

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Марка Росића

Одлуком Научно-наставног већа бр. 796 одржаној 23.02.2016 године (број одлуке 5022/08-3 од 01.03.2015. године), именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Марка Росића под насловом

**„Редукција таласности код директне контроле момента асинхроног мотора  
применом компаратора са више нивоа“**

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са Кандидатом, Комисија је сачинила следећи

### РЕФЕРАТ

#### 1. УВОД

##### 1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

- 10.12.2008. године кандидат Марко Росић је уписао докторске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду;
- 03.03.2015. године кандидат Марко Росић је пријавио тему за израду докторске дисертације;
- 31.03.2015. године Комисија за студије трећег степена разматрала је предлог теме за израду докторске дисертације и предлог Комисије о оцени подобности теме и кандидата упутила Наставно–научном већу на усвајање;
- 29.04.2015. године Наставно-научно веће именовало је Комисију за оцену подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације (Одлука бр. 5022/08-1);
- 20.10.2015. године Наставно-научно веће усвојило је Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације Веће научних области техничких наука дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације. (Одлука бр. 5022/08-2).
- 23.11.2015. године Веће научних области техничких наука дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације (Одлука бр. 61206-5182/2-15).
- 11.02.2016. године докторска дисертација је предата на преглед и оцену;

- 17.02.2016. Комисија за студије трећег степена потврдила је испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације;
- 23.02.2016. Наставно-научно веће Факултета на седници бр. 796 именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације (Одлука бр. 5022/08-3 од 01.03.2015. године) у следећем саставу:  
 Др Милан Бебић, доцент, Електротехнички факултет у Београду,  
 Др Слободан Вукосавић, редовни професор, Електротехнички факултет у Београду,  
 Др Борислав Јефтенић, редовни професор, Државни универзитет у Новом Пазару,  
 Др Александар Ракић, доцент, Електротехнички факултет у Београду,  
 Др Мирослав Бјекић, ванредни професор, Факултет техничких наука у Чачку,

По истеку законског рока за завршетак докторских академских студија, на захтев студента, одобрено је продужење рока за завршетак ових студија за још два семестра, сагласно члану 92. став 4 Статута Универзитета у Београду, као и додатно продужење за годину дана на основу Одлуке бр. 24-06/18-2008/5022.

### 1.2. Научна област дисертације

Дисертација кандидата Марка Росића припада научној области Техничке науке – Електротехника, ужа научна област Енергетски претварачи и погони за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду. За ментора докторске дисертације одређен је др Милан З. Бебић изабран у звање доцента за исту научну област и који испуњава услове прописане за менторе на докторским студијама.

### 1.3. Биографски подаци о кандидату

Марко Росић рођен је у Прибоју 31.07.1984. године где је завршио основну и средњу електротехничку школу смер Енергетика. У току школовања више пута је награђиван за постигнуте успехе на такмичењима из области електротехнике.

После завршене средње школе 2003. год. уписао је Технички факултет у Чачку смер Електротехника одсек Електроенергетика. У петој години студија ангажован је на факултету као студент демонстратор за извођење вежби из предмета Основе електротехнике. Дипломски рад одбранио је у септембру 2008. год. са оценом 10 (просечна оцена у току студија 9,34). Више пута је награђиван за најуспешнијег студента и најуспешнијег дипломираног студента на смеру Електротехника.

По завршетку основних студија, од октобра 2008. год., почиње да ради на Техничком Факултету у Чачку као сарадник у настави. У новембру 2009. године изабран је у звање асистент на Техничком факултету у Чачку (сада Факултет Техничких наука Чачак) где и данас ради. У току педагошког рада на факултету учествовао је у извођењу рачунских и лабораторијских вежби из следећих предмета: Електричне машине 1, Електричне машине 2, Енергетски трансформатори, Асинхроне машине, Регулација електромоторних погона, Пројектовање помоћу рачунара, Релејна заштита и Техника високог напона.

Област интересовања кандидата су електричне машине и регулација електромоторних погона. У претходним годинама учествовао је у реализацији неколико домаћих и

међународних научно-истраживачких пројеката. Аутор је 38 научних и стручних радова објављених у међународним и домаћим часописима и скуповима, 3 техничка решења, једног практикума, једне збирке задатака, и једног поглавља у монографији. За рад објављен на домаћој конференцији ЕТРАН 2013 год. награђен је наградом за најбољег младог истраживача.

## 2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација написана је на српском језику, има 144 стране и садржи 59 слика и 11 табела. Дисертација садржи 6 поглавља, листу коришћене литературе и прилоге:

1. Увод
2. Математички модел асинхроне машине и методе управљања
3. Директна контрола флуksа и момента асинхроног мотора
4. Директна контрола момента са вишеструким напонским векторима
5. Експериментална верификација предложеног алгорита и анализа резултата
6. Закључак
7. Литература
8. Прилози

Дисертација у прилозима садржи и кандидатову изјаву о ауторству, изјаву о коришћењу као и изјаву а истоветности штампане и електронске верзије докторског рада.

### 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У **уводном поглављу** дат је хронолошки преглед и ток историје развоја електромоторних погона са моторима наизменичне струје. Описан је разлог и потреба преузимања примата у погонима са машинама за једносмерну струју од стране погона са машинама за наизменичну струју. У наставку је дат преглед релевантне литературе у области директне контроле момента машине наизменичне струје. Дат је преглед историјског тока развоја овог типа управљања са најважнијим предностима и недостацима. Преглед литературе дат је хронолошки и подељен према карактеристикама погона са директном контролом момента. Потом је изнет критички осврт на референтну литературу. У овом делу дата су ауторова запажања и предлози за решавање недостатака у области директне контроле момента као и мотив и правац истраживања у овој области. Преглед садржаја и структуре дисертације је на крају уводног поглавља.

**Друго поглавље** односи се на математички модел асинхроне машине и методе управљања асинхроним мотором. Најпре је изведен комплетан динамички модел асинхроне машине са потребним трансформацијама, а потом дата заменска шема асинхроног мотора. Потом је дат основни опис и подела метода контроле асинхроног мотора према типу и карактеристикама управљања. Затим следи преглед метода естимације флуksа и момента машине као битног сегмента управљачких алгоритама код машина наизменичне струје. Моделом погонског

претварача и прегледом метода генерисања напона импулсно ширинском модулацијом завршава се друго поглавље.

**Треће поглавље** даје опис основних принципа и начина функционисања алгоритама директне контроле момента. Најпре је описан принцип конвенционалне методе директне контроле момента асинхроног мотора, а потом алгоритам директне контроле момента са дискретним просторним напонским векторима.

У **четвртном поглављу** дат је предлог алгоритма који користи напонске векторе дискретизованих интензитета у циљу редукације таласности (рипла) момента. Описан је принцип, предности и недостаци предложеног алгоритма. У наставку је описана структура и дефиниција вишестепених компаратора момента који омогућавају избор одговарајућих напонских интензитета. Потом је дата анализа утицаја брзине на одзив момента код директне контроле момента са прекидачким табелама односно са дискретним напонским векторима и предлозима за компензацију овог утицаја. Поглавље се завршава упоредном анализом симулационих резултата одзива момента релевантних алгоритама директне контроле момента и њихово међусобно поређење.

**Пето поглавље** резервисано је за експерименталну верификацију предложеног алгоритма директне контроле момента. Најпре је дат опис експерименталне поставке коришћене за испитивање и прикупљање резултата. У наставку је дата анализа добијених експерименталних резултата без компензације утицаја брзине са анализом карактера естимираног момента код предложеног алгоритма са дискретизованим напонским интензитетима. Потом је описан коришћени метод за вишеструко паралелно узорковање и процесирање у циљу добијања прецизнијих резултата за таласност момента и његову каснију обраду. Кориштећи добијене резултате вишеструког узорковања дата је анализа резултата естимираног момента са и без компензације утицаја индукване електромоторне силе као и анализа степена искоришћења напона и брзине одзива момента код предложеног алгоритма. Најзначајнији резултати експерименталне верификације са анализом степена редукације таласности момента код предложеног алгоритма у зависности од броја дефинисаних дискретизованих напонских интензитета дат је на крају овог поглавља.

**Шесто поглавље** ове дисертације сумира закључке до којих се дошло у истраживању. Најпре су истакнути доприноси дисертације, а потом наглашени будући правци рада на испитивању и даљем усавршавању предложеног алгоритма директне контроле момента.

Након закључка наведен је преглед литературе коришћене при изради ове дисертације.

На крају рада су прилози који употпуњују текст ове дисертације као што су подаци о конкретно реализованом погону, мерној апаратури, коришћеној алгоритамској структури и прегледом наслова табела и слика које су наведене у раду.

### **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

#### **3.1. Савременост и оригиналност**

Знатан део научне литературе посвећен је алгоритмима управљања машинама за наизменичну струју. Развој ових алгоритама и елиминисање постојећих недостатака представља посебан акценат савремених научних расправа. Директна контрола момента

(DTC – *Direct Torque Control*) као најмлађа техника управљања од свог настанка па до данас претрпела је велики број модификација у циљу смањења таласности (рипла) момента. Ове модификације успешно смањују вредност интензитета рипла момента на једној страни док на другој страни неретко подразумевају и смањење брзине одзива момента мотора, захтевају сложене естиматоре флуksа и прорачуне који продужавају време извршавања алгоритма чиме се нарушавају карактеристике погона.

Главни предмет расправе докторске дисертације представља анализа таласности (рипла) момента код DTC алгоритма са дискретним напонским векторима и предлог алгоритма који треба да омогући знатно смањење таласности момента. Предложени алгоритам настоји да очува добре карактеристике конвенционалне DTC као што су одсуство компликованих прорачуна и PI регулатора и брз одзив момента карактеристичан за DTC алгоритме који користе прекидачке табеле. Оригиналноста дисертације огледа се у предложеном алгоритму који има могућност дефинисања и брзе промене броја примењених дискретизованих напонских интензитета без потребе за дефинисањем нових прекидачких табела. Посебан акценат стављен је на анализу таласности момента вишеструким узроковањем и паралелном естимацијом момента у циљу потврде смањења и прецизнијег одређивања интензитета таласности момента као и на анализу степена редукције рипла момента у зависности од броја дефинисаних напонских интензитета. Кандидат је предложио и начин за елиминисање утицаја индукване електромоторне силе (ЕМС) и презентово резултате утицаја селективне компензације ЕМС на брзину одзива момента код предложеног алгоритма.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У оквиру докторске дисертације кандидат је детаљно истражио постојећу референтну литературу из области дисертације и навео 161 референцу које су везане за обрађену тему. Литература је анализирана хронолошки кроз преглед стања и историју развоја области директне контроле момента чиме је постављена добра основа за рад и развој теме докторске дисертације.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У оквиру теоријске анализе, коришћењем општег математичког модела асинхроне машине у  $\alpha\beta$  координатном систему, проучен је узрок и детектовани чиниоци који утичу на интензитет рипла момента код DTC са дискретним напонским векторима. Утврђено је да на таласност момента првенствено утиче интензитет напонског вектора примењеног у оквиру прекидачког циклуса као и брзина мотора односно индуквана електромоторна сила. Утицај индукване електромоторне силе на инкременте момента у оквиру прекидачког циклуса анализиран је у зависности од брзине мотора. Као резултат, предложен је начин за компензацију утицаја индукване ЕМС која омогућава да рипл момента зависи само од примењених напонских интензитета. Уочени ефекат који индуквана ЕМС има на инкременте момента омогућио је предлог њене селективне компензације у циљу повећања брзине одзива момента на наглу промену референтне вредности.

При експерименталној верификацији предложеног алгоритма извршена је паралелна естимација флуksа и момента вишеструким узорковањем струја и напона код предложеног DVI-DTC алгоритма са вишеструким напонским интензитетима (*Discretized Voltage Intensities* DTC). Резултати добијени паралелном естимацијом потврђују смањење рипла

момента и омогућавају његово прецизније одређивање у зависности од броја дефинисаних напонских интензитета.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Предложени алгоритам омогућује значајно смањење таласности као и брз одзив момента код директне контроле момента са дискретним напонским векторима. Алгоритам је могуће применити у савременим електромоторним погонима намењеним управљању машинама наизменичне струје. Имплементација алгоритма не захтева никакве хардверске промене на постојећем управљачком систему, на инвертору, као ни на мотору већ само измене програмског кода управљачког ДСП система (Дигитални Сигнални Процесор). У односу на конвенционалну DTC трајање прорачуна код предложене DVI-DTC методе је незнатно дуже. Предложени алгоритам је услед својих малих прорачунских захтева погодан за примену на процесорима скромнијих перформанси који поседују јединицу за ширинску модулацију. Задржавање прорачунске једноставности омогућава да се остатак прорачунског времена у оквиру једног прекидачког циклуса искористи за прорачуне неопходне за даље побољшавање перформанси целокупног погона.

### 3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је у оквиру теме докторске дисертације објавио неколико научних радова од којих је једна публикација објављена у часопису са СЦИ листе са импакт фактором. Учешћем на међународним и домаћим научно-истраживачким пројектима у оквиру тимског и самосталног рада на истраживачким задацима кандидат је развио способност за квалитетан и плодноносан самосталан научни рад. Сечена теоријска знања у оквиру студија, а касније и у оквиру педагошког рада и рада у лабораторији омогућила су му лакоћу при истраживању, обезбеђивању и презентовању експерименталних резултата у оквиру докторске дисертације. Велики број публикованих радова у часописима, страним и домаћим конференцијама потврђује систематичност, упорност, креативност, самосталност, зрелост и способност кандидата да јасно изложи резултате свог научног рада и истраживања.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Основни допринос ове докторске дисертације представља развој алгоритма DTC на бази вишестепених компаратора момента који омогућава одговарајућу редукуцију таласности момента једноставним избором броја нивоа вишестепеног компаратора, односно броја дискретизованих напонских интензитета. Детаљнији опис доприноса дисертације и квалитета предложеног алгоритма може се сумирати на следећи начин:

- Предложен је алгоритам DTC са произвољним бројем дискретизованих напонских интензитета који омогућава знатно смањење таласности момента при константној прекидачкој фреквенцији.
  - Предложени DVI-DTC алгоритам карактерише прорачунска једноставност – обезбеђена је могућност промене броја интензитета примењених напонских

вектора на једноставан начин без измене структуре алгоритма и попуњавања нових прекидачких табела. Кориснику погона базираног на овом алгоритму омогућен је одабир броја жељених напонских интензитета у циљу одговарајуће редукције таласности момента. Промена броја напонских вектора не захтева дефинисање нове прекидачке табеле јер се у алгоритму користи распрегнут избор смера и интензитета напонског вектора.

- Задржане су добре карактеристике конвенционалне DTC. Алгоритам је изузетно једноставан и не поседује обртне трансформације и сложене математичке прорачуне. Извршавање прорачуна код DVI-DTC алгоритма је тек за 2-5% дужи него у случају код конвенционалне DTC која представља најједноставнији вид DTC контроле. Алгоритам се заснива на коришћењу компаратора у регулацији момента и флукса машине. Одсуство PI регулатора омогућава брз одзив момента мотора без ограничења пропусног опсега услед регулационих структура што је случај код DTC алгоритма са континуалним напонским векторима.
- Одређивање узрока и елиминисање утицаја брзине на статичку грешку момента – у алгоритму је извршена компензација утицаја брзине односно индуковане ЕМС на смањење момента и појаву статичке грешке. Овим је елиминисан утицај ЕМС на инкременте момента у току прекидачког циклуса. Елиминација индуковане ЕМС представља услов за тачније одређивање таласности момента у зависности од броја дефинисаних дискретизованих напонских интензитета у односу на таласност момента при постојању утицаја индуковане ЕМС.
- Извршена је анализа вишеструко узоркованих сигнала струја машине при раду са предложеним DVI-DTC алгоритмом и паралелна естимација флукса и момента са вишеструко узоркованим величинама. Резултати паралелне естимације момента добијених обрадом вишеструко узоркованих величина омогућили су да таласност момента буде прецизније одређена у зависности од броја дефинисаних напонских интензитета.

#### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Кандидат је анализирао постојеће методе DTC чији је циљ редукција таласности момента код алгоритма са дискретним напонским векторима. Методе засноване на комбинацији седам основних напонских вектора као и DTC са инверторима са више нивоа, иако смањују таласност момента, имају проблем са проширењем прекидачких табела за примену већег броја вектора у току прекидачког циклуса. Кандидат је дошао до закључка да би распрезање избора правца и смера напонског вектора довело до једноставнијег дефинисања и примене већег броја напонских интензитета. Предложен је алгоритам DTC са дискретизованим напонским интензитетима који знатно редукује таласност момента и омогућује једноставну промену броја дискретизованих напонских интензитета. Кандидат је анализирао утицај индуковане ЕМС на инкременте момента у оквиру прекидачког циклуса и предложио начин за елиминисање њеног утицаја. За разлику од досадашњих публикованих анализа таласности момента, методом паралелне естимације и процесирањем вишеструко узоркованих величина омогућена је анализа естимиране тренутне вредности момента у временском оквиру

прекидачког циклуса односно између два узастопна узорковања на ДСП систему. На овај начин, експерименталном верификацијом извршено је тачније одређивање таласности момента у зависности од броја дефинисаних напонских интензитета. У изради дисертације кандидат је применио научна знања стечена на досадашњим студијама, искуство у раду на досадашњим истраживањима у раду у лабораторији што му је омогућило да пружи мерљив научни допринос.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

У току свог досадашњег научно-истраживачког рада кандидат је био ангажован на неколико научних и стручних пројеката и при том публикувао више од 30 радова. У области која је уско везана са темом докторске дисертације кандидат је објавио неколико радова од којих су издвојени следећи:

##### Категорија М23:

1. **M. M. Rosic**, M. Z. Bebic, "Analysis of Torque Ripple Reduction in Induction Motor DTC Drive with Multiple Voltage Vectors," *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol. 15, no. 1, pp. 105-114, 2015, doi:10.4316/AECE.2015.01015 (**IF 0.642**)  
<http://www.aece.ro/abstractplus.php?year=2015&number=1&article=15>

##### Категорија М24:

2. **Rosić, M.**, Jeftenić, B., Bebić, M., "Reduction of Torque Ripple in DTC Induction Motor Drive with Discrete Voltage Vectors", *Serbian Journal of Electrical Engineering*, Vol. 11, No. 1, February 2014, pp.159-173, ISSN 1451-4869 DOI: 10.2298/SJEE131204014R  
[http://www.journal.ftn.kg.ac.rs/Vol\\_11-1/14-Rosic-Jeftenic-Bebic.pdf](http://www.journal.ftn.kg.ac.rs/Vol_11-1/14-Rosic-Jeftenic-Bebic.pdf)

##### Категорија М33:

3. **Rosic, M.**, Bebic, M., Djordjevic, N., Jeftenic, B., Bjekic, M., "Torque Ripple Reduction in DTC with Discretized Voltage Intensities" *18th International Symposium POWER ELECTRONICS Ee2015*, Paper No. DS1-T2-1, pp. 1-6, Novi Sad, Republic of Serbia, 28th - 30th October, 2015

##### Категорија М63:

4. **Росић, М.**, Јефтенић, Б., Бебић, М., „Анализа утицаја смањења рипла момента код ДТЦ са дискретним напонским векторима“, *ЕТРАН 2013. Зборник радова 57. Конференције за ЕТРАН*, Златибор, ЕЕ 2.1, 3-6 јуна 2013 – *рад награђен наградом „Најбољи рад младог истраживача“*

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата Марка Росића под насловом „Редукција таласности код директне контроле момента асинхроног мотора применом компаратора са више нивоа“ бави се анализом узрока таласности (рипла) момента и предлаже алгоритам са дискретним напонским векторима који у значајној мери редукује овај недостатак. Област примене предложеног решења односи се на алгоритме управљања који се примењују у савременим електромоторним погонима са машина наизменичне струје.



У оквиру докторске дисертације кандидат је применио оригиналан научни приступ у анализи таласности момента и предложио модификован алгоритам управљања мотором базиран на конвенционалном принципу директне контроле момента са дискретним напонским векторима. Предложени алгоритам директне контроле момента омогућава редукцију рипла (таласности) момента увођењем компаратора са више нивоа и одговарајућих вишеструких напонских интензитета. За разлику од раније објављених решења, предложени алгоритам има могућност примене одговарајућег броја напонских интензитета којим се остварује жељено смањење рипла, без измене прекидачке табеле. Објављивањем резултата својих истраживања у часопису међународног значаја, кандидат је показао способност за самосталан научни рад, а доприноси истраживања су добили адекватну потврду ваљаности.

На основу свега изложеног, узимајући у обзир научне доприносе докторске дисертације и способност кандидата за самостални научно-истраживачки рад Комисија сматра да дисертација испуњава све законске, формалне и суштинске услове као и све критеријуме који се примењују приликом вредновања дисертације.

Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под насловом **„Редукција таласности код директне контроле момента асинхроног мотора применом компаратора са више нивоа“** кандидата **Марка Росића**, прихвати, изложи на јавни увид и упуту на коначно усвајање Већу области техничких наука Универзитета у Београду како би се одобрила јавна усмена одбрана.

#### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

У Београду,  
10.03.2016. године.



др Милан Бебић, доцент

Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Слободан Вукосавић, редовни професор

Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Борислав Јефтенић, редовни професор  
Државни Универзитет у Новом Пазару



др Александар Ракић, доцент

Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Мирослав Бјекић, ванредни професор

Универзитет у Крагујевцу – Факултет техничких наука Чачак