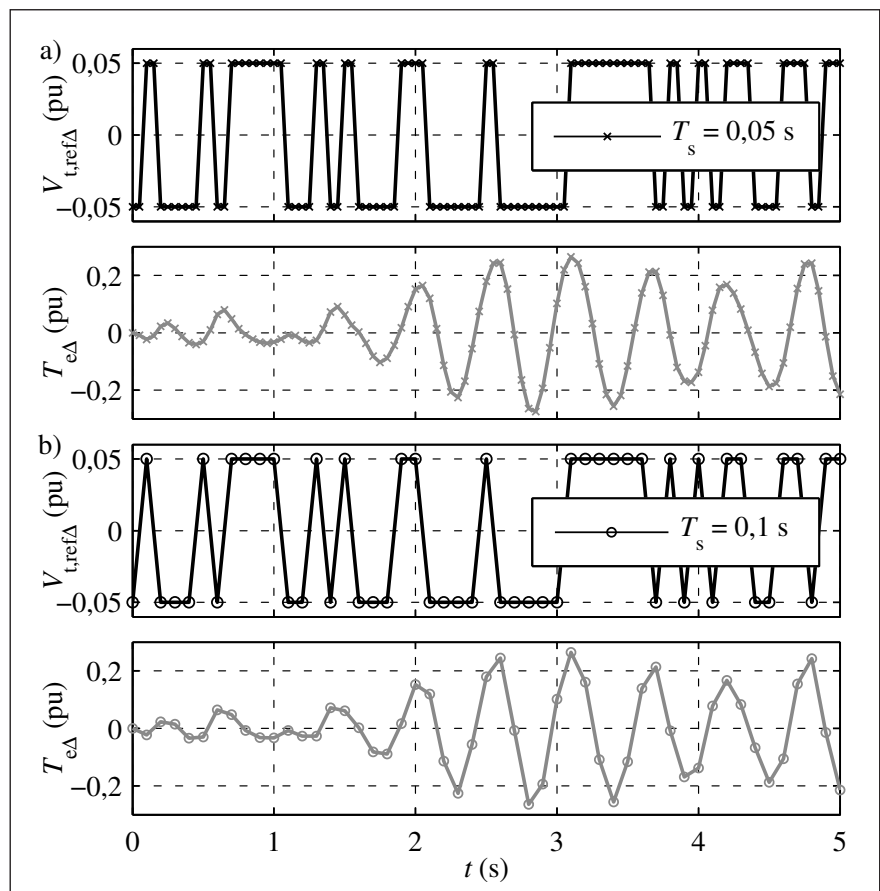
S pomočjo analize frekvenčnih karakteristik na *sliki 5* dobimo mejne vrednosti časov vzorčenja  $T_s$ . Od časa vzorčenja je namreč odvisno tudi frekvenčno območje, na katerem je identificirani model definiran. Za načrtovanje regulacijskih sistemov sinhronskih generatorjev je zanimivo frekvenčno področje do  $10$  Hz, kar pomeni, da je lahko najdaljši čas vzorčenja  $T_s = 0,05$  s. Daljši čas vzorčenja od mejnega ( $T_s = 0,1$  s) ne zagotovi ustreznega modela v diskretnem prostoru, pojavijo pa se tudi odstopanja frekvenčnih karakteristik. V primeru nadaljnjega povečevanja časa vzorčenja ( $T_s > 0,1$  s) bi prišlo do pojava prekrivanja (angl. aliasing).

Prav tako lahko določimo najmanjši ustrezeni čas vzorčenja; le-ta znaša  $T_s = 0,05$  s. Pri takšnem času vzorčenja je model v diskretnem prostoru definiran do  $100$  Hz (*slika 5*), njego-

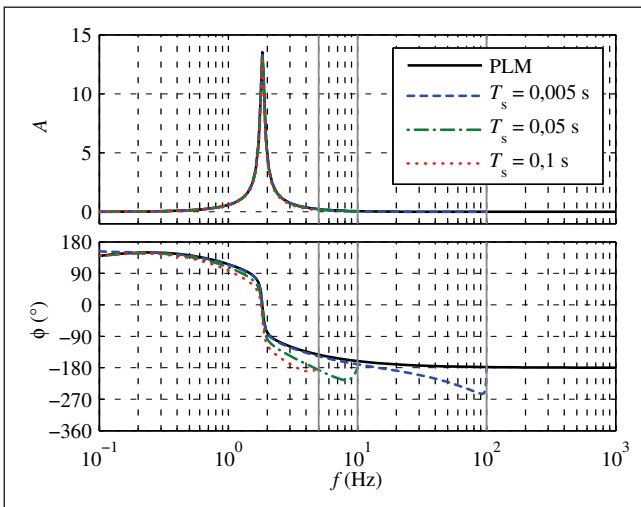
ve frekvenčne karakteristike pa se odlično ujema s karakteristikami modela v frekvenčnem področju do  $10$  Hz. Nadaljnje zmanjševanje časa vzorčenja ( $T_s < 0,005$  s) pa lahko povzroči numerične težave in pogoške pri izračunu ocen parametrov modela, saj s tem povzročimo premajhno spreminjanje vhodnih veličin identifikacijske metode med posameznimi koraki izračuna.

### 5.3 Red modela

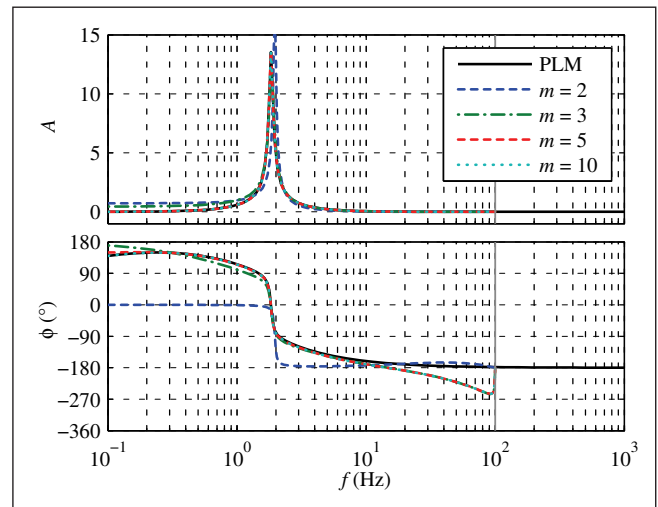
Kljub znanemu redu PML sistema SMIB ( $m = 4$ ) je smiselno opraviti tudi analizo vpliva reda identificiranega modela na kvaliteto identifikacije. Glavni razlog je ta, da se lahko v primeru identifikacije realnega sistema SMIB zaradi nemoodelirane dinamike red modela, ki je potreben za uspešno identifikacijo, spremeni. Na simulacijskem modelu so bili identificirani modeli redov  $m = 2, 3, 5$  in  $10$ . Ustrezna primerjava frekvenčnih karakteristik identificiranih modelov in referenčnega PLM je prikazana na *sliki 6*.



**Slika 4.** PRBS vzbujanje in odziv PLM: a)  $T_s = 0,05$  s in b)  $T_s = 0,1$  s



**Slika 5.** Primerjava frekvenčnih karakteristik PLM in identificiranih modelov z uporabo različnih časov vzorčenja signalov



**Slika 6.** Frekvenčne karakteristike identificiranih modelov različnih redov v primerjavi s frekvenčno karakteristiko PLM

Iz frekvenčnih karakteristik je razvidno, da nastanejo odstopanja odzivov dobljenih modelov, ki imajo premajhen red ( $m < 4$ ). Odstopanja so tem večja, čim manjši je red identificiranega modela. Najbolj odstopa frekvenčna karakteristika, kjer smo predpostavili red modela  $m = 2$ , medtem ko model reda  $m = 3$  že skoraj dobro opiše obnašanje PLM sistema SMIB v dokaj širokem frekvenčnem območju.

Če predpostavimo red modela višji od dejanskega reda (v obravnavanem primeru  $m > 4$ ), tako identificirani model dobro opiše obnašanje modela SMIB v celotnem frekvenčnem območju. Slednjo lastnost uporabimo v primerih, če moramo

red modela povečati zaradi motenj v merjenih signalih.

### 5.4 Začetni pogoji identifikacije

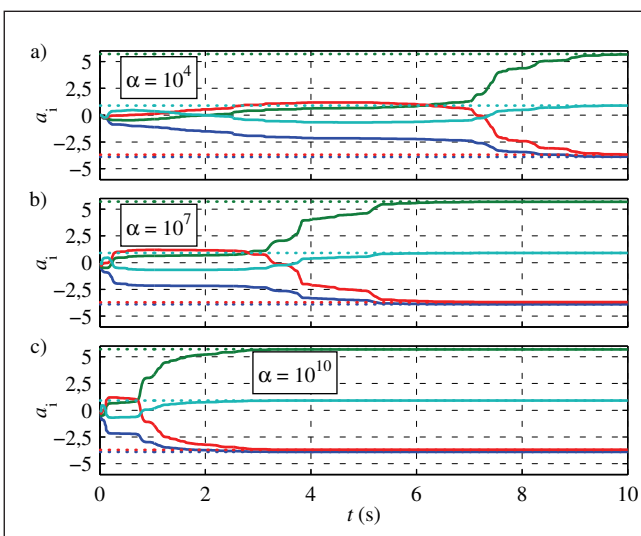
Ker postavitev začetnih vrednosti ocenjenih parametrov  $\theta(0)$  ni tako problematična (dodatno je te začetne vrednosti v realnosti težko oceniti), so predpostavljene začetne ocene parametrov  $\theta(0) = \mathbf{0}$ . V nadaljevanju je analiziran vpliv začetnih parametrov kovariančne matrike, in sicer za primere  $\alpha = 10^4, 10^7$  in  $10^{10}$  (slika 7). Ker so začetne vrednosti ocenjenih parametrov  $\theta(0) = \mathbf{0}$  precej oddaljene od pravih, je za hitro spreminjanje novih ocen in hitrejšo

konvergenco potrebna visoka vrednost začetne vrednosti  $\alpha = 10^{10}$ .

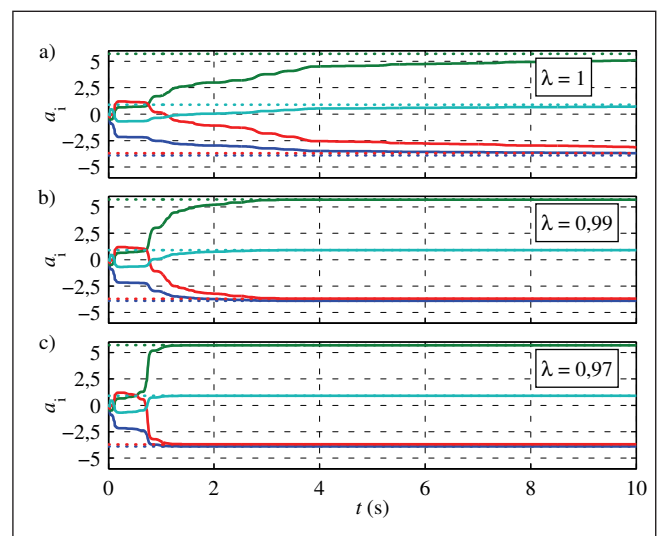
### 5.5 Faktor pozabljanja

Na sliki 8 je prikazan vpliv faktorja pozabljanja  $\lambda$  na konvergenco ocen parametrov identificiranega modela  $\theta$ .

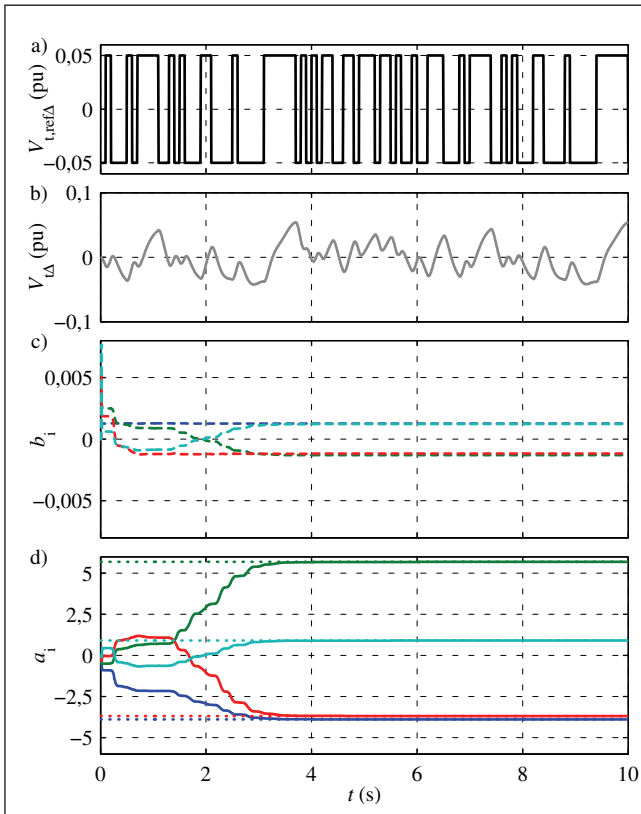
Razvidno je, da z manjšanjem faktorja  $\lambda$  ocene parametrov bistveno hitreje konvergirajo. Ob uporabi faktorja  $\lambda = 1$  (slika 8a) identifikacijski algoritem potrebuje veliko časa, da ocenjene vrednosti parametrov modela dosežejo prave vrednosti (več kot 50 s), zato je uporaba faktorja pozabljanja smiselna. Vendar pa se



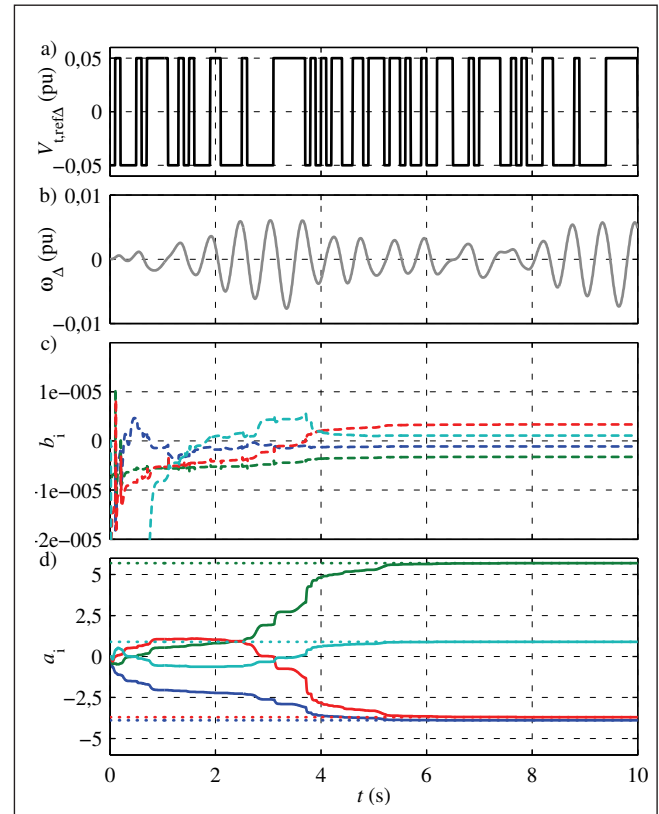
**Slika 7.** Vpliv začetnih vrednosti na konvergenco ocenjenih vrednosti parametrov modela



**Slika 8.** Konvergenca parametrov identificiranega modela za različne faktorje pozabljanja  $\lambda$



**Slika 9.** Odziv spremembe izhodne napetosti  $V_{t\Delta}(t)$  na PBRS vzbujanje in konvergenca identificiranih parametrov



**Slika 10.** Odziv spremembe kotne hitrosti  $\omega_{\Delta}(t)$  na PBRS vzbujanje in konvergenca identificiranih parametrov

moramo zavedati, da z manjšanjem faktorja  $\lambda$  zelo povečamo občutljivost izračuna na motnje, ki so v realnih primerih vedno prisotne. Zato je priporočena vrednost faktorja na začetku  $\lambda \rightarrow 1$ , dobro izhodišče pa je  $\lambda = 0,99$ . Z eksperimentalnimi preizkusi identifikacije se lahko nato določi smiseln faktor  $\lambda$  glede na motnje v merjenih signalih.

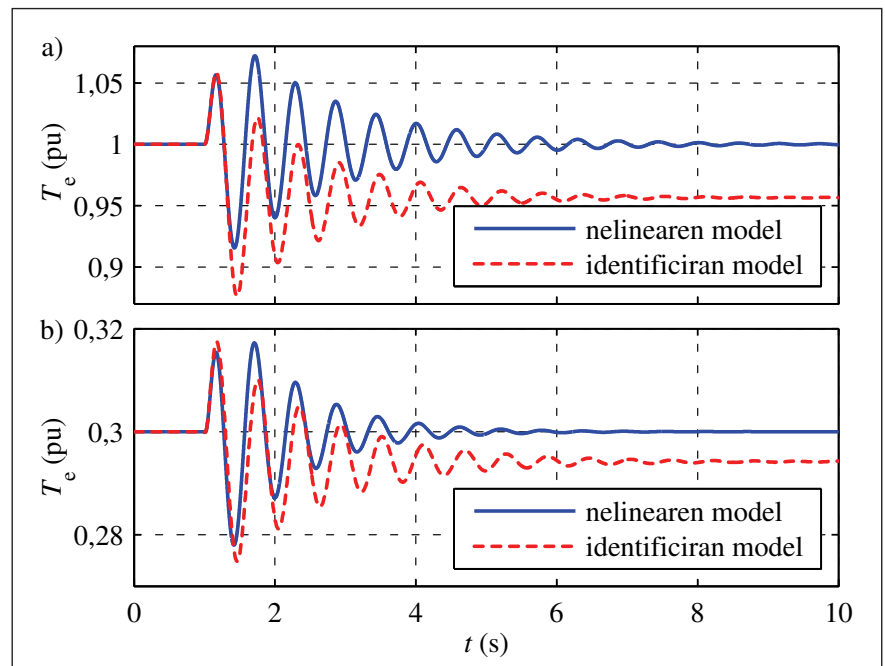
### 5.6 Identifikacija različnih prenosnih funkcij PLM sistema SMIB

Model sinhronskega generatorja lahko identificiramo iz različnih izhodnih signalov PLM sistema SMIB, pri tem pa kot vhod vedno uporabimo referenčno vrednost regulatorja napetosti ( $u(t) = V_{t,ref\Delta}(t)$ ). V nadaljevanju sta prikazana primera identifikacije iz statorske napetosti  $y(t) = V_{t\Delta}(t)$  na *sliki 9* ter kotne hitrosti vrtenja  $y(t) = \omega_{\Delta}(t)$  na *sliki 10*.

Na *sliki 9* je prikazan odziv spremembe izhodne napetosti  $V_{t\Delta}(t)$  na PBR vzbujalni signal, na *sliki 10* pa odziv spremembe kotne hitro-

sti  $\omega_{\Delta}(t)$  na enak vzbujalni signal. Iz primerjav potekov ocenjenih parametrov diskretne prenosne funkcije vidimo, da lahko iz obeh veličin uspešno identificiramo prenosno

funkcijo. Vendar pa je iz rezultatov razvidno tudi, da se oba opisana izhodna signala sinhronskega generatorja ( $V_{t\Delta}(t)$  in  $\omega_{\Delta}(t)$ ) bistveno manj spreminjata ob istem vhodnem si-



**Slika 11.** Odziv nelinearnega in identificiranega modela na stopnično spremembo vzbujalne napetosti  $V_{t,ref\Delta}: 0 \rightarrow 0,1$  [pu] v  $t = 1$  [s] a)  $P = 1$ ,  $\cos\varphi = 0,85$  in b)  $P = 0,3$ ,  $\cos\varphi = 0,29$

gnalu v primerjavi z delovno močjo  $T_{e\Delta}(t)$ , prikazano na sliki 2. V praksi bi zaradi relativno manjših signalnih sprememb prišlo do zmanjšanja razmerja signal/motnje, kar neugodno vpliva na identifikacijski proces. Prav tako je v primeru merjenja kotne hitrosti  $\omega(t)$  merilnik le-te v veliko primerih premalo natančen. Zato je identifikacija modela sistema SMIB na osnovi sprememb izhodne moči  $T_{e\Delta}(t)$  dosti bolj smiselna kot identifikacija z merjenjem statorske napetosti  $v_t(t)$  ali kotne hitrost  $\omega(t)$ .

## ■ 6 Rezultati identifikacije sinhronskega generatorja

Zaključki analize, predstavljene v prejšnjem poglavju, so bistveni pri načrtovanju identifikacije na realnem sistemu SMIB. Delovanje identifikacijskega algoritma pa lahko preverimo tudi na nelinearnem  $dq$ -modelu sistema SMIB, saj ta predstavlja boljši približek realnemu sistemu kot poenostavljeni linearizirani model sistema SMIB. Rezultati identifikacije na primeru nelinearnega  $dq$ -modela sistema SMIB so za dve različni delovni točki prikazani na sliki 11.

Iz rezultatov, prikazanih na sliki 11, je razvidno, da se frekvenci in du-

šenji odzivov identificiranega in nelinearnega modela v obeh delovnih točkah zelo dobro ujemata, pojavi pa se pogrešek v stacionarnem stanju. Ker je za potrebe načrtovanja in sinteze regulacijskih sistemov sinhronskih generatorjev pomembno predvsem dinamično obnašanje identificiranih modelov, pogrešek v stacionarnem stanju ne predstavlja večjih ovir. Identificirani modeli predstavljajo dobro osnovo za načrtovanje in sintezo regulacijskih sistemov sinhronskih generatorjev.

## ■ 7 Zaključek

V članku je predstavljena uporaba rekurzivne identifikacijske metode najmanjših kvadratov z eksponentialnim pozabljanjem za identifikacijo parametrov matematičnega modela sinhronskega generatorja z napetostnim regulacijskim sistemom. Predstavljena identifikacijska metoda je računsko nezahtevna in robustna. Njena uporaba omogoča hitro določitev parametrov matematičnega modela in ne zahteva prekinitve koristnega obratovanja sinhronskega generatorja.

Podrobna analiza vpliva identifikacijskih parametrov na hitrost in natančnost identifikacije je podala smernice za izbiro najpomembnejših identifikacijskih parametrov.

Podana so priporočila za izbiro dinamike preizkusnega signala, časa vzorčenja, stopnje identificiranega modela, začetnih vrednosti in faktorja pozabljanja.

Uporaba identifikacijskih metod za izpeljavo parametričnega matematičnega modela sinhronskega generatorja se je izkazala kot zelo primerna. Tako dobljen model dobro opisuje vse pomembne dinamične lastnosti sinhronskega generatorja in je primeren za simulacije in analizo dinamičnih lastnosti ter za načrtovanje in sintezo regulacijskih sistemov sinhronskih generatorjev.

## Viri

- [1] Ritonja, J., Polajžer, B., »Regulacijski sistemi sinhronskih generatorjev«, Ventil, let. 20, št. 6, 2014.
- [2] Ritonja, J., Petrun, M., »Matematični modeli sinhronskega generatorja«, Ventil, let. 21, št. 1, 2015.
- [3] Isermann, R., Münchhof, M., »Identification of dynamic systems: An introduction with application«, Springer-Verlag, Berlin, 2011.
- [4] Ljung, L., »System identification: Theory for the user (second edition)«, Prentice Hall, PTR, 1999.

## Identification of synchronous generator linearized model

**Abstract:** The paper presents the use of the recursive least squares identification method with the exponential forgetting to identify the parameters of the simplified linearized input-output model of the synchronous generator connected to the infinite bus. The application of the identification methods replaces the need for knowledge or measurement of construction's data of the synchronous generator and the transmission line. The article presents a detailed analysis of the influence of the identification method parameters on the speed and accuracy of the identification. Based on this analysis the guidelines for the selection of identification method parameters are developed. The applicability of the results is confirmed with the time responses of the nonlinear  $dq$ -model and the identified linearized input-output model of the synchronous generator connected with the transmission line to the infinite bus.

**Keywords:** synchronous generator, identification, recursive least square identification method