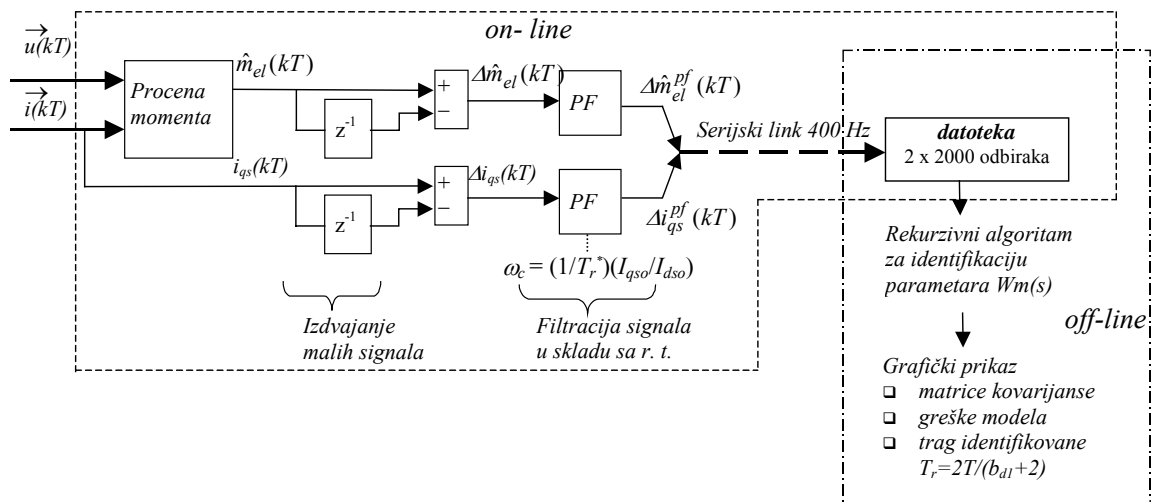


9.3. Procena vremenske konstante rotora na osnovu funkcije prenosa momenta

Matematičkom analizom u poglavlju 4 ispitana je osetljivost funkcije prenosa momenta na promenu vremenske konstante rotora. Pokazano je da parametri linearizovane funkcije prenosa momenta $W_m(s)$, inače promenjivi sa promenom radne tačke i promenom parametra T_r^* , zavise i od vrednosti stvarne T_r . U slučaju parametara imenioca ove funkcije, ova zavisnost je jednoznačna, i može se jasno izdvojiti od promena u parametrima nastalih usled promene stacionarne radne tačke ili promene parametra T_r^* .

U poglavlju 5 dat je način za identifikaciju parametara imenioca ove funkcije korišćenjem simulacionih rezultata za ostvareni elektromagnetni momenat i struju q ose statora. Takođe je predložen način za indirektnu procenu vremenske konstante rotora na osnovu jednom poznatih parametara. U ovom poglavlju ispitan je opisan metod, ali na setu podataka prikupljenih tokom rada eksperimentalnog pogona.

Svi eksperimenti u vezi identifikacije T_r na osnovu osobina funkcije prenosa momenta su vršeni sa brzinom rotora održavanom u okolini 600rpm (10Hz). Motor je mehanički spregnut sa dinamometrom *Magtrol*, HD-705-6, 50.0 lb-in. Položaj fluksa rotora određivan je na osnovu položaja rotora merenog inkrementalnim enkoderom i računom klizanja u modelu rotorskog kola. U motor je utisnuta nominalna vrednost d struje statora dok je oblik q struje statora menjan po potrebi tokom različitih eksperimenata. Ostvareni elektromagnetni momenat je procenjen na osnovu terminalnih veličina. Identifikacija parametara funkcije prenosa momenta je vršena na osnovu uzoraka procenjenog momenta i uzoraka merene q komponente struje statora korišćenjem rekurzivne metode najmanjih kvadrata. Blok dijagram toka i obrade signala tokom identifikacije T_r je prikazan na slici 9.31.



Sl. 9.31. Prikaz načina procene T_r na osnovu off-line identifikacije koeficijenata funkcije diskretnog prenosa momenta

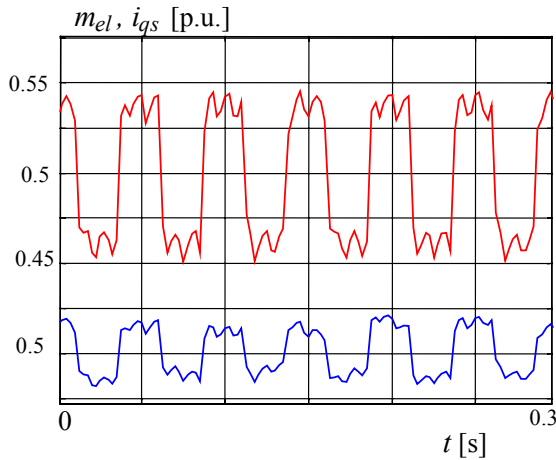
Radi moguće kontrole obrade jednom zapisanog skupa podataka rekurzivni algoritam je pozivan off-line iz programskog paketa *Matlab*. Vremenski inkrementi procenjenog el. momenta i q struje statora prenošeni su u toku rada pogona ka personalnom računaru gde su i

sačuvani, u cilju dalje obrade. Za prenos je korišćen serijski protokol MUMO razvijen u kompaniji Emerson Electric sa maksimalnom brzinu veze od 32400 b/s. Ovim je omogućen *on-line* prenos 400 parova odbiraka ova dva signala tokom jedne sekunde. S obzirom da nominalna vremenska konstanta korišćenog motora iznosi $T_r = 0.0974s$, i da su učestanosti relevantne za procenu ove konstante reda veličine desetine Hz, učestanost odabiranja od 400Hz se smatra dovoljnom. Nadalje, preklapanje viših spektralnih komponenti oba signala izbegnuto je usrednjavanjem odbiraka pre serijskog prenosa. Usrednjavanje je vršeno na 25 uzoraka odabranih tokom sukcesivnih PWM intervala i time je perioda odabiranja redukovana na 2.5 ms. Ukupno uzorkovanje podataka je trajalo 5 sekundi po jednom setu podataka, i time je preneseno 2000 tačaka koje su iskorišćene pri *off-line* proceni vremenske konstante rotora. Za funkciju prenosa momenta je pretpostavljen linearni model drugog reda. Pre rekurzivne procene nizovi podataka su propušteni kroz pojasni filter čija je centralna učestanost definisana odnosom struja statora i korišćenim parametrom $\omega_c = (1/T_r^*)(I_{qso}/I_{dso})$.

Relativna vrednost elektromagnetnog momenta je računata u toku svake PWM periode na osnovu procenjenog vektora fluksa statora (9.8) i korigovanog vektora struje statora (9.10),

$$\hat{m}_{el}(kT) = \hat{\phi}_{cs}^{ui}(kT) i_{\beta s}'(kT) + \hat{\phi}_{\beta s}^{ui}(kT) i_{cs}'(kT). \quad (9.16.)$$

Naravno, za jednoznačnost rešenja rekurzivnog metoda najmanjih kvadrata neophodno je posedovati dovoljno spektralnih komponenti ulaznih signala, posebno u filtrom izdvojenom opsegu. Da bi se pomenuto obezbedilo, prvo je ispitana mogućnost procene na osnovu test signala. Pravougaoni test signal sa osnovnim harmonikom učestanosti 20Hz je utisnut u zadatu vrednost q struje statora i procenjeni momenat i struja q ose prikazani su na slici 9.32.

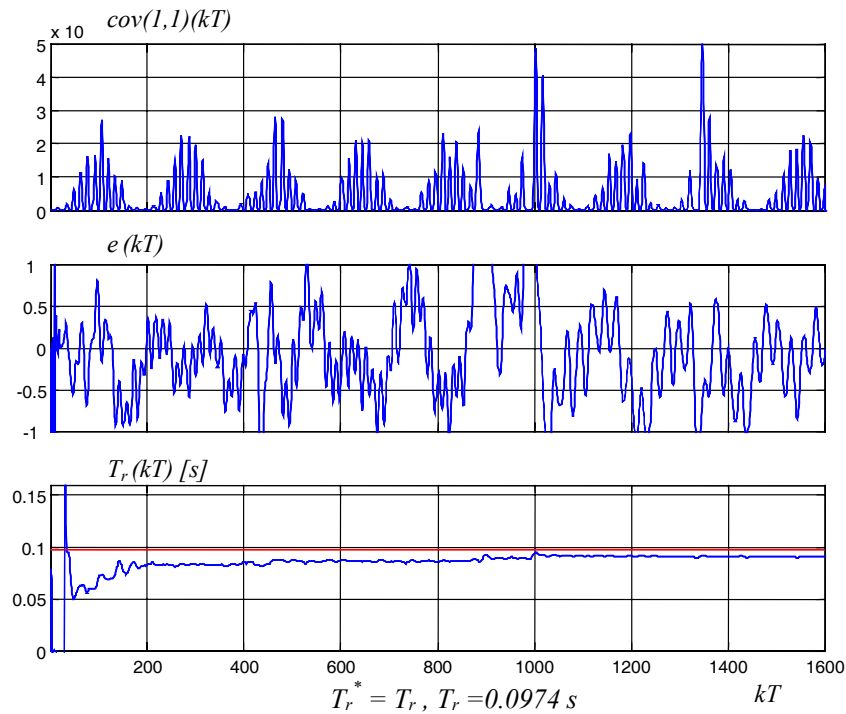


Sl. 9.32. Procenjeni el. momenat (donji trag) i merena struja q -ose (gornji trag) uz utisnuti pravougaoni test signal u zadatu struju q -ose.

Pravougaoni test signal je odabran jer poseduje širok spektra. Za očekivati je da uz ovaj signal utisnut u struju q ose statora postoji dovoljno informacija za jednoznačno rešenje sistema jednačina izgrađenog na osnovu modela $W_m(s)$ i ulazno-izlaznih odbiraka.

Na slici 9.33 su prikazani rezultati *off-line* identifikacije svih parametara funkcije prenosa momenta drugog reda i indirektno procene stvarne vremenske konstante rotora na osnovu ovih koeficijenata. Kao mera spektralne gustine ulaznog signala je dat trag prvog dijagonalnog elementa matrice varijanse regresivnog vektora na ulazu, $cov(\bar{x})$, gde je \bar{x} regresivan vektor definisan sa $[-\Delta m_e(T-1) -\Delta m_e(T-2) \Delta i_{qs}(T) \Delta i_{qs}(T-1) \Delta i_{qs}(T-2)]$, dalje je prikazana greška modela koja predstavlja razliku između merenog

momenta i izlaza linearnog modela računatog sa do tog trenutka procenjenim parametrima. Na donjim slikama je dat i trag procenjene vrednosti T_r . Ova vrednost je računata za svaku tačku rekurzivnog algoritma i predstavlja rešenje za T_r na osnovu do tog trenutka procenjenih vrednosti parametara imenioca funkcije prenosa momenta. Pri indirektnoj proceni T_r je primenjena veza na osnovu Euler metoda, $T_r = \frac{2T}{b_{d1} + 2}$, detaljno objašnjena u poglavlju 5.

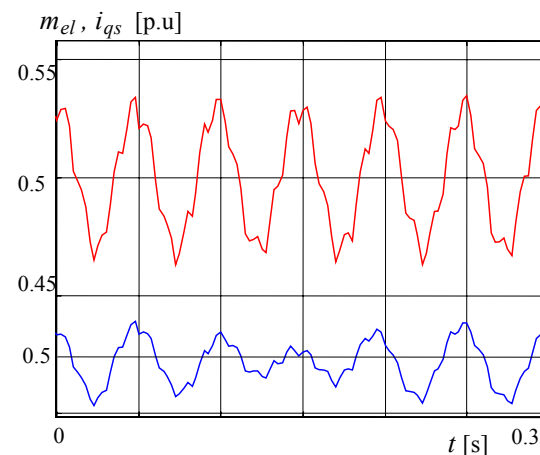


Sl. 9.33. Trag matrice kovarijanse, greške modela i procenjene vrednost T_r .
Pravougaoni test signal utisnut u zadatu vrednost struje q -ose.

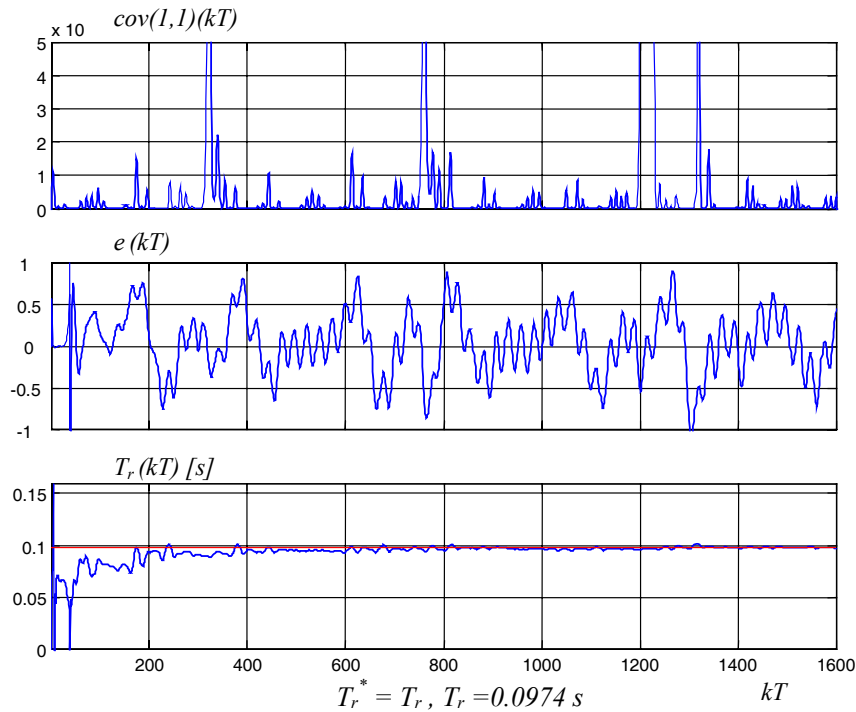
Gornji trag na slici 9.33 pokazuje periodičnost u matrici varijanse ulaza nastalu usled prisustva test signala. Donji trag prikazuje konvergenciju algoritma ka tačnoj vrednosti parametra. Za vremensku konstantu rotora je dobijena zadovoljavajuća procenjena vrednost nakon obrade 1000 odbiraka. U slučaju rada algoritma online, vreme potrebno da algoritam konvergira bi bilo u okolini 2.5 do 3 sekunde.

Zatim je u zadatu vrednost q struje statora utisnut prostoperiodičan test signal učestanosti 20 Hz. Uticaj ovog signala na ostvarene vrednosti struje statora q ose i procenjenog elektromagnetnog momenta prikazan je na slici 9.34. Tokom analize izvršene putem računarskih simulacija, u *noise free* okruženju, ovaj signal usled uskog spektra nije bio dovoljan za jednoznačno rešenje sistema jednačina za procenu parametara. Rezultat identifikacije na osnovu podataka prikupljenih iz eksperimentalnog pogona je potpuno drugačiji. Ponovo je korišćen set od 2000 tačaka odabranih svakih 2.5 ms tokom rada

pogona sa prostoperiodičnim signalom u struji q ose statora. Srednja vrednost momenta je i dalje održavana 5 lb-in. Slika 9.35 prikazaju potpunu konvergenciju algoritma i tačan rezultat *off-line* identifikacije T_r . Očigledno je da je prisustvo ostalih malih signala u pogonu učinilo procenu T_r i u ovom slučaju mogućom.



Sl. 9.34. Procenjeni el. moment (donji trag) i merena struja q -ose (gornji trag) uz utisnuti prostoperiodični signal (20Hz) u struju q -ose.

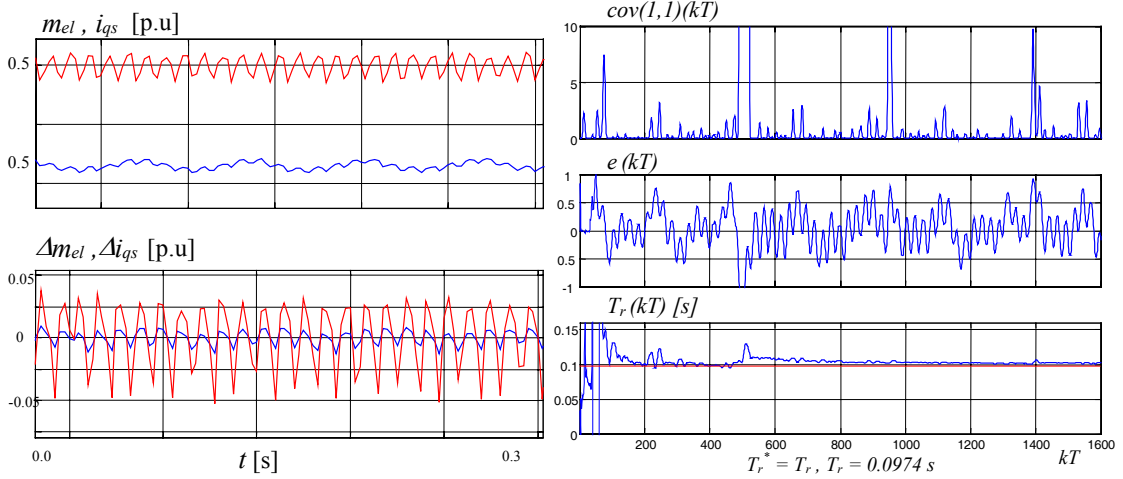


Sl. 9.35. Trag matrice kovarijanse, greške modela i procenjene vrednosti T_r .
 Prostoperiodični test signal utisnut u zadatu vrednost struje q -ose.

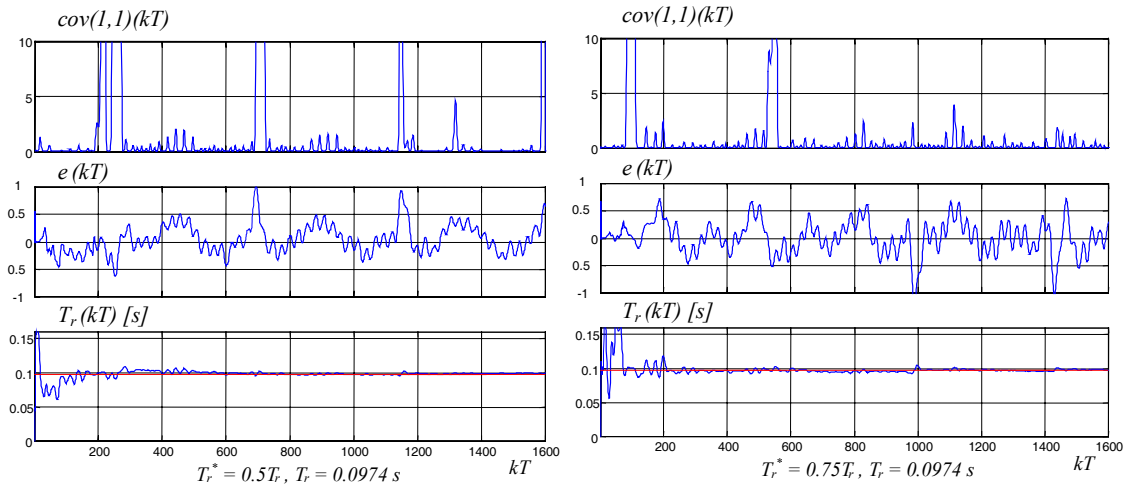
Prikazane slike prikazuju konvergenciju *least square* algoritma u okolini tačne vrednosti vremenske konstante rotora. Ovim je pokazano da je uz prisustvo korisnog signala u opsegu učestanosti od interesa na osnovu veze zadatog i ostvarenog momenta moguće proceniti T_r .

Naravno, utiskivanje test signala i izgradnja algoritma za procenu vremenske konstante rotora na osnovu ovog signala nije cilj ove disertacije. Fokus daljih eksperimenata je rad pogona bez utisnutog test signala, i identifikacija parametara na osnovu signala već prisutnih u pogonu. Inherentni mali signali pogona zatečeni u pogonu pri ekperimentalnoj analizi dati su na slici 9.36. U pogonu je isključen test signal, zadate su konstante vrednosti struja statora i izvršena akvizija podataka ka personalnom računaru. Na gornjoj slici prikazani su signali merene struje q ose i procenjenog elektromagnetnog momenta. Na donjoj slici prikazani su inkrementi ovih signala, korišćeni pri identifikaciji parametara $W_m(s)$, računati sa periodom trajanja 2.5 ms. Sa slike se može uočiti da u pogonu već postoji nekoliko malih signala, od kojih su neki pogodni za procenu vremenske konstante rotora. Signal procenjenog momenta poseduje uobičajenu oscilaciju na učestanosti napajanja nastalu prilikom procene fluksa statora ali ona nije u korelaciji sa signalom struje i *least square* algoritam je filtrira. Sa druge strane, različiti mali signali u signalu struje, nastale usled rada strujnog regulatora, se prenose direktno na signal ostvarenog momenta i predstavljaju koristan signal za identifikaciju T_r .

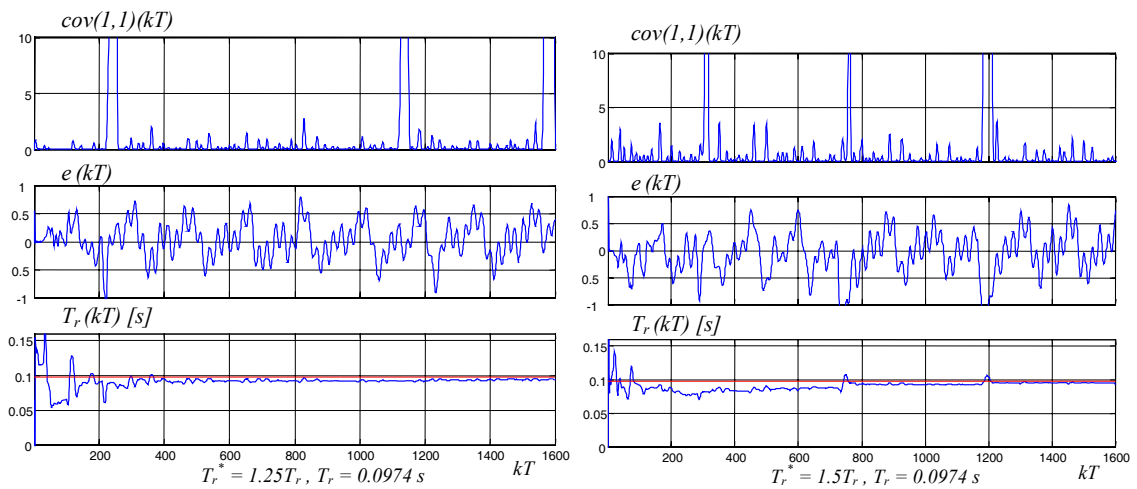
Dalje priložena eksperimentalna analiza pokazuje da je prisustvo ovih signala dovoljno za procenu vremenske konstante rotora. Pri toj analizi je uzeto u obzir da parametar vremenske konstante rotora korišćen u pogonu u opštem slučaju može biti pogrešan. Da bi se uticaj ove moguće greške ispitao, rezultati identifikacije T_r su dati na osnovu podataka prikupljenih pri radu pogona sa $T_r^* = [0.5T_r, 0.75T_r, T_r, 1.25T_r, 1.5T_r]$. Ovim je ispitana robustnost rezultata identifikacije T_r u odnosu na samu vrednost parametra T_r^* , korišćenu u pogonu pri uzorkovanju podataka. Na slikama 9.36 – 9.38 prikazani su rezultati rada algoritma.



Sl. 9.36. El. moment i struja q-ose i njihovi inkrementi (leva slika), $m_{elo} = 5$ lb-in. Rezultat rekurzivne identifikacije T_r , pri $T_r^* = T_r$, (desna slika)



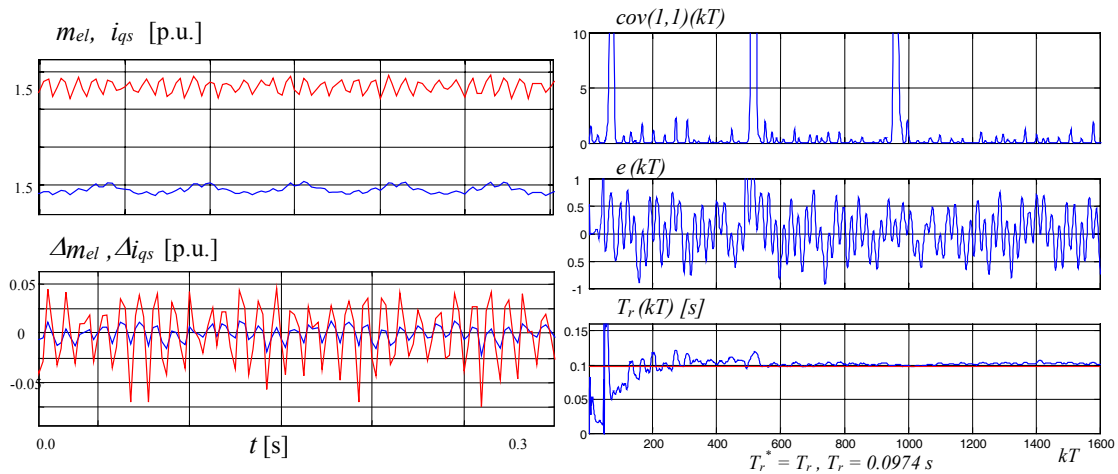
Sl. 9.37. Rezultat rekurzivne identifikacije T_r , $m_{elo} = 5$ lb-in, a) $T_r^* = 0.5 T_r$ b) $T_r^* = 0.75 T_r$.



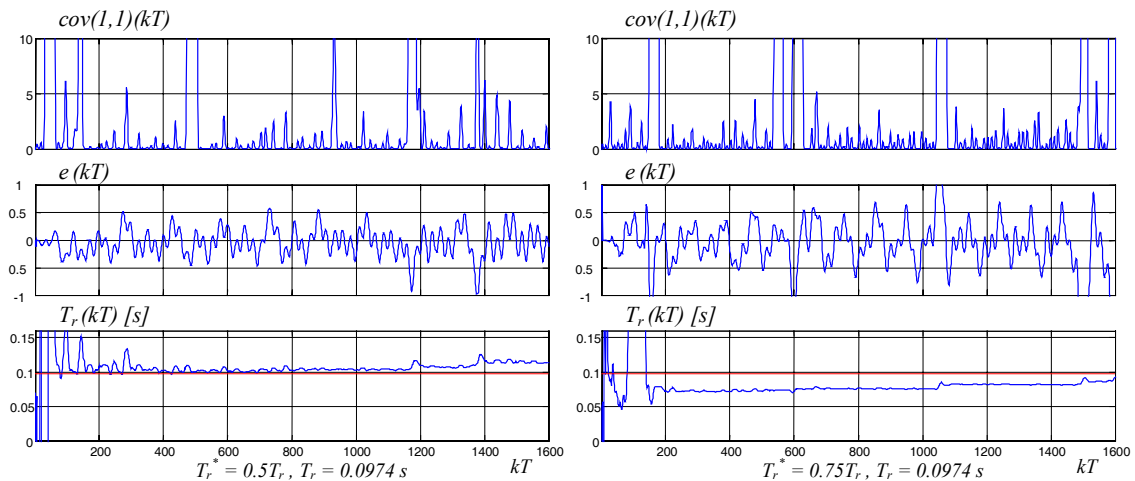
Sl. 9.38. Rezultat rekurzivne identifikacije T_r , $m_{elo} = 5$ lb-in, a) $T_r^* = 1.25 T_r$ b) $T_r^* = 1.5 T_r$.

Prikazani rezultati pokazuju da procena stvarne vremenske konstante ne zavisi od korišćene vrednosti ovog parametra. Ovo je veoma važan i povoljan rezultat, jer sama analitička razmatranja dovode do imenioca funkcije $W_m(s)$, $s^2 + 2/T_r s + (1/T_r^2 + W_{ko}^2)$, čiji parametri $W_{ko} = (1/T_r^*) I_{qso} / I_{dso}$ zavise od korišćene vrednosti T_r^* . U slučaju Euler aproksimacije, za račun T_r se koristi samo identifikovana vrednost parametra b_I , koja ne zavisi od T_r^* , ali to nije potpuno isključivalo eventualnu osetljivost procene i samim tim grešku rezultata. Parametri imenioca takođe zavise i od stacionarne radne tačke pogona (preko odnosa struja). Ova potencijalna zavisnost procene T_r od radne tačke pogona ispitana je uvećanjem zadate stacionarne vrednosti struje q ose. Uz zadatu vrednost struje d ose zadržanu na nominalnoj vrednosti ukupni razvijeni momenat je uvećan na 15 lb-in. Ostvarena vrednost struje q ose i procenjeni elektromagnetni momenat dati su na slici 9.39. Vremenski inkrementi ovih signala, korišćeni prilikom identifikacije T_r , takođe su prikazani.

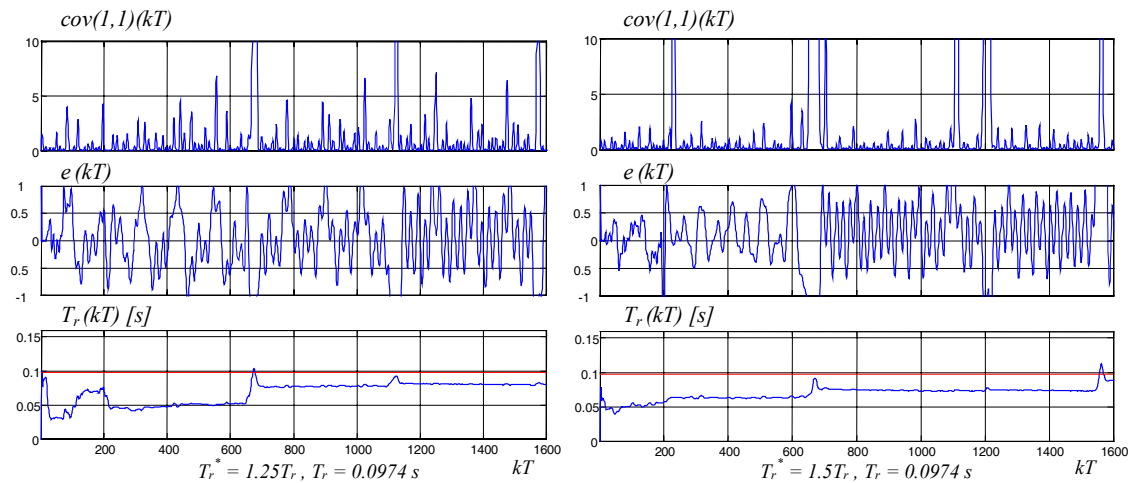
Na slikama 9.39 –9.41, su prikazani rezultati procene T_r za pet različitih vrednosti u DSP korišćenog parametra $T_r^* = [0.5 T_r, 0.75 T_r, T_r, 1.25 T_r, 1.5 T_r]$.



Sl. 9.39. El. momenat i struja q -ose i njihovi inkrementi (leva slika), $m_{elo} = 15$ lb-in. Rezultat rekurzivne identifikacije T_r , pri $T_r^* = T_r$, (desna slika)



Sl. 9.40. Rezultat rekurzivne identifikacije T_r , $m_{elo} = 15$ lb-in, a) $T_r^* = 0.5 T_r$ b) $T_r^* = 0.75 T_r$.



Sl. 9.41. Rezultat rekurzivne identifikacije T_r , $m_{elo} = 15 \text{ lb-in}$, a) $T_r^* = 1.25 T_r$, b) $T_r^* = 1.5 T_r$

Eksperimentalni rezultati prikazani u ovom poglavlju pokazuju da je stvarnu T_r moguće proceniti na osnovu malih signala već prisutnih u pogonu. Obradom podataka iz eksperimentalnog pogona su dobijeni veoma slični rezultati rekurzivne procene T_r kao i na osnovu podataka dobijenih računarskim simulacijama nelinearnog modela motora pobuđenog test signalom (poglavlje 5).

U ovom poglavlju je potvrđeno:

- linearizovana funkcija prenosa momenta data u poglavlju 4 dovoljno dobro opisuje uticaj male promene u signalu struje statora q ose na izlazni el. momenat,
- koeficijente ove funkcije je moguće identifikovati korišćenjem malih signala već prisutnih u pogonu,
- procena elektromagnetnog momenta pomoću terminalnih veličina na učestanostima od 10 Hz i više daje dovoljno potrebnih informacija o funkciji prenosa momenta,
- pokazano je da je rezultat procena stvarne T_r neosetljiv na vrednost parametara T_r^* korišćenog tokom prikupljanja podataka,
- datim eksperimentima sa različitim test signalima u okolini različitih ustaljenih vrednosti je potvrđena robustnost procene pri različitim situacijama u pogonu.