

## 10. Zaključak

U disertaciji je izvršena naučna rasprava koja se bavi procenom parametara rotorskog kola asinhronog motora u pogonu koji radi po algoritmu indirektno vektorske kontrole. Osnovni doprinos teze su dva originalna algoritma za procenu vremenske konstante rotora, jedan za pogon koji poseduje davač položaja na vratilu i drugi prilagođen pogonu bez davača na vratilu. U oba predložena algoritma informacija o parametru vremenske konstante rotora se nalazi na osnovu analize dinamike uvek prisutnih malih signala u pogonu. Ovim se izbegavaju svi poznati problemi procene ustaljenih vrednosti signala, pogotovo naglašeni pri malim brzinama rotora. Takođe, u slučaju *shaft-sensorless* pogona, korišćenje malih signala je moguće i u *quasi* stacionarnom stanju, kada nema značajnih promena vektora fluksa rotora i simultana procena brzine i parametara rotora na osnovu velikih signala inače nije moguća.

Teza je podeljena u više celina, koje postepeno opisuju način razvoja oba algoritma. Prvo je dat pregled autoru poznate literature iz tri oblasti od interesa: procene vremenske konstante rotora u pogonu sa davačem položaja, procena brzine i položaja rotora u pogonu bez davača i konačno, priložene su metode za procenu vremenske konstante rotora u pogonu bez davača na vratilu. Priložena literatura pokazuje veliku potrebu za automatskom identifikacijom parametara asinhronog motora. Posebno se pokazuje značajna procena parametara rotorskog kola, koje u slučaju kaveznog rotora nije pristupačno.

Na početku rada je data analiza osetljivosti pogona sa i bez davača na vratilu na grešku u parametru vremenske konstante rotora. Priloženi rezultati ove analize jasno ukazuju na potrebu za odgovarajućim algoritmom za procenu pomenutog parametra. U pogonu sa davačem položaja greška u parametru rotorskog kola dovodi do sprežanja kontura regulacije rotorskog fluksa i momenta, čime se narušava kvalitet dinamičkog odziva i konačno uspostavlja pogrešna stacionarna radna tačka. Ovo poslednje može da dovode do umanjenja statičkog pojačanja momenta i samim tim do uvećanja gubitaka u motoru kao i u invertorskom stepenu. Zatim je pokazano da *shaft-sensorless* pogon reaguje potpuno drugačije na grešku parametra rotora u odnosu na pogon sa davačem. U ovoj vrsti pogona konture upravljanja fluksom i momentom su potpuno neosetljive na promenu uslova rada rotorskog kola. Greška u parametru vremenske konstante rotora remeti rad pogona samo u slučaju zatvorene povratne sprege po brzini rotora, koja se usled ove greške pogrešno procenjuje i dovodi do ostvarene brzine rotora koja se razlikuje od referentne.

U radu se dalje uočava da elektromotorni pogon nikad ne ulazi u stacionarno stanje i da uvek postoje male varijacije svakog signala u pogonu u okolini njegove ustaljene vrednosti. Da bi se ispitala dinamika ovih malih promena razvijen je model za male signale asinhronog motora. Model je linearizovan u okolini odgovarajuće radne tačke što čini njegove parametre promenljivim. Prilikom planiranja modela je načinjen pokušaj da se zadrži na opštost istog, koji je konačno izgrađen tako da prihvata bilo koju kombinaciju promena  $dq$  komponenti struje statora i promena u učestanosti klizanja. Pored jednačina modela, prikazane su i sve parcijalne funkcije prenosa u modelu, uzimajući promene komponenti vektora fluksa rotora i promene el. magnetnog momenta kao moguće izlaze.

Model za male signale je dalje iskorišćen pri analizi osetljivosti prolaska bilo koje male promene kroz pogon na grešku u parametru vremenske konstante rotora. Posebna pažnja je posvećena linearizovanoj funkciji prenosa momenta koja modeluje prolazak promene u zadatom momentu kroz pogon. U radu je prikazana promena položaja nula i polova ove

funkcije, kao i strukturna promena faznih karakteristika iste sa promenom u vremenskoj konstanti rotora. Nastavak ovog dela rada se bavi raznim načinima za identifikaciju ovih promena i indirektnom procenom parametra rotora na osnovu njihove analize.

Prvi predloženi algoritam za identifikaciju rotorskog parametra upravo koristi osetljivost funkcije prenosa momenta kao informaciju za procenu. Ova funkcija se prvo identifikuje na osnovu signala procenjenog elektromagnetnog momenta dobijenog preko estimiranih terminalnih napona i merenih struja statora. Tačnije, u radu se predlaže da se na osnovu ovog signala identifikuju parametri pretpostavljene funkcije diskretnog prenosa momenta. U radu je prethodnom analizom pokazano da samo pojedine spektralne učestanosti ove funkcije jesu osetljive na promenu parametra rotora. Time je isključena potreba za procenom celokupnog signala momenta i koriste se samo delovi spektra ovog signala koji su od interesa. Za dalji proces identifikacije parametara funkcije diskretnog prenosa momenta treba prikupiti dovoljno odbiraka malih signala struje  $q$  ose i procenjenog elektromagnetnog momenta u okolini jedne radne tačke pogona. Rezultati dalje analize navode da je važno na ulazu imati signale sa dovoljno spektralne snage u delu spektra od interesa. Nakon detekcije dovoljno malih signala za procenu, predloženo je korišćenje metode najmanjih kvadrata greške ili vršenje pseudo inverzije u cilju identifikacije parametara linearizovane funkcije prenosa momenta. Jednom poznati parametri ove funkcije sadrže dovoljno informacija o stvarnoj vremenskoj konstanti rotora. Peto poglavlje pokazuje različite funkcionalne zavisnosti između vrednosti ovih parametara i parametra rotora. Direktna veza, na koju ne utiče vrednost stacionarnog stanja ili vrednost trenutne greške parametra, se nalazi u prvom parametru imenioca funkcije prenosa momenta. Ova veza je potvrđena putem računarskih simulacija izvršenih na dinamičkom nelinearnom modelu asinhronog motora. Rezultati istih su opisani na kraju petog poglavlja. Isti model je takođe poslužio za ispitivanje uticaja amplitude i učestanosti ulaznih test signala na grešku identifikacije. Time je ujedno bilo moguće i postaviti realna očekivanja po pitanju rezultata eksperimenata na osnovu malih signala koji već postoje u realnom pogonu.

Rad se zatim bavi *shaft-sensorless* pogonom sa MRAS-observera brzine rotora. Prvo je izvršena analiza osetljivosti stacionarne radne tačke pogona na grešku u parametru vremenske konstante rotora. Pokazano je da razdešenost parametra rotorskog kola utiče samo na procenu brzine rotora ali ne i na upravljanje rotorskim fluksom i razvijenim momentom.

Za pogon bez davača položaja je takođe uspostavljen matematički model za male signale. Ovaj model uvažava mogućnost greške u korišćenom parametru vremenske konstante rotora. Ovo predstavlja proširenje modela jer dosad publikovani radovi iz ove oblasti vrše analizu dinamičkog režima rada pod pretpostavkom da adaptivni model MRAS observera brzine radi bez greške. Ukoliko se mogućnost ove greške ne uključi u model ujedno se maskira i eventualna veza između vektora struje statora i greške MRAS observera brzine. U ovom radu je modelovan ovaj efekat i pokazano je da novi model mnogo efikasnije prati izlaz nelinearnog dinamičkog modela. Rezultati računarskih simulacija pokazuju da predložena korekcija modela za male signale MRAS observera čini model tačnijim, pogotovo u slučaju greške parametra vremenske konstante rotora.

Drugi predloženi algoritam za automatsku korekciju parametra vremenske konstante rotora je direktna posledica analize malih signala u MRAS observeru brzine. Pokazano je da spektralne komponente struje  $q$  ose u odgovarajućem opsegu spektra direktno i jednoznačno utiču na znak prvog izvoda greške MRAS observera. Specifična obrada ovog signala rezidualne MRAS greške i korelacija istog sa malim promenama u signalu struje  $q$  ose dovodi do identifikacije znaka greške parametra rotorskog kola. Zatim se predlaže jednostavna integralna akcija kojom se ovaj znak greške koristi za korekciju recipročne vrednosti parametra rotorskog kola.

Pri izboru algoritma za procenu vremenske konstante rotora u *shaft-sensorless* pogonima uzeto je u obzir da se ovaj tip pogona uobičajeno koristi u *cost-critical* primenama. DSP ili mikroprocesor koji se koristi u ovim pogonima uobičajeno nema dovoljno procesorske memorije i snage za izvršenje velikog broja matematičkih operacija *on-line*, u toku jedne PWM periode. Raspoloživa programska memorija je takođe značajno limitovana. Iz tog razloga je predložen algoritam koji je veoma jednostavan, lako ga je ugraditi u postojeće programske module i zahteva minimum procesorskog vremena i memorijskog prostora.

Rad oba predložena mehanizma za korekciju parametra vremenske konstante rotora je ispitan na eksperimentalnom pogonu koji se sastoji od 16-bitnog *Analog Device* DSP, 800 W invertora i trofaznog asinhronog motora nominalne snage 600 W, kao i prateće merne i upravljačke elektronske opreme. Motor je mehanički spregnut sa dinamometrom čime je obezbeđeno potrebno opterećenje ili potrebna brzina rotora tokom vršenih eksperimenata.

Mehanizam za korekciju parametra rotora u toku rada MRAS observera brzine je testiran *on-line*, naglom promenom u estimatoru korišćene vrednosti parametra. Da bi se obezbedilo dovoljno signala u opsegu spektra od interesa početna analiza rada je izvršena uz različite test signale utisnute u  $q$  komponentu struje statora. Ovim je ujedno proverena i ponovljivost rezultata procene nakon analize identičnih malih signala u pogonu. Krajnji cilj ovih eksperimenata nije bio rad algoritma uz utisnuti test signal ali isti su se pokazali neophodnim pri početnoj analizi i razumevanju problema. Nakon što su dobijeni zadovoljavajući i ponovljivi rezultati ispitana je mogućnost korekcije vremenske konstante rotora korišćenjem već prisutnih malih signala u pogonu. Ukidanjem test signala je drastično uvećano vreme konvergencije algoritma usled nedostatka dovoljno signala u delu spektra od interesa. Ipak, algoritam konvergira u okolini tačne vrednosti parametra rotora. Veoma pozitivan utisak o radu ovog algoritma nakon eksperimentalne verifikacije je delimično umanjen ispitivanjem osetljivosti istog. Rezultati eksperimenata pokazuju da je algoritma izuzetno osetljiv na promenu parametara statorskog kola kao i na grešku u proceni napona statora. Iz tog razloga su svi prikazani eksperimenti vršeni na  $\omega_r=10\text{Hz}$  i više.

Rad algoritma zasnovanog na funkciji prenosa momenta je ispitan *off-line*, na podacima prikupljenim u toku rada pogona. Ovaj pristup je odabran radi moguće kontrole obrade jednom zapisanog seta podataka. U toku rada pogona su odabrani mali signali struje  $q$  ose i procenjenog elektromagnetnog momenta i prenošeni ka PC računaru gde su zapisani u odgovarajuće datoteke. Svi rezultati prikazani u poglavlju 9.3 su rezultat primene rekurzivnog algoritma najmanjih kvadrata *off-line*, na podacima iz unapred zapisanih datoteka. Rezultati rekurzivne obrade podataka dobijenih iz eksperimentalnog pogona pokazuju veoma dobro slaganje sa rezultatima dobijenim na osnovu podataka zapisanih u toku računarskih simulacija rada nelinearnog modela motora. Ovim je pokazano: i) da linearizovana funkcija prenosa momenta jeste dobar model prolaska malih promena  $q$  struje statora kroz pogon, ii) da je parametre ove funkcije moguće proceniti na osnovu malih signala već prisutnih u pogonu, iii) i da ovi parametri jesu funkcija vrednosti vremenske konstante rotora.

Ova disertacija ima još jedan važan rezultat. Tokom eksperimenata je pokazano da je moguće vršiti optimalnu kontrolu asinhronog motora u *shaft-sensorless* pogonu opšte namene sa relativno malom jediničnom cenom. Korišćeni pogon je namenjen tržištu aparata za domaćinstvo i njegova jedinična cena je manja od 30\$, dok je cena DSP procesora u kome su vršeni svi potrebni algoritmi upravljanja i estimacije ispod 3\$. Primena naprednih algoritama kontrole u ovom pogonu je veoma značajan rezultat jer tržište danas konstantno zahteva umanjenje cene pogona ali ujedno i poboljšanje kvaliteta upravljanja. Umanjenje cene motora kao i invertorskog stepena je moguće samo u slučaju optimalne kontrole, uz konstantno praćenje parametara motora. Optimalna primena asinhronog motora u aparatima za domaćinstvo uglavnom podrazumeva maksimalnu eksploataciju dozvoljenog opsega radnih

temperatura motora. Na ovako odabranom asinhronom motoru je moguće očekivati značajnu promenu parametara statorskog i rotorskog kola već u toku prvog radnog ciklusa.

Postoje višestruki pravci daljeg razvoja i primene predloženih algoritama za identifikaciju rotorske vremenske konstante. Algoritam zasnovan na funkciji prenosa momenta je moguće testirati u *shaft-sensorless* pogonima. Za ovu primenu je neophodno dodatno modelovati parcijalnu funkciju prenosa klizanja na koju utiče dinamika procene brzine rotora. Takođe je moguće primeniti različite načine estimacije promena razvijenog elektromagnetnog momenta kao i uvažiti razna moguća poboljšanja procene vektora statorskog fluksa. Jednostavna procena statorskog otpora poređenjem amplituda dva modela rotorskog fluksa korišćena u eksperimentalnom delu rada se takođe može poboljšati i time se dodatno može umanjiti greška procene elektromagnetnog momenta. Algoritam procene podesan za primenu u MRAS observeru brzine je moguće primeniti uz različite MRAS promenjive stanje. Rezultati MRAS observera brzine koji radi sa reaktivnom snagom kao promenjivom stanja ukazuju na mogućnost primene istog pri veoma malim brzinama rotora. Rad referentnog modela ovog estimatora brzine je neosetljiv na grešku u parametru statorske otpornosti i ne zahteva integraciju čime se ujedno olakšava i primena predloženog algoritma za procenu vremenske konstante rotora.