

1. Uvod

1.1. Uvodna razmatranja

Predmet naučne rasprave u tezi je problem estimacije parametara rotorskog kola asinhronog motora. Elektronski regulisani pogoni sa asinhronim motorom imaju brojne prednosti nad ostalim rešenjima. Njihova energetska efikasnost i pouzdanost prevazilaze karakteristike pogona koji se tradicionalno koriste u rezidencijalnom sektoru, pogona u okviru kancelarijskih uređaja, kućnih aparata i drugih masovnih pogonskih primena. Pored ostalih prednosti, trofazni asinhroni motori omogućuju značajno manji utrošak aktivnih materijala i energije u fazi proizvodnje nego što je to slučaj kod kolektorskih (tj. univerzalnih) motora, motora za jednosmernu struju, ili jednofaznih asinhronih motora. Problem koji ograničava širu primenu elektronski regulisanih asinhronih motora je potreba za poznavanjem parametara motora kako bi se u toku eksploatacije dobile željene karakteristike. Greške u oceni parametara motora mogu rezultovati neželjenim uvećanjem gubitaka snage i gubitkom stabilnosti u određenim režimima rada. Rotorsko kolo asinhronog motora sa kratko spojenim kavezom nije dostupno, što dodatno otežava estimaciju njegovih parametara.

U zavisnosti od polja primene i zahtevanih karakteristika pogona jasno se izdvajaju dva osnovna pravca u eksploataciji električnih pogona sa asinhronim motorom. Pogon sa davačem položaja na vratilu i pogon bez davača položaja (*shaft-sensorless*).

Regulisani pogon, u slučajevima kao što je robotika i alatne mašine, mora posedovati davač položaja na vratilu i obavljati funkcije brzinske i pozicione kontrole. U ovoj vrsti pogona, prioritet u izgradnji nije cena, već optimalno upravljanje, velika brzina i tačnost odziva brzine i položaja rotora. Ukoliko je neophodno regulisati brzinu u širokom opsegu uobičajeno se bira asinhroni motor. Asinhronim motorom sa davačem položaja se uglavnom upravlja algoritmom indirektno vektorske kontrole (IFOC - *indirect field oriented control*). IFOC ne zahteva merenje i integraciju terminalnih veličina i omogućava kontrolu fluksa i momenta pri brzinama bliskim ili jednakim nuli. Ovim se dobija robustan pogon kojim je moguće optimalno upravljati u širokom opsegu brzina, kao i pri stanju mirovanja rotora.

Rad na razvoju raznih modela za optimalno upravljanje asinhronim motorom sa davačem položaja je uglavnom završen. Ono što se još uvek traži i nije dovoljno ispitano jesu algoritmi za automatsku procenu u tim modelima korišćenih parametara. Osnovna mana indirektnog računa položaja fluksa rotora je zavisnost rezultata od promenljivih parametara rotorskog kola. Promena vremenske konstante rotora $T_r = L_r/R_r$, može biti izazvana promenom otpornosti rotora sa temperaturom kao i promenom induktivnosti rotora sa promenom nivoa magnetnog zasićenja. Odstupanje pretpostavljene od stvarne vrednosti ovog parametra dovede do pogrešnog postavljanja vektora magnetopobudne sile statora u odnosu na vektor fluksa rotora. Time se narušava raspregnuto upravljanje fluksom i elektromagnetnim momentom i rad pogona sa davačem položaja prestaje da bude optimalan.

Sa druge strane, asinhroni motor bez davača položaja nalazi sve veću primenu u pogonima opšte namene. Potreba za umanjnjem cene i povećanjem robustnosti pogona opšte namene potiskuju u drugi plan visoke performanse i optimalni rad. Ovom tržištu je neophodno ponuditi pogon koji se proizvodi u masovnim serijama, koji ima veoma malu proizvodnu i tržišnu cenu i kojim je lako upravljati. Veliki broj senzora, kablova i skupih signal konvertora koji su

sastavni deo jednog servo pogona, potpuno su neprihvatljivi. Jedan od senzora čija je cena obično neprihvatljiva je upravo davač položaja na vratilu. Na primer, cena jednog optičkog inkrementalnog enkodera može biti veća od ukupne cene pogona opšte namene sa izlaznom snagom do 1KW. Slično je i u slučaju elektromagnetnog rizolvera koji bi zahtevao i dodatni R/D konvertor ili dodatnu procesorsku snagu za obradu signala položaja. Konačno, da bi cena pogona bila prihvatljiva na tržištu aparata za domaćinstvo često se izbegava i ugradnja jednostavnog AC tahometra, sa jedničnom cenom manjom od \$1.

Umanjenje broja merenja u pogonu zasnovano je na primeni savremenih algoritama za procenu stanja i izlaza motora. Ovi algoritmi su uglavnom složeni i namenjeni su za rad na savremenom Digitalnom Signalnom Procesoru (DSP). Iako sama cena DSP jedinice konstantno pada i značajno se približava ceni mikroprocesora, relativno složena i skupa kola za napajanje i dodatne periferije pridružene uz *high-end* DSP čine isti neprihvatljivim u *cost-critical* pogonima opšte namene. Sa druge strane, jeftinije DSP verzije poseduju ograničenu programsku memoriju i uz relativno malu frekvenciju rada mogu da izvršavaju samo numeričke neintenzivne *sensorless* algoritme, kao na primer observer brzine rotora zasnovan na MRAS (*Model Reference Adaptive System*) principu.

Pored potrebe za umanjnjem njegove jedinične cene, pogon opšte namene se danas suočava i sa oštrijim specifikacijama po pitanju kvaliteta ostvarenog stacionarnog stanja kao i brzine odziva. Kvalitetan rad pogona otvara i mogućnost optimalnog izbora samog motora, čime se dodatno umanjuje cena konačnog proizvoda. Nadalje, u većini primena pogona postoje značajne sigurnosne mere, i *shaft-sensorless* pogon je prihvatljiv jedino u slučaju robustne estimacije brzine čiji rad nije narušen promenom uslova rada pogona ili promenom parametara motora. Pomenuto navodi da pogon bez davača na vratilu takođe mora da radi optimalno, i samim tim da poseduje odgovarajući algoritam za procenu položaja fluksa i brzine rotora. Da bi algoritam procene ujedno radio i robustno, isti mora biti nadograđen algoritmima za *on-line* procenu relevantnih parametara mašine. MRAS estimator brzine je kao i većina *shaft-sensorless* metoda osetljiv na grešku u proceni statorskog napona kao i na grešku parametara statorskog kola. Problem se uvećava pri malim brzinama rotora kada pad napona na nepoznatoj statorskoj otpornosti postaje značajan. Parametar rotorskog kola nije kritičan pri proceni položaja rotorskog fluksa ali njegova greška utiče na procenjenu vrednost brzine rotora. Ovu grešku je naročito značajna pri malim brzinama i neophodno ju je umanjiti u pogonima sa uskim specifikacijama po pitanju ostvarene brzine rotora.

Poznavanje vrednosti vremenske konstante rotora postaje neophodno u pogonima sa i bez davača položaja na vratilu. Inicijalna procena i podešavanje ovog parametra nisu dovoljni. Parametar je promenljiv, zavistan od temperature rotora kao i od nivoa zasićenja magnetnog kola. Poslednje je moguće korigovati praćenjem nivoa zasićenja magnetnog kola rotora i *feedforward* korekcijom parametra. Sa druge strane, u optimalno projektovanom pogonu predviđene su značajne ekskurzije temperature rotora čak i u toku jednog radnog ciklusa. Iste izazivaju značajnu promenu vremenske konstante rotora koja se ne može predvideti. Da se ne bi uvećao broj senzora u pogonu, promenu rotorskog parametra treba vršiti bez merenja napona, struje ili temperature statora i rotora. U slučaju *shaft-sensorless* pogona uskraćena je i informacija o brzini rotora.

Iz izloženog je jasno da raste potreba za mehanizmom koji vrši procenu parametra vremenske konstante rotora u toku rada pogona. Ovu procenu treba vršiti na osnovu raspoloživih davača i bez remećenja rada pogona. Takođe, rezultat procene parametra ne treba da zavisi od režima rada, i ne sme biti osetljiv na grešku u ostalim parametrima. Algoritam za identifikaciju parametara rotorskog kola asinhronog motora koji zadovoljava sve pomenute uslove i dalje ne postoji.

1.2. Pregled literature

U ovom poglavlju dat je pregled postojeće literature iz oblasti od interesa za ovaj rad. Priložena je autoru poznata literatura iz oblasti procene parametra vremenske konstante rotora u pogonima sa senzorom pozicije kao i u pogonima bez senzora. Takođe, za pogone bez senzora pozicije izvršena je analiza literature iz oblasti procene brzine i pozicije, kao oblasti usko povezane sa procenom parametra rotorskog kola.

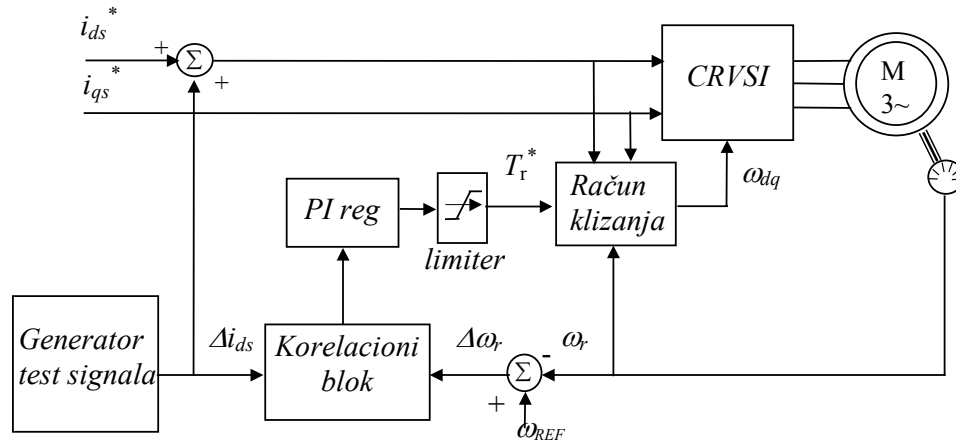
1.2.1. Pregled literature iz oblasti procene parametara rotora asinhronog motora sa davačem položaja

U pogonima sa davačem položaj rotorskog fluksa se računa indirektno, u modelu rotorskog kola. Model rotorskog kola, u toku rada pogona, simulira pojave u rotorskom kolu samog motora i izračunava poziciju rotorskog fluksa. Rezultat ove procene je osetljiv na promenu parametra vremenske konstante rotorskog kola [A1]. Odstupanje pretpostavljenih od stvarnih vrednosti parametara rotorskog kola rezultuje narušavanjem kvaliteta dinamičkog odziva i nepovoljnim statičkim karakteristikama pogona. Kao posledica nepodešenosti javlja se oscilatorni odziv momenta i fluksa koji su posebno izraženi kod pogona veće snage [A2]. Za problem inicijalnog podešavanja rotorske vremenske konstante nepoznatog motora predloženo je više primenjivih metoda [A3]. Da bi pogon radio optimalno ovo nije dovoljno i *off-line* podešenu vrednost parametra je neophodno korigovati u toku rada pogona u skladu sa promenama u rotorskom kolu motora. Ovo dovodi do razvoja velikog broja metoda koje po različitim principima vrše korekciju parametra rotora. Idealni metoda za automatsku korekciju nakon inicijalnog podešavanja parametra se još uvek traži. Postavljeni zahtevi su:

- korekcija rotorske vremenske konstante mora biti moguća u svim režimima rada pogona,
- mehanizam za korekciju ne sme biti osetljiv na varijacije ostalih parametara,
- mehanizam ne sme koristiti dodatne test signale ili da radi pod specijalnim test uslovima,
- mehanizam za korekciju treba da koristi raspoložive davače u pogonu,
- mehanizam mora biti primenjiv na standardnom asinhronom motoru,
- softverska implementacija algoritma treba da bude moguća u realnom vremenu,
- uz unapred korigovanu induktivnost magnećenja [A4] i [A5] ostaje samo korekcija promene rotorskog otpora sa temperaturom, i time brzina konvergencije nije kritična.

Dosad predložene metode su selektovane u radovima [A6] i [A56] mogu se podeliti u dve osnovne grupe: 1. Metode zasnovane na utiskivanju test signala i 2. Metode koje za korekciju rotorske vremenske konstante ne koriste test signal.

Metode prve grupe su zasnovane na merenju odziva mašine na utisnuti test signal. Test signal se sabiranjem dodaje na signal zadate d struje statora. Predložene su razne varijante test signala od kojih su najinteresantniji prostoperiodični i impulsni slučajni binarni signal (PRBS). Odziv na test signal se meri ili preko pulsacija fluksa merenjem terminalnih napona ili preko pulsacija momenta merenih preko senzora brzine. Određivanje greške u korišćenoj vremenskoj konstanti rotora zasniva se na poznavanju strukture modela mašine i korelaciju test signala i odabranog odziva. Tipičan primer metode injektovanja test signala prikazan je na slici 1.1. U prikazanom primeru test signal se utiskuje u magnetizacionu (d) komponentu statorske struje a odziv se meri preko senzora brzine na vratilu.



Sl. 1.1. Primer primene test signala za procenu vremenske konstante rotora.

Ovu metodu predlažu Branco i Stephan [A7] koji koriste PRB test signal sa 15 % amplitude nominalne struje koji se utiskuje u magnetizacionu komponentu struje statora i koreliše sa varijacijom brzine rotora. U slučaju nepodešene rotorske vremenske konstante javlja se sprega između osa i utisnute pulsacije magnetizacione komponente struje statora dovode do pulsacija momenta i brzine koje predstavljaju informaciju za korekciju. Ukoliko su velike varijacije brzine nedopustive autori predlažu smanjenje amplitude test signala i uvećanje osetljivosti senzora na vratilu. Sugimoto [A8] utiskuje prostoperiodični test signal učestanosti 6Hz i vrši korekciju rotorske konstante merenjem reakcije mašine preko statorskih napona. Autor pokazuje da algoritam radi i u slučaju neopterećene mašine.

Dobra strana metoda sa utisnutim test signalom je mogućnost procene vremenske konstante rotora nezavisno od uslova rada mašine, kao na primer pri minimalnom opterećenju ili pri stanju mirovanja rotora. Zajednička mana svih metoda sa test signalom je narušavanje rada pogona. Da bi se frekventno zavisna rotorska otpornost pravilno estimirala neophodno je koristiti test signal na učestanostima rotorskih struja. Test signal na ovim učestanostima ulazi u propusni opseg regulatora brzine i obavezno unosi neželjene pulsacije u ostvarenom fluksu i elektromagnetnom momentu. Da bi se te pulsacije izbegle u pojedinim rešenjima se predlaže test signal na visokim učestanostima. Schmidt u [A9] predlaže test signal frekvencije 80Hz i više. Povećanje učestanosti test signala je ipak ograničeno propusnim opsegom invertora, potrebom za uvećanjem mernog opsega kao i promenom rotorske otpornosti sa učestanosti. Ovo poslednje je i razlog značajne greške ovih metoda, koje procenju vrednost rotorske otpornosti koja odgovara visokim frekvencijama rotora a ne bliskim učestanostima klizanja. Za odgovarajući oblik rotora je moguće pronaći zavisnost između ove dve vrednosti otpora i načiniti odgovarajuću korekciju rezultata. Time se rešenje komplikuje i gubi na opštosti.

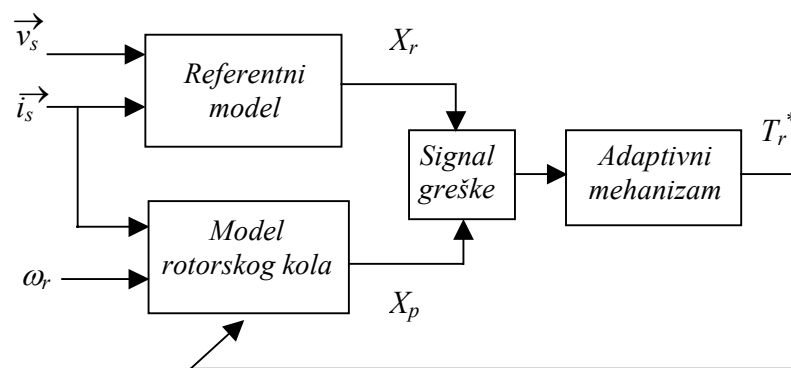
Zai i Lipo u [A10] predlažu da se test signal ne utiska, već da se iskoristi već prisutni test signal nastao usled nasvršenosti rada naponskog PWM invertora. Komutacioni PWM šum zauzima širok frekvencijski opseg i smatra se dovoljnom pobudom za procenu recipročne vrednosti vremenske konstante rotora kao pete promenljive stanja u sklopu proširenog Kalmanovog filtera. Ovim se ne remeti rad pogona ali veoma visoka učestanost PWM signala čini da ova metoda pravi sličnu grešku kao metode sa test signalom visoke učestanosti.

Postoje metode koje za vreme identifikacije podrazumevaju specijalne režime rada pogona. Jedna od metoda [A11] predlaže injektovanje test signala u statorske struje koji formiraju inverzno obrtno polje. Merenjem inverzne komponente statorskih napona dolazi se

do vrednosti rotorskog otpora. Problem primene ovog pristupa su velike pulsacije momenta i moguća mehanička rezonancija koju izaziva inverzna polje.

Korišćenje test signala radi estimacije rotorske vremenske konstante obavezno narušava rad pogona i ne može se usvojiti kao konačno rešenje. Ukoliko se poveća broj merenja u pogonu, na primer postavljanjem *Hall* senzora ili senzora temperature na rotor, može se precizno proceniti rotorska vremenska konstanta bez narušavanja rada pogona. Ovo takođe nije prihvatljivo jer se podrazumeva korišćenje asinhronne mašine sa dodatnim priključcima i/ili sensorima. Iz istog razloga nije prihvatljivo ni merenje fluksa u međugvožđu koje predlažu Moreira i Lipo [A12]. Za nestandardni asinhroni motor, sa statorskih namotajima povezanim u zvezdu i raspoloživom neutralnom tačkom, autori koriste treći harmonik u statorskom naponu za merenje stvarnog klizanja i korekciju rotorske vremenske konstante.

Veliki broj metoda se zasniva na primeni MRAS sistema u proceni parametra vremenske konstante rotora. U ovim metodama poredi se određena veličina procenjena na osnovu terminalnih veličina sa istom procenjenom u modelu rotorskog kola. Ukoliko veličina procenjena modelom rotorskog kola odstupa od referentne (procenjene na osnovu terminalnih struja i napona) koriguje se parametar vremenske konstante rotora. Opšta šema ovih metoda prikazana je na slici 1.2.



Sl. 1.2. Opšta šema primene MRAS metoda za procenu vremenske konstante rotora u pogonu sa davačem položaja.

Eventualna greška u rezultatu na izlazu referentnog modela je ujedno i usko grlo primene ovih metoda. Ovaj model je parametarski osetljiv, posebno na grešku u otpornosti statora. Zatim, da bi se izbegla ugradnja dodatnih senzora uobičajeno je da se terminalni naponi motora ne mere nego procenjuje na osnovu invertorskih upravljačkih impulsa i napona jednosmernog međukola [A13]. Ova procena donosi razne nove izvore greške, kao što su mrtvo vreme u radu prekidača, pad napona na prekidačima kao i varijacija u naponu jednosmernog međukola. Određene kriterijumske funkcije zahtevaju procenu elektromotorne sile indukovane u naponima statora, što donosi dodatne probleme usled *offset-a* integratora.

Odabrana kriterijumska funkcija donosi niz osobina algoritmu korekcije parametra kao što su: brzina konvergencije, zavisnost od opterećenja, osetljivost na grešku u rotorskoj konstanti, minimalnu učestanost polja na kojoj algoritam može da radi i zavisnost od ostalih parametara mašine. Ukoliko pogon ne radi u oblasti malih brzina rotora može se koristiti nekoliko kriterijumskih funkcija: rotorski fluks, elektromagnetni momenat [A14], snaga obrtnog polja [A15], d i q komponenta napona statora [A16]. Za račun u referentnom modelu svih

navedenih veličina neophodno je proceniti statorski napon i poznavati statorsku otpornost. Iz tog razloga ove metode prave značajnu grešku pri niskim učestanostima statora (<5Hz).

Pogon sa davačem pozicije je namenjen da radi pri malim brzina ili pri zaustavljenom pogonu. Zato je važno pronalaženje pogodne kriterijumske funkcije za primenu u pozicionim servo mehanizmima gde je neophodno vršiti pravilnu korekciju vremenske konstante rotora i u oblasti malih brzina. Da bi mehanizam pravilno radio u oblasti malih brzina neophodno je izbeći zavisnost kriterijumske funkcije od statorske otpornosti, mrtvog vremena u radu prekidačkih elemenata i u slučaju integralne kriterijumske funkcije parazitne jednosmerne komponente integratora. Garces koristi kriterijumsku funkciju baziranu na reaktivnoj snazi mašine [A17]. Ova kriterijumska funkcija se može proceniti iz statorskih struja i napona nezavisno od statorske otpornosti i bez integracije. Time je otvorena mogućnost rada algoritma pri malim brzinama polja. Kontrolom magnetne energije skladištene u induktivnosti magnećenja Peng [A54] takođe izbegava uticaj statorskog otpora na rezultat. Koyama u [A18] predlaže sličnu kriterijumsku funkciju i razmatra problem mrtvog vremena prekidača i uticaja induktivnosti mašine korišćenih u procesu procene kriterijumske funkcije. Ovaj algoritam i dalje nije primenjiv u pozicionim servomehanizmima jer ga je zbog prirode kriterijumske funkcije potrebno isključiti pri nultoj brzini polja i minimalnim opterećenjima. U cilju pronalaženja mehanizma za adaptaciju pogodnog za pozicione servomehanizme Vukosavić i Stojić [A19] takođe biraju kriterijumsku funkciju koja ne zavisi od statorske otpornosti. Ukoliko se koristi usrednjena vrednost ove funkcije po periodi napajanja poništava se efekat mrtvog vremena i umanjuje se pulsacija prouzrokovana *offset* komponentom na izlazu senzora. S obzirom da se pri radu pozicionog servo mehanizma koriste frekvencije napajanja ispod 1 Hz, čije usrednjavanje može izazvati probleme pri korekciji induktivnosti magnećenja, estimira se samo vrednost rotorske otpornosti dok se induktivnost magnećenja unapred koriguje u modelu rotorskog kola. Problem pri korišćenju ovog algoritma može izazvati korišćenja ekvivalente induktivnosti rasipanja koja za pojedina rešenja rotora može značajno da se menja sa opterećenjem.

Iako su predložena razna korisna rešenja, rad na proceni T_r u pogonu sa senzorom pozicije i dalje nije završen. Uvećanje raspoložive memorije i brzine rada novijih DSP danas čini strukturu upravljanja motorom sa potpunim observerom rotorskog fluksa veoma popularnom. U ovoj strukturi postoji povratna sprega u vidu merenja struja statora koja se u [A57] ujedno i koristi za simultanu procenu statorske i rotorske otpornosti. Algoritam koji se bazira na parametarskoj osetljivosti estimacije induktivnosti rasipanja je predložen u [A58]. Metod se može primenjivati u slučaju motora sa kaveznim rotorom koji poseduje konstantnu induktivnost rasipanja. Svako odstupanje rezultata procene ovog parametra od nominalne vrednosti se povezuje sa greškom u parametru vremenske konstante rotora i ista se koriguje.

Informacija o vremenskoj konstanti rotora se može pronaći i na osnovu dinamike malih signala prisutnih u pogonu. Linearizovana funkcija prenosa momenta zavisi od parametra rotora [A2] i identifikacijom njene fazne karakteristike isti je moguće proceniti [A20]. Problem primene ovog rešenja je u dodatnoj osetljivosti fazne karakteristike funkcije prenosa momenta na promenu opterećenja. Pokazano je da određena opterećenja u pogonu dovode do promene znaka fazne greške, pri istoj grešci parametra rotora.

I pored činjenice da su pogoni visoke performanse sa asinhronim motorom uveliko prisutni na tržištu, mali broj istih poseduje mehanizam za korekciju parametara rotora. Konačno rešenje za automatsku kompenzaciju vremenske konstante rotora pogona sa davačem pozicije se i dalje traži. Posebno su interesantni režim rada sa brzinama rotora bliskim nuli, rad pri neopterećenom pogonu kao i automatsko podešavanje parametara nepoznatog motora bez učešća čoveka.

1.2.2. Pregled literature iz oblasti procene brzine asinhronog motora

Postoje brojne prednosti izgradnje pogona asinhronog motora bez davača položaja rotora. Umanjuje se cena pogona, smanjuje se veličina motora, instalacija pogona se uprošćava i povećava se robusnost rada. Poslednjih godina se javlja veliki broj šema za kontrolu rada asinhronog motora u kojima se rotorska brzina procenjuje i koristi za uspostavljanje brzinske povratne sprege. Dobri pregledi *shaft-sensorless* metoda su dati u [A21], [A22] i [A23].

Prvobitni pogoni bez senzora brzine zasnovani su na skalarnim metodama u kojima se na neki način kompenzuje klizanje rotora. Metode iz ove grupe se baziraju na stacionarnim jednačinama elektiričnog kola asinhronog motora i konstantnim u/f odnosom održavaju nominalan fluks u mašini. One nemaju dobre dinamičke karakteristike i mogu imati značajnu statičku grešku u procenjenoj brzini rotora. Stacionarnu vrednost klizanja rotora u odnosu na stator je moguće izračunati na osnovu odnosa momenta, vrednosti elektromotorne sile i statorske učestanosti [A24]. Slično je predloženo i u referenci [A25] u kojoj se ugao između statorskog napona i struje koristi za izračunavanje klizanja. Za pogone niske cene, u kojima nije neophodno precizno kontrolisati brzinu rotora, moguće je ‘mapirati’ motor i na osnovu faktora snage, statorskog napona i frekvencije tabelarno izračunati klizanje [A26]. U ovim metodama ne postoji povratna sprega pri estimaciji brzine i greška se znatno uvećava sa promenom parametara motora. U [A27] je predloženo merenje statorske otpornosti prilikom zaustavljenog pogona i korišćenje procenjene temperature motora kao dodatnog ulaza tabele za izračunavanje klizanja. Sve metode ove grupe obezbeđuju robustan rad motora i primenom limitera porasta referentne brzine prigušuju prirodno oscilatorni odziv asinhronog motora. Iako imaju značajne mane, veoma loš dinamički odziv i moguću veliku stacionarnu grešku u ostvarenoj brzini, ove metode i dalje pokrivaju značajan deo tržišta *shaft-sensorless* pogona sa asinhronim motorom.

Uvećanje propusnog opsega regulacione konture momenta se postiže primenom metoda za estimaciju brzine rotora na osnovu jednačina stanja. Ove metode zasnovane su na diferencijalnim jednačinama stanja asinhronog motora. Korišćenjem terminalnih veličina može se proceniti vektor statorskog ili rotorskog fluksa, čije se komponente dalje koriste za direktno izračunavanje učestanosti statorskog polja i klizanja rotora [A28], [A29] i [A30]. Na osnovu ovih veličina indirektno se računa brzina rotora. Korišćenjem statorskog fluksa i struja, kao i promene rotorskog fluksa, moguće je direktno računati brzinu rotora [A31]. Zasnovane na dinamičkim jednačinama, ove metode imaju dobre dinamičke karakteristike i predstavljaju početak korišćenja asinhronog motora bez senzora u pogonima relativno visokih performansi. Naravno, usled nepostojanja povratne sprege u proceni brzine, ove metode su i dalje veoma osetljive na promenu parametara motora. Pri malim brzinama se uvećava i osetljivost rezultata na grešku procene terminalnih napona.

Brzinu rotora je moguće proceniti i na osnovu MRAS principa [A32]. MRAS sistem koristi dva modela sa različitim strukturama ali koji na izlazu procenjuju istu promenjivu stanja motora. Model čija procena odabrane promenjive stanja ne zavisi od brzine rotora se uzima za referentni. Model čiji rad i izlazni rezultat zavisi od brzine rotora uzima se kao adaptivni. Greška između dva izlaza se koristi za korekciju procenjene brzine i samim tim i korekciju rada adaptivnog modela. Schauder [A33] predlaže danas veoma popularnu procenu brzine rotora na osnovu dva redukovana modela za procenu rotorskog fluksa. Implementacija ove metode je veoma jednostavna i nalazi primenu u *sensorless* pogonima u *cost-critical* aplikacijama. Referentni model je naponski estimator rotorskog fluksa koji za procenu koristi samo terminalne veličine i nije zavistan od brzine rotora. Strujni model rotorskog fluksa sadrži rotorsku brzinu kao parametar i iskorišćen je kao adaptivni model. Greška u uglu između procenjenih flukseva koristi se kao *tuning* signal ‘parametra’ brzine rotora i koriguje

rad adaptivnog modela. Ukoliko se MRAS koristi u kombinaciji sa IFOC procenom položaja rotorskog fluksa orijentacija polja je tačna i u slučaju nepravilno podešenog parametra vremenske konstante rotora. Parametri koji mogu narušiti pravilnu orijentaciju polja pri radu ovog estimatora su otpornost statora i ekvivalentna induktivnost statora. Uticaj greške u statorskoj otpornosti postaje veoma značajan pri malim brzinama rada i dovodi do nestabilnosti u radu estimatora. Greška u ekvivalentnoj induktivnosti statora remeti rad estimatora na isti način nezavisno od frekvencije napajanja, ali ovaj uticaj se menja sa opterećenjem. Uticaj greške u parametru vremenske konstante rotora takođe postoji, i ogleda se u pogrešno procenjenoj brzini rotora. Schauder predlaže estimaciju ova tri kritična parametra sistema pri zaustavljenom pogonu. Koristi se stacionarno ili pulsaciono polje, koja ne proizvode momenat i pogon ostaje zaustavljen. Ipak, jednom podešen parametar vremenske konstante rotora nije optimalno koristiti tokom rada pogona. Wang i Levi u [A34] analiziraju stacionarni i prelazni režim rada MRAS estimatora brzine sa rotorskim fluksom kao promenljivom stanja za različite kombinacije greške korišćenih parametara. U radu je prikazana tabela u kojoj je predstavljen relativni značaj greške u svakom od parametara na rad MRAS sistema. Da bi se izbegli pomenuti problemi, MRAS observer brzine u kome se poredi elektromotorna sila indukovana u namotajima statora predložen je u [A35]. Pri proceni ove promenjive stanja nema potrebe za integracijom terminalnih napona i time je omogućena primena MRAS observera i pri relativno malim brzinama. Limit brzine i dalje postoji i ogleda se u zavisnosti referentnog modela od temperaturno promenjive statorske otpornosti. Ovaj problem je rešen MRAS modelom zasnovanim na reaktivnoj snazi [A35] koji vektorskim proizvodom elektromotorne sile i struje statora uspeva da potpuno eliminiše parametar statorske otpornosti iz jednačina referentnog modela. Oba metoda izbegavaju integraciju, ali pri proceni veličina koriste diferenciranje statorskih struja, što pri praktičnoj implementaciji može dovesti do pojačanog uticaja mernog šuma. Nadalje, sve tri predložene MRAS metode i dalje čine značajnu grešku pri proceni brzine rotora ukoliko koriste netačan parametar vremenske konstante rotora.

Za razliku od MRAS, prošireni Luenbergov observer (PLO) koristi motor kao referenti model i time radi sa zatvorenim povratnom spregom. Kubota u [A36] koristi potpuni adaptivni observer rotorskog fluksa i statorskih struja. Ulaz observera je mereni statorski napon dok se greška procenjenih strujama statora koristi za korektivno dejstvo. U slučaju pogona bez senzora brzina rotora se dodatno procenjuje u adaptivnoj šemi koja radi u paraleli sa PLO. Ova šema koristi grešku u statorskim strujama i procenjeni rotorski fluks pri računu adaptivnog dejstva. Iako komponente rotorskog fluksa nisu, ovako procenjena brzina rotora jeste zavisna od parametra vremenske konstante rotora. Osnovni problem pri radu ovog adaptivnog observera i dalje ostaje parametar otpornosti statora za koji Kubota predlaže adaptivni šemu. U [A37] isti autor predlože način podešavanja pojačanja observera takav da observer ostaje stabilan i pri regenerativnom modu rada motora i malim brzinama. Radi daljeg poboljšanja kontrole reversa motora predlaže se i način za izbegavanje korišćenja nulte statorske učestanosti. Autori u [A39] koriste PLO u kome su rotorska brzina i opterećenje smatraju sporopromenljivim i usvajaju kao promenjive stanja. Ovim je eliminisana zavisnost procenjene brzine rotora od opterećenja.

Sliding mode observer rotorskog fluksa se pokazuje kao mnogo robusniji na promenu parametara motora i predložen je u [A40]. Efekat kompenzacionog dejstva rada observera se uvećava korišćenjem *sliding mode* kontrole (visoko frekventni nelinearni prekidački kontroler). U [A41] autori predlažu strukturu *sliding mode* observera fluksa i struja baziranu na strujnom modelu asinhronog motora i čija procena veličina ne zavisi od greške u parametru vremenske konstante rotora. U odabranoj strukturi observera taj parametar je ugrađen u *sliding* mod funkcije i u jednom dostignutom stacionarnom stanju nema uticaj na rezultat. Dalja procena fluksa je čista integracija *sliding* funkcije i robustna je na grešku pomenutog

parametra. Problem pri proceni fluksa i dalje nastaje upravo usled korišćene integratora i da bi se poboljšala stabilnost uvodi se mala povratna sprega. Da bi se dobio potpuni observer, koristi se slična adaptivna šema kao kod PLO u kojoj se brzina rotora procenjuje na osnovu greške struja i procenjenih vrednosti komponenti fluksa rotora. Autori pokazuju da je procenjena brzina zavisna od parametra rotora ali da rad sistema ostaje stabilan i ne smatraju da je *on-line* identifikacija T_r potrebna.

Procena brzine rotora je moguća i primenom proširenog Kalmanovog filtra [A42] i [A43]. Kalman filter je observer linearnog sistema koji poseduje takva pojačanja koja minimizuju varijansu kvadrata greške u proceni stanja. Da bi se ovaj observer primenio na nelinearnom modelu asinhronog motora neophodno je model linearizovati u okolini radne tačke. Pošto parametri linearizovanog sistema sada zavise od brzine rotora ona se uzima kao dodatni parametar (u sistemu sa senzorom) ili stanje koje treba proceniti (*sensorless* sistem). Na osnovu ovog proširenja u slučaju *sensorless* koristi se ime prošireni Kalman filter. Ulazi ovog modela su i dalje napon jednosmernog međukola i merene struje statora. Osnovni problem pri implementaciji ovog rešenja je neophodnost intezivnog i preciznog računa u svakoj periodi rada. Time je primena ovog filtra ograničena na relativno skupe *floating-point* DSP procesore.

Procena brzine rotora korišćenjem dvoslojne neuralne mreže i bazirana na *back propagation* tehnici predložena je u [A44]. Proces učenja neuralne mreže bi se sastojao u poređenju procenjenih i željenih stanja pogona i povratnom spregom te greške bi se podesili težinski koeficijenti mreže. U [A45] Bose predlaže *feedforward* neuralnu mrežu koja koristi terminalne veličine kao ulaze i procenjuje fluks, momenat i brzinu rotora.

Procena brzine rotora se može izvršiti na osnovu efekta anizotropije, tj. prostorno raspodeljene varijacije magnetnog otpora [A46]. Jedan od razloga nastanka ovog efekta je konačan broj žljebova statora i rotora čime se izaziva promena magnetizacije i rasipne induktivnosti. Detekcija anizotropije služi za detekciju položaja dok se račun njene promene koristi za procenu brzine rotora.

Brzinu rotora je moguće i indirektno meriti na osnovu žljebnih harmonika u statorskom naponu ili struji. Žljebovi na površini statora i rotora asinhronog motora pri okretanju rotora izazivaju žljebne harmonike fluksa u međugvožđu koji se prenose i na statorski napon i struju. Amplituda ili učestanost ovih harmonika se mogu iskoristiti za indirektnu procenu brzine rotora. Praktičnije je koristiti učestanost ovih spektralnih komponenti jer amplituda zavisi i od veličine rotorske struje i raznih drugih faktora. Ove komponente statorskog napona (ili struje) je moguće izdvojiti od osnovnog harmonika jednostavnim sabiranjem sve tri fazne veličine. Nadalje, FFT transformacijom ili PLL (*phase locked loop*) petljom je moguće proceniti učestanost i indirektno proceniti brzinu rotora [A47], [A48]. Precizna procena frekvencije žljebnog harmonika je moguća samo u *steady-state* stanju, tako da u [A49] Jiang i Holtz koriste preko harmonika u statorskom naponu izračunatu brzinu samo za korekciju rada modela rotorskog kola. Ove metode su neosetljive na promenu parametara modela motora i mogu imati minimalnu grešku u stacionarnoj vrednosti brzine. Ipak ove metode imaju značajne nedostatke kao što su nepovoljni dinamički odziv, velika količina izračunavanja neophodna za detekciju učestanosti žljebnih harmonika kao i potreba za poznavanjem broja žljebova korišćenog asinhronog motora.

1.2.3. Pregled literature iz oblasti procene parametara rotora asinhronog motora bez davača položaja

Identifikacija vremenske konstante rotora u toku rada pogona bez davača položaja je veoma složen problem i do sada predložena rešenja su daleko od potrebnog. Informacija o brzini rotora nije više prisutna i procena parametra nedostupnog rotorskog kola mora da se vrši bez iste. Problem identifikacije se uvećava usled činjenice da se *shaft-sensorless* pogon uobičajeno koristi u *cost-critical* primenama. Umanjenje cene pogona zahteva optimalni izbor asinhronog motora pri kome se maksimalno koristi mogući opseg radnih temperatura. Ovim se dozvoljavaju velike ekskurzije temperature rotora i samim tim velike varijacije rotorske konstante. Problem usložnjava i izbor DSP ili mikroprocesora u ovim pogonima koji uobičajeno nema dovoljno procesorske memorije i snage za izvršenje velikog broja algoritama pomenutih u 1.2.1. Konačno, postoji i pitanje motiva rešavanja ovog problema, stabilnost *sensorless* pogona nije narušena greškom u rotorskim parametrima, greška se javlja samo u ostvarenoj brzini rotora i često se toleriše relativno širokim specifikacijama.

Kao i u slučaju pogona sa davačem, inicijalna vrednost parametara vremenske konstante rotora se može proceniti u zaustavljenom pogonu utiskivanjem pulsacione struje u d osu [A33]. Ovaj test signal ne izaziva promenu momenta i pogon ostaje u stanju mirovanja. Procena je MRAS tipa, porede se fluks procenjen na izlazima naponskog i strujnog modela ($\omega_r = 0$), i parametar vremenske konstante se koriguje.

U toku rada pogona, varijacija parametra vremenske konstante rotora uglavnom nastaje usled promene temperaturno zavisne otpornosti rotora kao i usled promene u induktivnosti rotora usled promene nivoa saturacije. Dok je promena temperature rotora karakterizovana sa relativno velikom vremenskom konstantom, nagla promena induktivnosti rotora je moguća prilikom prelazaka u režim rada pogona sa slabljenjem polja. Levi u [A53] predlaže modifikovani MRAS estimator u kome se nivo saturacije magnetnog fluksa u mašini prati i čiji se rad kompenzuje *on-line*. Ali, da bi se rad pogona bez davača na vratilu potpuno kompenzovao i brzina tačno procenila, neophodno je uvažiti oba pomenuta efekta i proceniti ukupnu vrednost parametra vremenske konstante rotora. Poznato je da je simultana procena brzine rotora i parametara rotorskog kola veoma teška, i postaje potpuno nemoguća pri stacionarnom stanju IFOC pogona [A50]. Za pogon bez davača na vratilu u stacionarnom stanju je moguće jednoznačno proceniti samo odnos rotorske vremenske konstante i učestanosti klizanja rotora. Da bi se ove veličine simultano procenile, promena stanja u pogonu (promena u fluksu rotora) je neophodna.

Jiang i Holtz u [A49] koriguju rotorsku vremensku konstantu na osnovu merene učestanosti viših žljebnih harmonika. Učestanost ovih harmonika se može precizno izdvojiti samo u stacionarnom stanju i ovako dobijena informacija o brzini rotora nije korisna pri zatvaranju povratne sprege. Sa druge strane, ista informacija se može iskoristiti za procenu vremenske konstante rotora. Adaptivni mehanizam koriguje parametar rotora na osnovu razlike stacionarne vrednosti klizanja proračunate na osnovu učestanosti žljebnih harmonika i na izlazu modela rotorskog kola. Ovim se ujedno i eliminiše glavni uzrok za grešku u proceni stacionarne vrednosti brzine rotora i koriguje rad modela rotorskog kola. Autori pokazuju da je adaptivni mehanizam dovoljno brz i da omogućuje čak i korekciji greške u parametru vremenske konstante rotora nastalu pri naglim ulascima pogona u režim slabljenja polja.

Usled nemogućnosti da pri stacionarnom stanju razdvoji grešku u procenjenoj brzini od greške u procenjenom parametru rotorskog kola Kubota [A38] predlaže korišćenje dodatnog test signala. Test signal se utiskuje u direktnu komponentu vektora statorske struje. Predloženi signal poseduje dve dovoljno udaljene spektralne komponente i time je omogućena procena parametra za sve vrednosti učestanosti napajanja. Slično predlaže Tajima u [A52], sa razlikom

da se utiskuje prostoperiodični test signal. Učestanost signala se bira tako da postoji jedinstvena veza između amplitude harmonika struje d ose i rotorske otpornosti. Tada se na osnovu greške između merene i procenjene komponente struje magnećenja jednostavnim zakonom upravljanja koriguje parametar rotorske otpornost.

Korišćenje test signala utiče na rad pogona i nije zadovoljavajuće rešenje za procenu rotorske konstante rotora. Bez utiskivanja test signala, u pogonu bez senzora na vratilu, simultana procena brzine i parametra rotora je moguća samo tokom prelaznog režima. Tokom prelaznog režima rotorski fluks nije konstantan i ostvara se mogućnost za procenu T_r . Upravo ovo je iskorišćeno u [A50] pri proceni vrednosti rotorske otpornosti primenom metode najmanjih kvadrata. Algoritam za korekciju R_r prestaje sa radom kada ulaz u vidu skalarnog proizvoda procenjenih vektora struja i fluksa rotora postane nula. Ovim se detektuje stacionarno stanje, u kome dva vektora postaju ortogonalna, i procenjena vrednost parametra se zadržava do sledećeg prelaznog procesa. Autori nadalje predlažu način promene pojačanja algoritma sa promenom nivoa signala na ulazu. Ukoliko bi pojačanje ostalo konstantno, u zavisnosti od veličine signala tokom tranzijenta dolazilo bi ili do velikih osilacija vrednosti procenjenog parametra ili sa druge strane veoma spore konvergencije algoritma. U radu je takođe pokazano da u slučaju kratkotrajnih tranzijenata parametar vremenske konstante rotora ne konvergira ka tačnoj vrednosti ali i da se greška svakako umanjuje. Potreba za promenom stanja motora, i neophodna neaktivnost algoritma između tranzijenata čine da ova metoda i dalje ne predstavlja rešenje koje se traži.

Navedeni radovi pokazuju da je problem automatske procene parametara asinhronog motora i dalje aktuelan. Posebno su interesantni parametri nepristupačnog rotorskog kola. Konačan cilj je realizacija električnog pogona sa asinhronim motorom visokih performansi koji za svoj rad koristi minimalan broj senzora i sposoban je automatski da se adaptira nepoznatom motoru kao i promeni režima i uslova rada.

1.3. Kratak sadržaj i organizacija rada

Predmet naučne rasprave u ovom radu je procena parametara rotora asinhronog motora u pogonu sa i bez davača položaja na vratilu. Pogon je u oba slučaja kontrolisan algoritmom indirektno vektorske kontrole. U slučaju pogona sa davačem na vratilu mereni položaj rotora se koristi pri računu položaja vektora fluksa rotora kao i pri proceni brzine rotora. U slučaju pogona bez davača na vratilu, brzina rotora se prvo procenjuje MRAS metodom, zatim se ista koristi za račun položaja rotora i rotorskog fluksa. Oba pomenuta načina kontrole asinhronog motora imaju ozbiljan nedostatak usled velike osetljivosti na grešku u parametru vremenske konstante rotora. U pogonu sa senzorom koji radi sa pogrešnom vrednošću parametra rotora dolazi do narušavanja statičkih i dinamičkih karakteristika pogona. U pogonu bez davača statičke karakteristike nisu narušene greškom u ovom parametru. Greške u radu *sensorless* pogona se ipak javlja i nastaje usled pogrešno procenjene brzine rotora.

Da bi se ovi problemi prevazišli u ovoj tezi su predložena originalna rešenja za procenu vremenske konstante rotora u pogonu sa i bez davača položaja na vratilu. Prvo je pokazano da informacija za procenu ovog parametra postoji u vezi između malih signala inherentno prisutnih u pogonu. U cilju daljeg istraživanja režima malih signala izgrađeni su odgovarajući linearizovani modeli oba tipa pogona. Ovi modeli su poslužili i za analizu osetljivosti linearnih veza između malih signala na grešku parametra rotora. Kao rezultat ove analize su potvrđene zavisnosti funkcije prenosa momenta i rezidualne greške MRAS estimatora brzine na grešku u parametru rotorskog kola. Predloženi mehanizmi za identifikaciju i korekciju

parametra vremenske konstante rotora koji koriste ove zavisnosti su prvo ispitani putem računarskih simulacija a zatim i potvrđeni na eksperimentalnom pogonu.

Rad se sastoji iz 10 poglavlja, spiska literature i priloga.

U drugom poglavlju prvo je prikazan matematički model asinhronog motora. Zatim se model sužava na pogon sa strujno regulisanim naponskim inverterom i IFOC strukturom upravljanja. Za ovu vrstu pogona se diskutuje mogućnost umanjenja reda modela nakon ostvarene strujne regulacije kao i nakon proračuna klizanja vršenog u modelu rotorskog kola.

U trećem poglavlju analiziran je uticaj odstupanja parametra vremenske konstante rotora na statičke karakteristike pogona sa IFOC strukturom. Za pogon sa greškom u ovom parametru analitički su dati izrazi za osetljivost stacionarnih vrednosti komponenti fluksa rotora kao i razvijenog elektromagnetnog momenta na pojavu greške u parametru rotorskog kola. Pokazano je da je moguća greška u ustaljenim vrednostima svih pomenutih veličina veoma značajna i da se ne može ignorisati.

Četvrto poglavlje rada se bavi dinamičkim ponašanjem IFOC pogona. Za potrebe ove analize je prvo načinjen linearizovani model za male signale. Jedna od važnih parcijalnih funkcija prenosa ovog modela je linearizovana funkcija prenosa momenta čiji se parametri menjaju kako sa promenom radne tačke tako i sa promenom u vremenskoj konstanti rotora. Osetljivost njenih parametara, položaja polova kao i fazne karakteristike na promenu u vremenskoj konstanti rotora je detaljno analizirana.

Mehanizam za procenu vremenske konstante rotora predložen u petom poglavlju je rezultat analize malih signala date u četvrtom poglavlju. Predloženi mehanizam za identifikaciju parametra rotorskog kola se zasniva na identifikaciji parametara pretpostavljene funkcije diskretnog prenosa momenta. Procena ovih parametara na osnovu odabranih malih signala zadatog i ostvarenog momenta je detaljno objašnjena. Jednom poznati parametri imenioca ove funkcije se mogu na više načina iskoristiti za indirektan račun stvarne vrednosti vremenske konstante rotora. U radu je iskorišćena jednostavna veza između prvog parametra imenioca ove funkcije i stvarne vrednosti vremenske konstante rotorskog kola. Ovaj parametar nije osetljiv na promenu stacionarne radne tačke kao ni na tokom prikupljanja podataka korišćenu vrednost parametra rotorskog kola. Rad ovog algoritma za identifikaciju je delimično potvrđen putem računarskih simulacija na dinamičkom nelinearnom modelu pogona uz podešene različite radne tačke i utisnute različite test signale. Ovim putem je ujedno ispitan i uticaj amplitude i spektra determinističkog signala zadatog momenta na rad algoritma.

Šesto poglavlje se bavi *sensorless* pogonima. Posebna pažnja je data pogonu sa IFOC strukturom u kome se brzina rotora računa po MRAS principu sa vektorom rotorskog fluksa kao korišćenom promenljivom stanja. Pokazani su osnovni principi pri izgradnji MRAS observera brzine i diskutovane eventualne mane istog kao i problemi primene. Na kraju poglavlja je data analiza osetljivost ovog tipa pogona u momentom režimu rada kao i u režimu regulacije brzine rotora na promenu parametra rotora asinhronog motora.

U sedmom poglavlju je modelovan režim malih signala MRAS observera brzine. Model je linearizovan u okolini stacionarne radne tačke uz ustaljenu vrednost brzine rotora koja u opštem slučaju može biti različita od zahtevane. Ovaj model za male signale podrazumeva da pogon koristi isti parametar vremenske konstante rotora u adaptivnom modelu MRAS observera kao i u modelu rotorskog kola u kome se vrši proračun klizanja. Model dozvoljava da ovaj parametar nije u skladu sa stvarnom vrednošću. Time je omogućeno istraživanje uticaja greške pomenutog parametra na dinamiku malih signala. Model takođe uvažava zatvorenu povratnu spregu u estimatoru brzine i modeluje funkcije spregnutog prenosa. Model je potvrđen putem računarskih simulacija poređenjem njegovog izlaza sa malim promenama izlaza dinamičkog modela *sensorless* pogona.

Osmo poglavlje predstavlja novi algoritam za procenu vremenske konstante rotora. Algoritam se zasnova na korelaciji malih promena u q komponenti struje statora i malih promena u izvodu greške MRAS estimatora brzine. Ideja za ovaj algoritam nastaje usled pretpostavke da su propusni opseg mehaničkog dela pogona kao i propusni opseg MRAS observera brzine ograničeni. Korišćenjem ove dve pretpostavke je pokazano da male promene greške MRAS observera na relativno visokim učestanostima zavise isključivo od promena u struji q ose statora. Konačan predloženi mehanizam izdvaja komponente ova dva signala u određenom opsegu učestanosti čime ograničava i gornju učestanost korišćenih malih signala i umanjuje uticaj šuma na rezultat.

U devetom poglavlju su prikazani eksperimenti kojima je izvršena verifikacija predloženih algoritama za identifikaciju parametra rotorskog kola. Poglavlje je podeljeno u tri celine.

Prvo je dat opis eksperimentalne opreme i korišćenih algoritama u pogonu sa i bez davača brzine. Svi eksperimenti su vršeni na *low-cost* pogonu namenjenom za rad u aparatima za domaćinstvo. Pogon poseduje DSP sa veoma malo procesorske memorije i računarske snage tako da je algoritam vektorske kontrole bilo neophodno uprostiti i prilagoditi ovom pogonu. U poglavlju je detaljno opisana realizacija diskretnog MRAS estimatora brzine.

U drugom delu devetog poglavlja je data potvrda rada algoritma za procenu vremenske konstante rotora na osnovu rezidualne greške MRAS observera brzine. Prilikom potvrde robustnosti algoritma ispitani su različiti mali signali u pogonu i korišćene različite radne tačke. Rezultati ispitivanja osetljivosti predloženog korektivnog mehanizma na promenu ostalih parametara MRAS observera su takođe prikazani.

Treći deo se bavi procenom vremenske konstante rotora na osnovu funkcije prenosa momenta. Dat je opis eksperimenata, način na koji su prikupljeni i obrađivani podaci i prikazani su konačni rezultati. Rad algoritma je testiran na skupu odbiraka koji su prikupljeni u toku rada pogona sa i bez utisnutog test signala u q struju statora. Takođe je uzeto u obzir da prilikom prikupljanja podataka za identifikaciju vremenske konstante rotora pogon može da radi sa različitim vrednostima tog istog parametra.

Deseto poglavlje predstavlja zaključno poglavlje teze.

Jedanaesto poglavlje sadrži spisak korišćene stručne literature.

U Dodatku je dat spisak parametara motora korišćenog prilikom eksperimenata.