

НАЗИВ ФАКУЛТЕТА Факултет техничких наука

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

-обавезна садржина- свака рубрика мора бити попуњена

(сви подаци уписују се у одговарајућу рубрику, а назив и место рубрике не могу се мењати или изоставити)

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ
<p>1. Датум и орган који је именовao комисију 2013-10-31, бр. 012-72/13-2012, Декан Факултета техничких наука на предлог Наставно научног већа ФТН</p> <p>2. Састав комисије са знаком имена и презимена сваког члана, звања, назива уже научне области за коју је изабран у звање, датума избора у звање и назив факултета, установе у којој је члан комисије запослен:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. др Бранко Докић, редовни професор, уно Енергетска електроника, 01.12.1995., Електротехнички факултет, Универзитет у Бања Луци, Бања Лука. 2. др Веран Васић, редовни професор, уно Енергетска електроника, машине и погони, 14.04.2011., Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, Нови Сад. 3. др Дарко Марчетић, ванредни професор, уно Енергетска електроника, машине и погони, 23.02.2012., Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, Нови Сад. 4. др Никола Челановић, ванредни професор, уно Енергетска електроника, машине и погони, 12.07.2012., Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, Нови Сад 5. др Владимир Катић, редовни професор, уно Енергетска електроника, машине и погони, 30.10.2002., Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, Нови Сад.
II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ
<p>1. Име, име једног родитеља, презиме: Евгеније, Милан, Ацић</p> <p>2. Датум рођења, општина, држава: 18.11.1981., Суботица, Србија</p> <p>3. Назив факултета, назив студијског програма дипломских академских студија – мастер и стечени стручни назив Факултет техничких наука, Електротехника и рачунарство, Енергетика, електроника и телекомуникације, дипломирани инжењер електротехнике и рачунарства</p> <p>4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија -</p> <p>5. Назив факултета, назив магистарске тезе, научна област и датум одбране: Факултет техничких наука, „Управљање пуно-управљивим претварачем у погону ветроелектрана у случају пропада мрежног напона“, Електротехника и рачунарство, 29.09.2007.</p>
<p>6. Научна област из које је стечено академско звање магистра наука: Електротехника и рачунарство</p>

III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Регулисани погон асинхроног мотора са минималним бројем сензора

IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Навести кратак садржај са назнаком броја страна, поглавља, слика, шема, графикона и сл.

Докторска дисертација кандидата мр Евгенија Ацића је прегледно и јасно изложена у седам поглавља:

- 1) Увод
- 2) Погон асинхроног мотора без сензора брзине ротора на бази мерења терминалних струја
- 3) Погон асинхроног мотора са реконструкцијом струја мотора
- 4) Експериментална поставка
- 5) Експериментални резултати
- 6) Закључак
- 7) Литература

Разматрано је унапређење рада погона са асинхроним мотором код кога је број сензора сведен на минимум, односно само један сензор струје који мери струју међукола погонског инвертора. Кључни резултати тезе се огледају у разоткривању грешке у реконструисаним облицима фазних струја мотора које се добијају мерењем струје међукола конвенционалном методом, и која је у досадашњој релевантној литератури била игнорисана. Карактеристично изобличење реконструисаних фазних струја доводи до лошијег квалитета и слабијих перформанси целокупног управљачког алгорита. Стога су предложене две нове технике реконструкције фазних струја мотора које ефикасно елиминишу поменути грешку и изобличење реконструисаних струја, и које остварују боље карактеристике управљања брзином обртања мотора са повратном спрегом само по струји међукола. Оба предложена решења су верификована коришћењем емулятора у реалном времену по принципу хардвера у петљи (*HIL*), и на развијеном лабораторијском моделу претварача за погон асинхроног мотора снаге 1,1 kW. Управљачки алгоритам је реализован на развојној платформи са *TMS320F2812 DSP* процесором.

Дисертација је написана на 193 стране А4 фомата, садржи 7 поглавља, 140 слика, 10 табела и 93 цитата из домаће и стране литературе.

V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Предмет научне расправе у овом раду јесте унапређење алгорита управљања асинхроним мотором у условима када је број сензора који се користи у погону минималан. Број сензора који се користи у повратној спрези управљачког алгорита сведен је на само један струјни сензор који мери струју једносмерног међукола погонског инвертора. Примена конвенционалне методе реконструкције потребних фазних струја мотора у векторски регулисаним погонима, показује значајно лошији квалитет и слабије перформансе у односу на погоне са директним мерењем фазних струја. Ово је последица грешке у реконструисаним облицима фазних струја, чији је узрок детаљно објашњен у дисертацији. Грешка се одражава на повећање осцилација момента и брзине мотора, које у условима када су регулатори струја и брзине подешени на оптималан начин могу довести до нестабилног рада мотора. У раду су предложена два оригинална решења за унапређење конвенционалне методе реконструкције, која елиминишу поменути грешку и доприносе бољим карактеристикама управљања. Резултати су верификовани коришћењем *HIL* емулятора енергетске електронике и лабораторијског прототипа погона са асинхроним мотором, где је предложени управљачки алгоритам реализован на савременој *DSP* развојној платформи. Рад је изложен у седам поглавља.

Прво поглавље саржи уводна разматрања везана за управљање брзином асинхроног мотора без давача положаја и брзине на вратилу. Дат је опсежан преглед литературе из области процене брзине обртања ротора, са посебним освртом на реконструкцију фазних струја које захтевају алгоритми без давача положаја и брзине и са само једним сензором струје једносмерног међукола погонског инвертора. Преглед литературе указује да је проблем реконструкције углавном посматран

са аспекта остваривања високе поузданости рада погона, али не и са становишта оствареног квалитета и перформанси управљања. Ово је главни разлог који је определио примену конвенционалне методе реконструкције у погонима умерених и средњих перформанси.

У другом поглављу је дат преглед алгоритма векторског управљања асинхроним мотором са и без сензора положаја и брзине на вратилу, и који користи директно мерене фазне струје као сигнале повратне спреге. Приказана је метода која је коришћена за процену брзине обртања ротора на основу математичког модела мотора, и поступак за подешавање параметара различитих регулатора и естиматора у оквиру целокупног управљачког алгоритма. На тај начин су дефинисани оквири у којима су испитана предложена решења управљања са повратном спрегом само по струји једносмерног међукола.

У трећем поглављу је изложен проблем управљања асинхроним мотором у условима када се користи струја једносмерног међукола као једини сигнал повратне спреге. Дефинисан је алгоритам за поуздано читање струје међукола, који омогућава прибављање два одбирка струје и у критичним ситуацијама као што су врло мали индекс модулације и прелазак референтног вектора напона између сектора. Показано је да примена конвенционалне методе реконструкције која прибавља два одбирка струје међукола у тачно дефинисаним тренуцима када се линијске струје рефлектују у њој, у комбинацији са секвенцом активних вектора напона инвертора (*SVPWM*), доводи до карактеристичне грешке и изобличења реконструисаних фазних струја. Појава грешке у реконструисаним струјама је детаљно анализирана и разоткривена на оригиналан начин. Предложена су два решења која елиминису поменуту грешку, где се прво решење ослања на математички модел посматране појаве, док друго решење примењује интелигентну шему одабирања и модификације управљачких *PWM* сигнала.

У четвртном поглављу је дат опис експерименталне поставке коју је аутор посебно развио за проверу предложених шема управљања асинхроним погоном. Експериментална поставка се састоји из два дела: развијеног лабораторијског прототипа трофазног инвертора за погон асинхроног мотора снаге 1,1 kW и савремене *HIL* поставке за коју је прилагођен исти контролер као код првог система, али за директно прикључење на одговарајуће *HIL* конекторе. Овакав начин је омогућио безбедно и детаљно испитивање предложених алгоритама на *HIL* систему у почетној фази развоја, а потом и на стварном прототипу погона без потребе за изменом контролера и управљачког програма.

Претходна аналитичка разматрања су праћена експерименталним резултатима у петом поглављу. Приказана је упоредна анализа стационарног и динамичког одзива струја, електромагнетног момента и брзине асинхроног мотора, у истим радним режимима када су коришћене мерене и реконструисане фазне струје по конвенционалној и предложеним методама реконструкције. Поред ових резултата, извршена хармонијска анализа остварених струја мотора при примени различитих метода реконструкције, потврђује бољи квалитет и карактеристике предложених метода управљања. Додатно је ефикасност прве предложене методе реконструкције доказана у оквиру алгоритма управљања мотором снаге 1 kW на индустријском погону намењеном за примену у веш машинама, а чије је резултате аутор објавио у врхунском међународном часопису.

У шестом поглављу су изведена закључна разматрања, као и могући правци будућих истраживања у истој области.

Седмо поглавље садржи списак коришћене референтне литературе. Приказано је 93 цитата из литературе који су адекватно цитирани у раду.

VI СПИСАК НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КОЈИ СУ ОБЈАВЉЕНИ ИЛИ ПРИХВАЋЕНИ ЗА ОБЈАВЉИВАЊЕ НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ РАДА НА ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ

Таксативно навести називе радова, где и када су објављени. Прво навести најмање један рад објављен или прихваћен за објављивање у часопису са ISI листе односно са листе министарства

надлежног за науку када су у питању друштвено-хуманистичке науке или радове који могу заменити овај услов до 01. јануара 2012. године. У случају радова прихваћених за објављивање, таксативно навести називе радова, где и када ће бити објављени и приложити потврду о томе.

- 1) **E. M. Adžić**, M. S. Adžić, V. A. Katić, D. P. Marčetić, N. L. Čelanović, „Development of High-Reliability EV and HEV IM Propulsion Drive With Ultra-Low Latency HIL Environment,” *IEEE Transaction on Industrial Informatics*, USA, ISSN 1551-3203, Vol. 9, No. 2, pp. 630-639, May 2013. – **M21 (IF₂₀₁₂=3,381)**
- 2) D. P. Marčetić, **E. M. Adžić**, „Improved Three-Phase Current Reconstruction for Induction Motor Drives With DC-Link Shunt,” *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, USA, ISSN 0278-0046, Vol. 57, No. 7, pp. 2454-2462, July 2010. – **M21 (IF₂₀₁₀=3.481)**
- 3) V. Porobić, **E. Adžić**, D. Marčetić, „High Speed Shaft Sensorless DFOC Induction Motor Drive with Field Angle Correction,” *International Review of Electrical Engineering / IREE*, ISSN 1827-6660, Vol. 6, No. 4, pp. 1664-1674, 2011, - **2010. M22 (IF₂₀₁₀=1.364), od 2011. nema IF.**
- 4) **E. Adžić**, Z. Ivanović, M. Adžić, V. Katić, „Optimum Fuzzy Logic Control of Induction Generator in Wind Turbine Application,” *Acta Polytechnica Hungarica - Journal of Applied Sciences*, Hungary, ISSN 1785-8860, Vol. 6, No. 1, pp. 131-149, 2009. – **od 2010. M23 (IF₂₀₁₀=0.284)**
- 5) **E. Adžić**, N. Čelanović, "New Hardware-in-the-Loop Platform for Rapid Development of High-Reliability EV and HEV Propulsion Drives", *Bodo's Power Systems - Electronics in Motion and Conversion*, ISSN 1863-5598, pp. 42-45, Nov. 2011, **M51**
- 6) **E. Adžić**, M. Adžić, V. Porobić, Z. Ivanović, V. Katić, „Reliable Line Current Reconstruction for AC Motor Drives Using a DC-Link Sensor,” *17th International symposium on Power Electronics – Ee 2013*, Novi Sad: 30 Oct.-1 Nov., 2013, pp. T2-2.8 1-5, ISBN 978-86-7892-550-4 – **M33**
- 7) J. Poon, E. Chai, I. Čelanović, A. Genić, **E. Adžić**, „High-Fidelity Real-Time Hardware-in-the-Loop Emulation of PMSM Inverter Drives,” *IEEE Energy Conversion Congress & Expo - ECCE 2013*, USA, Denver: 15-19 Sept., 2013 – **M33**
- 8) V. B. Porobić, **E. M. Adžić**, D. P. Marčetić, „Performance Evaluation of Field Angle Correction Scheme for High Speed Sensorless IM,” *15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2012)*, Serbia, Novi Sad: 4-6 Sept., 2012, pp. LS4b-1.3-1 - LS4b-1.3-6, ISBN 978-1-4673-1970-6 – **M33**
- 9) **E. Adžić**, M. Adžić, D. Marčetić, Z. Ivanović, N. Čelanović, „Improved Three-Phase Current Reconstruction Using Single Current Sensor Technique,” *16th International Symposium on Power Electronics – Ee 2012*, Serbia, Novi Sad: 26-28 Oct., 2011, pp. SpS-1.4 1-4, ISBN 978-86-7892-355-5. - **M33**
- 10) **E. Adžić**, V. Porobić, D. Marčetić, „Algoritam slabljenja polja vektorski upravljanoг асинхронног мотора погодан за погоне у домаћинству,” *9. Међународни научно-стручни симпозијум INFOTEH-JAHORINA*, ISBN 99938-624-2-8, Ref. A-13, pp. 65-69, Jahorina: 17-19 mart, 2010. – **M63**
- 11) V. Porobić, D. Marčetić, **E. Adžić**, „Sensorless induction motor drive in high speed range - some aspects of digital implementation,” *9. INDEL Symposium on Industrial Electronics*, ISBN 978-99955-46-03, Banja Luka: 4-6 novembar, 2010 - **M63**

VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

У оквиру ове докторске дисертације аутор је разматрао проблеме који се јављају приликом управљања асинхроним мотором када је број сензора ограничен и сведен на само један струјни

сензор који мери струју једносмерног међукола погонског инвертора. Показао је да примена конвенционалне методе реконструкције фазних струја не остварује задовољавајући квалитет и перформансе управљања. Стога је предложио две нове технике реконструкције фазних струја које постижу боље карактеристике управљања.

Узрок проблема јесу изобличења реконструисаних фазних струја мотора, настала услед саме природе методе која прибавља одбирке струје међукола у различитим тренуцима у односу на средину прекидачког циклуса. Одбирци се прибављају онда када се фазне струје рефлектују у струји међукола, па нису сведени на исти тренутак. Показано је да ова чињеница у комбинацији са карактеристичном секвенцом напонских вектора за SVPWM модулатор доводи до појаве наглих промена вредности реконструисаних струја два пута у току њихове основне периоде. Присуство изобличења у оригиналном подручју се рефлектује у стационарном и синхроно-ротирајућем домену у којем се реализује векторско управљање. Карактеристични облици реконструисаних фазних струја доводе до израженог присуства трећег и шестог хармоника у ротационим (dq -) компонентама фазних струја. Хармоници струја се простиру кроз целокупну регулациону структуру, тако да осцилације d -струје доводе до осцилација магнетног флукса, а осцилације q -струје до осцилација електромагнетног момента мотора. Заједно доводе до повећаних осцилација брзине ротора и нестабилнијег понашања мотора у устаљеном стању, поготово у случају када су регулатори струја и брзине оптимално подешени.

Такође је показано да неједнако изобличење реконструисаних таласних облика струја у позитивној и негативној полупериоди, зависно од нивоа оптерећења и фазног става фазне струје у односу на напон, доводи до појаве офсета (*offset*) и грешке појачања у систему за “мерење” (реконструкцију) струја. У dq - управљачком систему присуство офсета фазних струја доводи до појаве основног хармоника, док присуство грешке појачања доводи до појаве другог хармоника у сигнаlima dq -струја и електромагнетног момента који у устаљеном стању идеално треба да узимају константне вредности.

Због свих поменутих разлога предложена су два нова решења реконструкције фазних струја, чији је циљ поред очувања стабилности и поузданости рада, коришћење методе реконструкције без потребе за филтрима струја вишег реда који треба да елиминирају настале више хармонике. Стандардно решење примене филтара dq -струја мотора са ниским пропусним опсегом, захтева да се параметри струјних и брзинског регулатора прилагоде и значајно ослабе што доводи до лоше динамике погона.

Прво решење, које комбинује робусну измену поворке прекидачких сигнала ради поузданог прибављања струје међукола и примену математичког модела асинхроне машине, коригује очитане одбирке са процењеним вредностима одступања од средње вредности. Уведена корекција своди реконструисане вредности на исти временски тренутак са средине прекидачког циклуса. На тај начин се добијају реконструисане струје код којих је елиминисана фазна грешка и које у затвореној повратној регулационој петљи успешно смањују осцилације остварених струја, електромагнетног момента и брзине мотора. Ефикасност методе је проверена како у устаљеним тако и у прелазним стањима машине. Хармонијска анализа остварених струја мотора у опсегу нижих учестаности, показала је да је вредност појединачних хармоника смањена до четири пута, а збирно и до три пута у односу на случај када је примењена конвенционална метода. Хармонијски садржај је приближно идентичан случају када су као сигнали повратне спеге коришћене мерене фазне струје мотора. Додатно је показано да у недостатку алгоритма за адаптацију контролних параметара модела, примена предложеног решења реконструкције одржава стабилност рада погона који користи минималан број сензора.

Друго решење избегава примену математичког модела машине, и за реконструкцију фазних струја користи специфичну шему одабирања струје међукола укупно четири пута у оквиру два суседна прекидачка циклуса, и прилагођени начин померања прекидачких сигнала како би се одржала поузданост одабирања. Усредњавањем по два одбирке струје међукола могуће је реконструисати средње вредности фазних струја и елиминисати фазну грешку. Показано је да метода на успешан начин доводи осцилације струја, електромагнетног момента и брзине мотора на

прихватљиву меру. На тај начин реконструисане струје по предложеној методи представљају ефикасну замену стварним фазним струјама мотора, без потребе за коришћењем додатних филтара струје у управљачком алгоритму.

Да би потврдио предложене методе управљања аутор је развио лабораторијски прототип погона са асинхроним мотором снаге $1,1 \text{ kW}$. При томе је посебно обратио пажњу на модуларну изведбу система како би већина елемената могла да се искористи и у другим применама енергетске електронике. Аутор је израдио и прилагодио исти контролер за директно повезивање на савремени *HIL (hardware-in-the-loop)* емулатор уређаја енергетске електронике, који је омогућио безбедно и детаљно испитивање предложених метода управљања у различитим радним режимима мотора. Ефикасност методе је додатно потврђена на индустријском погону асинхроног мотора снаге 1 kW намењеног за примену у веш машинама. Већ развијено векторско управљање са само струјом међукола у повратној спрези је надограђено првом предложеном методом реконструкције фазних струја мотора, при чему добијени резултати и у том случају показују боље карактеристике целокупног управљања.

Даљи правци истраживања могли би бити усмерени на испитивање предложених метода реконструкције фазних струја у оквиру различитих алгоритама за управљање асинхроним мотором без давача положаја и брзине ротора. Понашање предложених метода би требало проверити и у случајевима када постоје адаптивни механизми за подешавање контролних параметара модела машине. Аутор види као један од могућих праваца и примену предложених принципа реконструкције фазних струја у другим апликацијама као што су управљање синхроним мотором са перманентним магнетима и претвараčem повезаним на мрежу.

VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА

Експлицитно навести позитивну или негативну оцену начина приказа и тумачења резултата истраживања.

Резултати добијени истраживањем у оквиру ове докторске дисертације су изведени, приказани и анализирани применом математичких модела, симулација и одговарајућих експеримената. Сва аналитичка разматрања у раду праћена су одговарајућим експерименталним резултатима. Коришћењем савремене домаће и стране литературе кандидат је дао свеобухватан преглед ставова и досадашњих резултата из разматране области. Самостално је израдио лабораторијски прототип трофазног претварача за проверу предложених шема управљања. Применио је и најсавременију технологију хардвера-у петљи (*HIL*), развијену на Факултету техничких наука, а у чијем развоју је активно учествовао и сам кандидат. На крају, јасно је истакнут допринос добијених резултата у оквиру истраживања проблематике управљања асинхроним мотором у погону са минималним бројем сензора, односно ове докторске дисертације.

Комисија констатује да начин приказа и тумачења резултата истраживања у потпуности одговара карактеру проблема који се у овој докторској дисертацији решавају.

IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Експлицитно навести да ли дисертација јесте или није написана у складу са наведеним образложењем, као и да ли она садржи или не садржи све битне елементе. Дати јасне, прецизне и концизне одговоре на 3. и 4. питање:

1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме
Дисертација је у потпуности написана у складу са планом и образложењем које је наведено у пријави тезе.

2. Да ли дисертација садржи све битне елементе
Докторска дисертација садржи све битне елементе у складу са пријавом тезе. Урађен је детаљан преглед литературе, извршена детаљна анализа и синтеза решења проблема, симулација, експеримент и верификација експерименталних резултата.

3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци
У дисертацији је разоткривен узрок изобличења реконструисаних струја у примени конвенционалне методе управљања погоним асинхроног мотора са повратном спрегом само по струји једносмерног међукола. Предложена су два оригинална решења реконструкције фазних струја која ефикасно елиминишу изобличење без примене ниско-пропусних филтара струје. Оба решења остварују стабилан и поуздан рад погона, уз значајно побољшање квалитета и преформанси управљања. Оцењујући докторску дисертацију кандидата, Комисија закључује да је кандидат одговорио на постављене циљеве. Кандидат је оригинални допринос дисертације исказао кроз објављивање низа радова у међународним и домаћим часописима и конференцијама.

4. Недостаци дисертације и њихов утицај на резултат истраживања
Докторска дисертација нема недостатака који би битније утицали на коначан резултат истраживања.

X ПРЕДЛОГ:

На основу укупне оцене дисертације, Комисија предлаже Наставно-научном већу Факултета техничких наука и Сенату Универзитета у Новом Саду да прихвате докторску дисертацију под насловом “ Регулисани погон асинхроног мотора са минималним бројем сензора ”, а кандидату мр Евгенију Ацићу одобре јавну одбрану.

ПОТПИСИ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ

Др БРАНКО ДОКИЋ, редовни проф., Електротехнички факултет, Бања Лука, уно.: Енергетска електроника, члан-председник

Др ВЕРАН ВАСИЋ, редовни проф., Факултет техничких наука, Нови Сад, уно.: Енергетска електроника, машине и погони, члан

Др ДАРКО МАРЧЕТИЋ, ванредни проф., Факултет техничких наука, Нови Сад, уно.: Енергетска електроника, машине и погони, члан

Др НИКОЛА ЧЕЛАНОВИЋ, ванредни проф., Факултет техничких наука, Нови Сад, уно.: Енергетска електроника, машине и погони, члан

Др ВЛАДИМИР КАТИЋ, редовни проф., Факултет техничких наука, Нови Сад, уно.: Енергетска електроника, машине и погони, члан -ментор