

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Богдана М. Брковића.

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета Универзитета у Београду бр. 5033/13-3 од 2. 7. 2020. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Богдана М. Брковића под насловом

**„Моделовање вишефазних асинхроних машина уважавајући утицај засићења магнетског кола“**

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

- 31.10.2013. године кандидат је уписао докторске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на модулу за Енергетске претвараче и погоне;
- 2. 5. 2019. године кандидат је пријавио тему за израду докторске дисертације;
- 7. 5. 2019. 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;
- 14. 5. 2019. године Наставно-научно веће је именовало је Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (одлука бр. 5033/13-1 од 23. 5. 2019. године) у саставу: др Драган Михаић, доцент (Електротехнички факултет), др Жарко Јанда, виши научни сарадник (Електротехнички институт Никола Тесла) и др Милан Илић, редовни професор (Електротехнички факултет);
- 17. 6. 2019. године кандидат је полагао јавну усмену одбрану теме;
- 9. 7. 2019. године Наставно-научно веће усвојило је Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (одлука бр. 5033/13-2 од 9. 7. 2019. године);
- Веће научних области техничких наука дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације (одлука бр. 61206-3132/2-19 од 26. 8. 2019. године);
- 11. 6. 2020. године кандидат је предао докторску дисертацију на преглед и оцену;
- 16. 6. 2020. године 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;

- Наставно-научно веће Факултета именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације (одлука бр. 5033/13-3 од 2. 7. 2020. године) у следећем саставу:
1. др Зоран Лазаревић, редовни професор, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет
  2. др Слободан Вукосавић, редовни професор, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет
  3. др Емил Леви, редовни професор, Liverpool John Moores University
  4. др Младен Терзић, доцент, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет
  5. др Ана Станковић, редовни професор, Cleveland State University

Кандидат Богдан М. Брковић започео је студијски програм 31. 10. 2013. године. 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.

### 1.2. Научна област дисертације

Дисертација кандидата Богдана М. Брковића припада научној области Техничке науке – Електротехника, ужа научна област Енергетски претварачи и погони, подобласт Електричне машине. За ментора при изради дисертације одређен је др Зоран Лазаревић, редовни професор Електротехничког факултета у Београду, због истакнутих доприноса у области Енергетских претварача и погона, а нарочито у области Електричних машина.

### 1.3. Биографски подаци о кандидату

Богдан М. Брковић је рођен 9. 2. 1990. године у Чачку, где је завршио основну школу и гимназију. Електротехнички факултет у Београду уписао је 2008. године. У току основних студија на Одсеку за енергетику, смер Електроенергетски системи, остварио је просечну оцену 9,86. Дипломирао је у јулу 2012. године. Ментор приликом израде дипломског рада био је проф. др Зоран Лазаревић. Награђен је од стране Електротехничког факултета као најбољи студент у својој генерацији на Одсеку за енергетику.

Мастер студије на Електротехничком факултету у Београду, модул Енергетски претварачи и погони, уписао је 2012. године. У периоду од уписа до јуна 2013. године положио је све испите са просечном оценом 10,00. У септембру 2013. године завршио је мастер студије одбраном мастер тезе под називом „Неуравнотежено напајање трофазних асинхроних мотора и једнофазни асинхрони мотори“. Ментор приликом израде мастер рада био је проф. др Зоран Лазаревић.

Од октобра 2013. године је студент докторских академских студија на Електротехничком факултету Универзитета у Београду на модулу Енергетски претварачи и погони. Положио је све испите предвиђене наставним планом и програмом докторских студија са просечном оценом 10,00.

Током основних и мастер студија био је стипендиста Града Чачка, Министарства просвете, науке и технолошког развоја и Фонда за младе таленте Републике Србије.

Од децембра 2012. до фебруара 2013. године био је запослен на Катедри за енергетске претвараче и погоне Електротехничког факултета Универзитета у Београду, у звању сарадника у настави. Од фебруара 2013. године је запослен као асистент на истој катедри. У том периоду био је ангажован на извођењу рачунских и лабораторијских вежби из већег броја предмета и учествовао је у изради великог броја дипломских радова и студентских пројеката.

Ангажован је на два пројекта Министарства просвете, науке и технолошког развоја. Учествовао је у изради две стручне студије. Аутор је четири рада у међународним часописима са SCI листе, седам радова на научним скуповима од међународног значаја и осам радова на научним скуповима од националног значаја.

## 2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под називом „Моделовање вишефазних асинхроних машина уважавајући утицај засићења магнетског кола“ представља оригинални научноистраживачки рад у области моделовања и идентификације параметара вишефазних асинхроних машина. У оквиру дисертације предложена је форма модела вишефазне асинхроне машине који узима у обзир засићење на путу главног флуksа и флуksа расипања, као и спрегу између ортогоналних равни. Развијене су и методе за идентификацију параметара предложеног модела. Верификација предложеног модела и метода за идентификацију параметара извршена је поређењем резултата симулације и експерименталних резултата.

Дисертација је написана на српском језику на 115 страна текста куцаног ћириличним писмом и садржи 58 слика, 7 табела, 150 једначина и 103 библиографске референце. Дисертација садржи и насловну страну на српском и енглеском језику, страну са подацима о ментору и члановима комисије, кратак резиме дисертације на српском и енглеском језику, садржај, седам тематских поглавља, преглед коришћене литературе и прилоге. Поглавља су организована у следећем редоследу: 1. Увод, 2. Математичко моделовање вишефазних машина, 3. Реализација прототипа и опис експерименталне поставке, 4. VSD модел 6ФААМ са уваженим ефектом засићења, 5. Одређивање параметара модела, 6. Верификација модела, 7. Закључак. Након прегледа коришћене литературе налази се поглавље са прилозима. На самом крају дисертације налазе се обавезни прилози: биографија и изјаве аутора.

### 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом, уводном поглављу, наведене су области примене и предности вишефазних машина у односу на традиционално коришћене трофазне машине. На основу прегледа расположиве литературе, установљено је да постоји потреба за формирањем модела вишефазних машина са уваженим утицајем засићења магнетског кола, као и за методама за одређивање параметара таквог модела. На крају уводног поглавља укратко је изложена структура докторске дисертације.

У другом поглављу дате су једначине модела асиметричне шестофазне асинхроне машине у фазном домену. Затим је описан поступак трансформације модела из фазног у распрегнути (VSD – *Vector Space Decomposition*) домен применом трансформација распрезања и ротације. Дате су једначине динамичког VSD модела и истакнуте су његове предности у односу на модел у фазним координатама. На крају поглавља дате су једначине VSD модела у устаљеном стању и приказана су одговарајућа еквивалентна кола.

У трећем поглављу дат је опис експерименталне поставке коришћене за потребе дисертације. Најпре је описан поступак пројектовања и реализације шестофазног намотаја у навојном простору постојеће трофазне асинхроне машине. При томе су истакнуте предности коришћења асиметричног шестофазног намотаја у односу на друге расположиве топологије. Затим је дат преглед осталих хардверских и софтверских компоненти поставке. Коначно, дат је приказ целокупне поставке уз јасно назначене везе између појединих елемената.

У четвртном поглављу предложена је формулација VSD модела који уважава засићење на путу главног флуksа и спрегу између ортогоналних равни. Најпре је описан FEM модел

коришћене асиметричне шестофазне асинхроне машине. Затим је, применом тог модела, анализиран ефекат спреге између ортогоналних равни при различитим вредностима струја у  $dq$  и  $xu$  равни (међураванско унакрсно засићење – МРУЗ). Овом анализом показано је да услед ефекта МРУЗ долази до смањења флуксева у обе равни, при чему је то смањење нарочито изражено у  $xu$  равни. С обзиром на то, установљено је да је потребно да се одговарајући негативни прираштаји флуксева уврсте у једначине за флуксеve VSD модела. У складу с тим, предложена је нова формулација VSD модела и формирана су одговарајућа еквивалентна кола за анализу устаљених стања у  $dq$  и  $xu$  равни.

У петом поглављу описане су методе за мерење параметара предложеног модела асиметричне шестофазне асинхроне машине. За мерење индуктивности магнећења предложена је нова метода, базирана на инјектирању једносмерне струје у намотаје машине при заустављеном ротору. Предложена метода је погодна због једноставности и ниске цене опреме потребне за њено извођење, могућности да се изведе код машина код којих звездиште није приступачно, као и због могућности примене без покретања машине. Примењивост и тачност методе најпре је утврђена аналитичким прорачунима. Закључци аналитичких разматрања додатно су потврђени FEM анализом, да би коначна верификација била спроведена експерименталним путем. Показано је да се применом предложене методе индуктивност магнећења може одредити са великом тачношћу, за широк опсег вредности струје магнећења, тј. за различите нивое засићења магнетског кола. У наставку поглавља описана је постојећа метода за мерење индуктивности расипања и отпорности намотаја и приказане су добијене вредности ових параметара. На крају поглавља предложена је метода за одређивање прираштаја флуксева који се јављају као последица МРУЗ. Добијене вредности прираштаја флуксева приказане су у функцији компоненти струја у  $dq$  и  $xu$  равни.

У шестом поглављу извршена је верификација предложеног модела и одговарајућих метода за идентификацију параметара поређењем резултата симулације и експерименталних резултата. Како би се демонстрирале предности предложеног у односу на постојеће моделе, приказани су и резултати модела са константним параметрима („линеарни модел“) и модела са уваженим засићењем индуктивности магнећења и расипања („засићени модел“). Анализа резултата извршена је за различите радне режиме. Најпре су приказани резултати који одговарају моторном режиму рада у устаљеном стању, при различитим вредностима напона у  $dq$  и  $xu$  равни и различитим оптерећењима. Применом предложеног модела остварени су резултати најблискији експерименталним, нарочито у условима када је магнетско коло засићено и када су истовремено присутне компоненте напона нападања у обе равни. Анализом прелазног процеса повећања напона у  $xu$  равни такође је показано да предложени модел даје резултате најприближније експерименталним. Додатна верификација извршена је и за режим самопобудног асинхроног генератора. Резултати добијени за процес самопобуђивања и за режим са несиметричним оптерећењем потврђују тачност предложеног модела и у генераторском режиму, за који је карактеристично веома изражено засићење магнетског кола.

У седмом поглављу сумирани су остварени резултати и изнети закључци до којих се дошло током истраживања приказаног у дисертацији. У овом поглављу истакнути су и остварени научни доприноси. На крају су дате смернице за будуће истраживање и могућа даља унапређења у овој области. На крају дисертације дато је поглавље са прилозима.

### **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

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

Докторска дисертација кандидата Богдана М. Брковића припада области вишефазних асинхроних машина, које постају све заступљеније у савременим апликацијама, као што су

електрична возила, обновљиви извори енергије и роботика. Применом вишефазних асинхроних машина остварује се већа поузданост и ефикасност рада у односу на традиционално коришћене трофазне машине, уз истовремено повећање густине снаге и момента. Смањење снаге по фази у односу на трофазне машине омогућава примену енергетских претварача са полупроводничким компонентама мањих називних снага, што чини вишефазне машине атрактивним избором за погоне великих снага. Значајан аспект у пројектовању, управљању и предикцији перформанси вишефазних машине јесте моделовање и идентификација параметара. С обзиром на то да добро искоришћење материјала предвиђа рад вишефазних машина у области засићења, неопходно је феномен засићења исправно уважити. Додатни степени слободе код вишефазних машина омогућавају трајни рад при несиметричном напајању и при испаду једне или више фаза. Због тога је неопходно да модел вишефазне машине обезбеди прецизност и у несиметричним радним режимима. У оквиру ове дисертације анализиран је феномен спреге између ортогоналних равни асиметричне шестофазне асинхроне машине која наступа при раду са неуравнотеженим напајањем и израженим засићењем магнетског кола (међураванско унакрсно засићење). Спроведена анализа показује утицај овог феномена на флуксеве машине у VSD домену. Крајњи резултат анализе је оригинални модел који укључује утицај засићења на путу главног флукса и флуксева расипања, као и ефекат међураванског унакрсног засићења. Оригиналноста тезе огледа се и у развоју две нове методе за мерење параметара – методе за мерење индуктивности магнетског инјектирањем једносмерне струје и методе за мерење прираштаја флуксева изазваних међураванским унакрсним засићењем. Предложени модел и методе су развијени на примеру асиметричне шестофазне асинхроне машине, али постоји потенцијал за њихову примену на друге типове вишефазних машина са произвољним бројем фаза.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде дисертације кандидат је извршио детаљан преглед релевантних библиографских извора из предметне области и коректно навео 103 референце уско повезане са обрађеном темом. Литература обухвата широк опсег доступних публикација који укључује књиге, монографије, публикације из часописа и зборника међународних и домаћих конференција и релевантне стандарде из области електричних машина. Велики део цитираних публикација је новијег датума, али су укључене и старије публикације које представљају значајан извор фундаменталних знања у вези са темом дисертације. У списку референци налазе се и радови на којима је кандидат први аутор или коаутор, а који садрже оригиналне резултате произишле из рада на дисертацији.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У решавању постављених проблема докторске дисертације и у остваривању дефинисаних циљева коришћене су следеће научне методе:

- Библиографска анализа постојећих модела и метода за идентификацију параметара засићених вишефазних асинхроних машина.
- Пројектовање и реализација намотаја асиметричне шестофазне асинхроне машине на постојећем магнетском колу. Намотај је пројектован у складу са препорукама у доступној литератури, руководећи се општим смерницама за пројектовање намотаја машина за наизменичну струју и уважавајући специфичности асиметричног шестофазног намотаја.
- Анализа феномена међураванског унакрсног засићења применом методе коначних елемената у циљу утврђивања зависности флуксева VSD модела од струја у ортогоналним равнима и формирање модела који на адекватан начин уважава засићење код асиметричне шестофазне асинхроне машине.

- Теоријска анализа методе за мерење индуктивности магнећења, уз детаљну анализу компоненти флуксева намотаја и расподеле поља унутар машине. За потребе ове анализе развијен је поједностављени модел магнетског кола машине.
- Анализа тачности методе за мерење индуктивности магнећења применом методе коначних елемената.
- Експериментална имплементација метода за идентификацију параметара на наменски формираној лабораторијској поставци.
- Рачунарска симулација на бази предложеног и постојећих модела асиметричне шестофазне машине применом софтверског пакета *Matlab*.
- Експериментална верификација резултата симулације на наменски формираној лабораторијској поставци.

На основу изложеног Комисија констатује да су примењене научне методе адекватне за решавање постављених проблема и да су резултовале остваривањем циљева докторске дисертације.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати приказани у овој дисертацији могу пронаћи вишеструку примену у области вишефазних машина. Предложени модел омогућава прецизнију симулацију рада машине у различитим динамичким и стационарним режимима, што је од значаја како у фази пројектовања, тако и у фази експлоатације машине. Применом овог модела могу се побољшати перформансе алгоритама за управљање машином, нарочито у погледу регулације струје у  $x$ у равни. Предложене методе за идентификацију параметара су од значаја за испитивање вишефазних машина, нарочито с обзиром на то да методе за испитивање вишефазних машина још увек нису стандардизоване. Нарочито атрактивна за примену код електромоторних погона је метода за мерење индуктивности магнећења, с обзиром на чињеницу да се она извршава при заустављеном ротору, што је захтев у многим реалним апликацијама.

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

На основу прегледане дисертације и комуникације са кандидатом, Комисија процењује да је кандидат Богдан М. Брковић показао способност за самостални научни рад, почев од систематичног прегледа постојеће научне литературе, преко уочавања практичних проблема у разматраној области и потребе за унапређењем постојећих модела и развојем нових метода за идентификацију параметара вишефазних машина, до реализације истраживања. Нарочито треба истаћи самостални рад кандидата на практичној реализацији и примени експерименталне поставке за испитивање вишефазне асинхроне машине. У прилог наведеном иде и чињеница да су резултати истраживања у оквиру дисертације публиковани у угледном међународном научном часопису и презентовани на једном националном и једном међународном научном скупу.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

У овој дисертацији остварени су следећи научни доприноси који представљају унапређење постојећег знања у области вишефазних електричних машина:

- Извршена је анализа утицаја међураванског унакрсног засићења (МРУЗ) на величине VSD модела асиметричне шестофазне асинхроне машине и предложен нови модел који овај ефекат узима у обзир модификацијом једначина за флуксе.
- Развијена је експериментална метода за одређивање прираштаја флуксева изазваних ефектом МРУЗ.
- Развијена је експериментална метода за одређивање индуктивности магнећења асиметричне шестофазне асинхроне машине.
- Формиран је VSD модел асиметричне шестофазне асинхроне машине који обухвата ефекат засићења магнетског кола на путу главног флукса и флуксева расипања, као и ефекат МРУЗ.

#### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Сагледавањем постављених хипотеза, циљева истраживања и остварених резултата, констатујемо да је кандидат успешно одговорио на све постављене дилеме и задатке. Наведени научни доприноси представљају значајно унапређење у областима моделовања и идентификације параметара вишефазних машина.

Анализа ефекта МРУЗ и добијени резултати пружају јаснији увид у специфичности вишефазних електричних машина у погледу засићења, узимајући у обзир утицај додатних степени слободе, тј. постојања компоненти струје у различитим равнима. Засићени VSD модел формиран у дисертацији омогућава анализу рада машине у радним режимима у којима је присутно засићење уз истовремено постојање несиметрије у напајању, што је од нарочитог значаја у режимима након појаве квара или код произвољне расподеле снаге између намотаја. Предложена метода за одређивање индуктивности магнећења омогућава да се овај параметар одреди уз примену врло једноставне опреме, при заустављеном ротору и без потребе за приступом звездишту, што су значајне предности у односу на постојеће методе. Потврда доприноса оствареног применом ове методе је публикација остварених резултата у часопису категорије M21. Метода за мерење прираштаја флуксева услед ефекта МРУЗ представља несумњив допринос, с обзиром на је, прегледом доступне литературе, утврђено да до сада није било покушаја да се овај ефекат квантификује.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси докторске дисертације кандидата Богдана М. Брковића верификовани су у следећим публикацијама (категоризовани према Правилнику Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије):

##### Категорија M21:

1. **Brkovic, B. M.**, Ristic, L. B., Terzic, M. V., Stankovic, A. V., Lazarevic, Z. M.: Magnetizing Inductance Determination in a Six-phase Induction Machine, - *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 34, no. 2, pp. 812-823, 2018 (IF=4.501) (ISSN 0885-8969)

##### Категорија M33:

1. Terzic, M., **Brkovic, B.**: Comparison between six-phase and three-phase high-speed drag-cup induction motor in terms of cup losses, - *5th International Symposium on Environment Friendly Energies and Applications (EFEA)*, Rome, Italy, 2018

##### Категорија M63:

1. Stanišić, S., **Brković, B.**, Ječmenica, M., Lazarević, Z.: Prošireni model šestofazne asinhronе mašine - *XVIII međunarodni simpozijum INFOTEH-JAHORINA*, Jahorina, 2019.

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

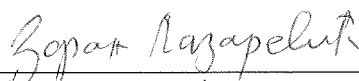
Докторска дисертација Богдана М. Брковића под насловом „Моделовање вишефазних асинхроних машина уважавајући утицај засићења магнетског кола“ испуњава све формалне и суштинске услове предвиђене Законом о високом образовању и прописима Универзитета у Београду и Електротехничког факултета.

Резултати дисертације представљају значајан допринос у области вишефазних електричних машина. Представљен је нови приступ за моделовање вишефазних асинхроних машина са уважавањем засићења магнетског кола. При томе је детаљно анализиран феномен међураванског унакрсног засићења, који је у овој дисертацији по први пут квантификован и укључен у једначине модела. Предложени модел погодан је за анализу рада вишефазне асинхроне машине у широком опсегу радних режима, укључујући и режиме са несиметричним напајањем. Развијена је и верификована нова метода за мерење индуктивности магнетске машине која омогућава једноставно и прецизно одређивање овог параметра који је кључан са аспекта моделовања засићења. Остварени резултати пружају основ за даља унапређења у областима управљања, испитивања и пројектовања вишефазних електричних машина.

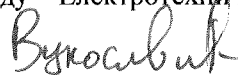
Имајући у виду наведене чињенице, Комисија предлаже Наставно-научном већу да се докторска дисертација под називом „Моделовање вишефазних асинхроних машина уважавајући утицај засићења магнетског кола“ кандидата Богдана М. Брковића прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 20. 8. 2020. године

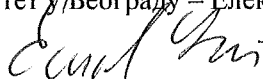
### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



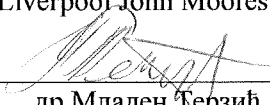
др Зоран Лазаревић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



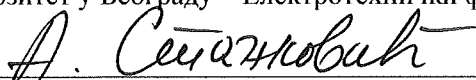
др Слободан Вукосавић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Емил Леви, редовни професор  
Liverpool John Moores University



др Младен Терзић, доцент  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Ана Станковић, редовни професор  
Cleveland State University