

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Подобност теме и кандидата Спасоја Мирића, мастер инж. електротехнике и рачунарства, за израду докторске дисертације „Метод за рачунарски ефикасну симулацију енергетских претварача заснован на моделу стања и суперпозицији прекидачких ефеката“.

Одлуком бр. 5029/13-1 од 20.06.2017. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Спасоја Мирића за израду докторске дисертације и научне заснованости теме „Метод за рачунарски ефикасну симулацију енергетских претварача заснован на моделу стања и суперпозицији прекидачких ефеката“.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

## ИЗВЕШТАЈ

### 1. Подаци о кандидату

#### 1.1. Биографски подаци

Спасоје Мирић је рођен 29.09.1989. године у Београду, од оца Милорада и мајке Верице. Основну школу је завршио у Белановици, а средњу школу у Лазаревцу. Био је одличан ученик. У основној школи је био носилац Вукове дипломе, а у средњој школи је био ђак генерације и добитник награде принца Александра Карађорђевића. Учествовао је на републичком такмичењу из Енергетске електронике и добио награду за освојено прво место.

На Електротехнички факултет у Београду уписао се као редован студент 2008. године. Дипломирао је септембра 2012. године на модулу за Енергетске претварааче и погоне. Остварио је одличну средњу оцену у току основних студија (9.62), а на дипломском је добио оцену 10. У четвртој години основних студија добио је Доситејеву стипендију из Фонда за младе таленте Републике Србије и примао је две године (до завршетка мастер студија). Као најбољи студент на групи предмета из електромоторних погона добио је награду фирме АББ и студијски боравак у Финској. Мастер студије на ЕТФ-у у Београду на модулу Енергетски претвараачи и погони уписао је 2012. године, а завршио августа 2013. године са просечном оценом 10. Из његовог мастер рада проистекао је научни рад под насловом “Drive in the Loop Simulation of Electrical Drives” који је реферисан на међународној конференцији 17<sup>th</sup> International Symposium on Power Electronics – Ee 2013.

Од почетка његових студија показао је интерес према практичном, стручном и научном раду што је било запажено од стране наставника, па је већ на другој години основних студија (2009. година) постао студент-сарадник (демонстратор) при лабораторији за Основе електротехнике. Његов рад је позитивно оцењен па је већ после годину дана постао главни демонстратор, коју дужност је обављао до 2016. године.

Ради проширења свог знања и ради оспособљавања за рад на телекомуникационим уређајима, децембра 2013. године уписао је интезиван CISCO курс (CCNA) при ЕТФ-у у Београду.

Школске 2013/2014. године је уписан као редован студент на докторске студије на ЕТФ-у у Београду, на модулу Енергетски претварачи и погони. У току прве две године докторских студија положио је све испите предвиђене наставним планом на докторским студијама. Од априла 2014. године, носилац је стипендије Министарства просвете, науке и технолошког развоја за докторске студије. Активно је укључен у пројекат ТР33020 истог Министарства под називом “Повећање енергетске ефикасности хидроелектрана и термоелектрана Електропривреде Србије развојем технологије и уређаја енергетске електронике за регулацију и аутоматизацију”.

Од јуна до децембра 2016. године је био гостујући истраживач у Институту за енергетску електронику (Power Electronic Systems Laboratory) на ЕТХ Цирих, а од децембра 2016. године је уписао докторске студије на истом факултету.

## 1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Спасоје Мирић је уписао докторске студије 2013. године на ЕТФ-у у Београду. Ментор за студијско истраживачки рад је др Милан Бебић, доцент ЕТФ-а. Кандидат је положио све испите предвиђене планом и програмом докторских студија, са просечном оценом 10:

1. назив: Прелазне појаве у електричним машинама  
наставник: Зоран Лазаревић
2. назив: Микропроцесорско управљање електромоторним погонима  
наставник: Слободан Вукосавић
3. назив: Енергетски претварачи  
наставник: Милош Недељковић
4. назив: Одабрана поглавља из енергетске електронике  
наставник: Предраг Пејовић
5. назив: Електромоторни погон као рационалан и квалитетан потрошач електричне енергије  
наставник: Милан Бебић
6. назив: Надгледање стања електричних машина у погону  
наставник: Зоран Лазаревић
7. назив: Увод у научни рад  
наставник: Зоран Поповић
8. назив: Интеграција електромоторних погона у сложене системе покретања и управљања  
наставник: Милан Бебић
9. назив: Математичко моделовање физичко-техничких процеса  
наставник: Братислав Иричанин
10. назив: Управљање енергетским претварачима  
наставник: Милош Недељковић

Током докторских студија, био је укључен у пројекат Министарства ТР33020, и његов допринос на овом пројекту је био кроз рад и менторство на Електротехничком институту Никола Тесла (ИНТ). Један део овог рада се односи на развијање метода за идентификацију параметара синхроног генератора, који се онда могу користити за контролу напона у мрежи, контролом реактивне снаге генератора (Q-V control). Кључни математички алати коришћени

у овом истраживању су Пронијева анализа (Prony Analysis) и Падеова апроксимација (Padé Approximation). Други део рада на ИНТ се односи на дијагностику стања асинхроних мотора велике снаге (реда MW). Циљ ове дијагностике је детектовати евентуално поломљене шипке у кавезу ротора. Кандидат је анализирао два приступа за детектовање квара: (1) анализа спектра улазне струје мотора и расипног флуksа и (2) анализа таласног облика улазне струје у временском домену користећи Веивлит трансформацију (Wavelet transform).

Ментор докторске дисертације (ментор) је др Предраг Пејовић, редовни професор ЕТФ-а. Кандидат је код ментора положио испит на докторским студијама (Одабрана поглавља из енергетске електронике, 9 ЕСПБ поена), из чега је произашао рад који је презентован на конференцији ЕТРАН 2015. године. Тема овог рада је анализа конвертора у устаљеном режиму рада, користећи се приступом у коме се прво одреде усредњени таласни облици напона и струја, па се онда, помоћу усредњених таласних облика, рачуна таласност. Даљи рад кандидата у овој области је да се метод генерализује како би могао да се примени за анализу транзијената у енергетској електроници, што је успешно одрађено у реферисано у публикацији у врхунском међународном часопису (категорија M21).

Од друге године основних студија (2009. година) постао студент-сарадник (демонстратор) при лабораторији за Основе електротехнике. Његов рад је позитивно оцењен па је већ после годину дана поста главни демонстратор, коју дужност је обављао и за време докторских студија, до 2016. године.

Дана 05.07.2017. године одржана је јавна усмена одбрана теме докторске дисертације на којој су били присутни чланови Комисије: др Слободан Вукосавић, редовни професор, дописни члан САНУ; др Жарко Јанда, виши научни сарадник и др Драган Милићев, редовни професор. Кандидат Спасоје Мирић је на овој одбрани добио оцену „задовољио“.

У наставку је списак објављених радова који показују афинитет кандидата за рад на предложеној теми.

#### Списак радова:

- Међународни часопис изузетних вредности, **M21a**
- 1. **Mirić S., Pejović P.: A Method for Computer-Aided Analysis of Differential Mode Input Filters**, - IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol 64, Issue 6, 2017, pp. 4741-4750, DOI: [10.1109/TIE.2017.2674584](https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2674584), ISSN **0278-0046**, **impakt faktor za 2016: 7.168**
- Међународни часопис, **M23:**
- 1. **Mirić S., Nedeljković M.: The Solar Photovoltaic Panel Simulator**, - Rev. Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg., Vol 60, No 3, 2015, pp. 273-281, ISSN: **0035-4066**, **impakt faktor za 2015: 0.524**
- Саопштење са међународног скупа штампано у целини, **M33:**
- 1. **Mihailović I., Mirić S., Bebić M., Jeftenić B.: Drive in the Loop Simulation of Electrical Drives**, - Proceedings of the 17th International Symposium on Power Electronics, Novi Sad 2013, ISBN: 9788678925511
- 2. **Janda Ž., Mirić S., Dragosavac J., Arnautović D., Radojčić B., Pavlović J.: Identification of Synchronous Generator and Excitation system Transfer Functions for Q-V Control Purpose**, Proceedings of the International Conference on Power Plants, Zlatibor 2014, ISSN 978-86-7877-024-1.

- Саопштење са скупа националног значаја штампано у целини, **M63**:

1. **Mirić S., Pejović P.:** *Simulacija rada trofaznog diodnog ispravljača sa rednim aktivnim filtrom na izlazu, koristeći novu simulacionu metodu za kola energetske elektronike*, Zbornik radova sa 59. konferencije za elektrotehniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku ETRAN, Srebrno jezero 2015, ISBN 978-86-80509-71-6.

### 1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Приликом писања овог Извештаја, Комисија је размотрила све претходно наведене чињенице и резултате досадашњег рада кандидата Спасоја Мирић. Са посебном пажњом су размотрена искуства која је кандидат стекао како у школском ангажовању као демонстратор у лабораторији, тако и у истраживачком раду. Узимајући у обзир све наведене компоненте које чине истраживачки профил кандидата за докторску дисертацију, Комисија је стекла увид у његову способност за научно-истраживачки рад, која је препозната и валоризована од стране међународне научне заједнице. Став Комисије је позитиван и након детаљног образложења теме предложиће да она буде усвојена, а кандидату пружити могућност да настави са израдом докторске дисертације.

## **2. Предмет и циљ истраживања**

Употреба енергетских претварача је данас широко распрострањена како у смислу снаге (од реда неколико W па до неколико MW), напонских нивоа (од реда V па до неколико kV), струје (од реда mA до реда kA), тако и у смислу различитих апликација (осветљење, напајање телекомуникационе опреме и рачунара, индустријски погони, саобраћај итд.). Енергетски претварачи су такође јако важни и у производњи електричне енергије (побуда генератора велике снаге; прилагођење обновљивих извора енергије електричној мрежи).

Имајући у виду овако велику употребу енергетских претварача, може се рећи да су врло значајни за наше друштво и, сходно томе, њихова анализа и стално унапређивање су потребни како би се квалитетним дизајном омогућило квалитетно коришћење електричне енергије. Квалитетно коришћење електричне енергије енергетског претварача се односи на његову ефикасност (која данас достиже ~99%) и електромагнетску компатибилност са електроенергетском мрежом и са осталим уређајима. Квалитетним дизајном је потребно задовољити све аспекте квалитетне употребе електричне енергије, који су обично прописани одређеним стандардом (на пример CISPR стандард), као и показатеље који нису предмет стандардизације и обично се односе на густину снаге (у смислу запремине  $[W/m^3]$  и у смислу масе енергетског претварача  $[W/kg]$ ), трошкова производње и губитке у енергетском претварачу. Сви ови аспекти се не могу оптимизовати истовремено, зато што су неки од њих у контрадикцији, као на пример густина снаге и губици у енергетском претварачу. Према томе, дизајн енергетских претварача захтева пажљиву анализу која треба да обезбеди оптималан резултат по низу критеријума у складу са применом условљеним тежинским факторима.

Предмет овог истраживања је развијање, имплементација и примена метода за рачунарску ефикасну анализу (симулацију) енергетских претварача. Анализа енергетског претварача обухвата препознавање делова претварача који у смислу моделовања представљају целину. Једна целина у смислу моделовања је тополошка структура енергетског претварача, која се може моделовати и описати једначинама уобичајеним у теорији електричних кола [1]. Друга целина се односи на управљачки део енергетског претварача, који се може описати моделом који зависи од променљивих стања претварача (напони на кондензаторима и струје калемова), излазних променљивих (нпр. излазни напон), енергетских улазних променљивих (нпр. улазни напон и/или излазна струја) и референтног улаза (сигнал којим се задаје нпр. излазни напон). Моделовање и анализа улазног ЕМИ (ElectroMagnetic

Interference) филтра енергетског претварача се обично спроводи у фреквенцијском домену. Складан систем за моделовање описаних целина и њихову интеграцију у јединствен модел погодан за симулацију, а који успешно описује све појаве релевантне за брз и ефикасан дизајн енергетских претварача, је циљ овог рада.

Једначине које описују тополошку структуру енергетског претварача су дате моделом континуалног система у времену. Да би се ове једначине симулирале помоћу дигиталног рачунара, неопходно је прећи на дискретно време, тј. извршити дискретизацију. У случају дискретног времена, различити методи нумеричке интеграције (*Forward-Euler*, *Backward-Euler*, *Trapezoidal rule*, *Gear Methods* или *Predictor-corrector*) се могу приметити [2]. Елементи електричног кола, описани у интегралној форми (калем и кондензатор), могу се дискретизовати и еквивалентно електрично коло се може директно извести из дискретизованих једначина [3]. На основу дискретизованог модела формира се матрица која повезује вектор улаза (побуде и стања у електричном колу) и вектор жељених излаза (излазни напон, улазна струја или потенцијал у колу). При свакој промени стања прекидача у енергетском претварачу, мења се и еквивалентна шема електричног кола које описује његову структуру, па тиме и матрица која повезује улаз и излаз. Представљањем прекидача паразитном капацитивношћу када су отворени и паразитном индуктивношћу када су затворени и дискретизацијом оваквог модела, системска матрица остаје константна [4], што је приступ који је последњих година успешно примењен у *Hardware-In-the-Loop (HIL)* концепту.

Описани методи за симулацију електричних кола енергетских претварача моделују претварач на нивоу стања прекидача (не треба мешати са променљивима стања). Обзиром на то да је симулација у дискретном времену, грешка у смислу одређивања тачног тренутка промене стања прекидача у претварачу је одређена нумеричком резолуцијом рачунара, што може довести до нестабилности решења, или сувише дуге симулације уколико је временски корак симулације мали. Метод [4] је робуснији у смислу нестабилности решења јер користи метод половљења интервала за решавање алгебарске једначине (која је део алгоритма имплицитног метода интеграције), док у [3] се користи Њутн-Рапсов метод и линеаризација нелинеарних елемената у околини радне тачке.

Другачији приступ у смислу моделовања енергетских претварача је заснован на линеаризацији и усредњавању модела стања [5], за разлику од претходно описаних метода који не користе модел стања и који су углавном засновани на модификованој нодалној анализи. Усредњени модел стања је апроксимативни динамички модел који се углавном користи за анализу и дизајн управљачког дела претварача. Прекидачки ефекти су занемарени усредњавањем таласних облика струја и напона у претварачу.

Метод за анализу енергетских претварача предложен у овој тези је заснован на суперпозицији усредњеног модела стања и прекидачких ефеката. Принциписки, алгоритам овог симулационог метода се може описати на следећи начин:

- (1) формирање система једначина стања електричног кола енергетског претварача за све релевантне комбинације стања прекидача, чему следи формирање усредњеног модела;
- (2) решавање (интеграција) система диференцијалних једначина које описују усредњени модел и рачунање усредњених таласних облика струја и напона релевантних за анализу прекидачких ефеката;
- (3) анализа прекидачких ефеката уз помоћ усредњених таласних облика струја и напона;
- (4) суперпозиција усредњених таласних облика струја и напона и таласних облика добијених приликом анализе прекидачких ефеката.

Овакав метод поседује све погодности анализе усредњеног модела стања: стабилност и кратко време симулације, а као предност даје и информацију о таласности (*ripple*).

Овакав метод анализе енергетских претварача је значајан у фази пројектовања претварача, јер се на брз и ефикасан начин може одредити спектар улазне струје који се може користити за дизајн улазног ЕМИ филтра. Једна од његових одлика, кратко време симулације, долази до изражаја када се у фази пројектовања током оптимизације разматрају различите вредности параметара који описују компоненте (индуктивности калемова и капацитивности кондензатора), што брзо доводи до великог броја комбинација могућих вредности параметара

за симулацију претварача, а тиме и до великог броја симулација. Такође, предложени метод се може користити за проверу дизајна управљачког дела претварача, где нелинеарни ефекти утичу на перформансе, али се не разматрају у класичној анализи која се ослања на линеаризован модел.

#### 2.1. Релевантна литература из области истраживања:

- [1] Robert W. Erickson, and Dragan Maksimović, *Fundamentals of power electronics*, Springer Science & Business Media, 2007.
- [2] John Charles Butcher, *Numerical methods for ordinary differential equations*, John Wiley & Sons, 2016.
- [3] Laurence W. Nagel, "SPICE2: A computer program to simulate semiconductor circuits." *ERL Memo ERL-M520*, 1975.
- [4] Predrag Pejović and Dragan Maksimović, "A method for fast time-domain simulation of networks with switches," *IEEE Transactions on Power Electronics* 9.4 (1994): 449-456.
- [5] Slobodan M. Ćuk and Robert D. Middlebrook, "Modelling, analyses and design of switching converters," (1978).

### 3. Полазне хипотезе

- Истраживање се заснива на следећим хипотезама:

- За сваку комбинацију стања прекидачких елемената енергетског претварача, уз познату секвенцу укључења и искључења, може се одредити усредњено електрично коло.
- У усредњеном електричном колу се могу јавити алгебарске (динамичке) дегенерације које морају бити успешно анализирани.
- Формирањем усредњеног електричног кола, занемарује се таласност струја и напона на фреквенцији прекидања и њеним умношцима, што значајно утиче на таласне облике напона и струја у претварачу.
- Интеграцијом усредњеног електричног кола, избегава се нестабилност (дивергенција) решења типична за методе засноване на линеаризацији прекидачких елемената током унутрашњег итеративног процеса по нелинеарности [3].
- Решење усредњеног електричног кола садржи довољно информација потребних да се прекидачки ефекти реконструишу и суперпонирају усредњеним таласним облицима напона и струја у претварачу како би се добили стварни таласни облици напона и струја.

### 4. Научне методе истраживања

- Пропознавање и формулација проблема: нумерички робусна, тачна и ефикасна анализа прелазних процеса у енергетским претварачима.
- Преглед литературе у вези са постојећим методама за анализу енергетских претварача и потрага за евентуалним решењима у литератури.
- Формирање полазних хипотеза и формулација могућих решења.
- Потврда хипотеза, или теоретским доказима или резултатима симулација.
- Упоредба резултата добијених предложеним методом са постојећим методама симулације.
- Документовање нових идеја и њихова провера.
- Генерализација и математички прецизна формулација предложеног метода.

### 5. Очекивани научни допринос

Као резултат овог истраживања, очекују се следећи научни доприноси:

- Прегледом литературе у вези са анализом електричних кола стиче се увид у постојеће методе и њихову могућност за примену у случају енергетских претварача.
- Резултати поређења аналитичких и нумеричких метода за формирање система једначина стања електричног кола и формулацију усредњеног модела електричног кола. Поређење различитих метода за усредњавање.
- Биће предложен и математички формализован метод за одређивање прекидачких ефеката у енергетском претварачу на основу усредњених таласних облика напона и струја у претварачу за различите модове рада претварача и за различите методе управљања: *continuous conduction mode (ccm)*, *discontinuous conduction mode (dcm)*, *hysteresis window current mode control*, *peak current limiting mode control in ccm*, *peak current limiting mode control in dcm*.
- Резултати поређења (верификација метода, време симулације) предложеног метода за анализу енергетских претварача са постојећим методама (програмима за симулацију).

- Примена предложеног метода за ефикасан дизајн улазног ЕМИ филтра енергетског претварача.
- Примена предложеног метода за анализу и синтезу управљачког дела енергетског претварача.

## 6. План истраживања и структура рада

План истраживања се састоји из следећих радних пакета:

- Радни пакет 1 се односи на преглед литературе у вези са методама за симулацију електричних кола, са акцентом на њихову примену у анализи енергетских претварача.
- Радни пакет 2 се односи на формулацију проблема и могућег решења. Упознавање са алатима који ће се користити за добијање резултата: програмски језици *Python* и *Julia*.
- Радни пакет 3: одабир релевантних примера из литературе, на којима треба проверити предложени метод за анализу. Анализа одабраних примера применом предложеног метода и поређење добијених резултата са резултатима из литературе.
- Радни пакет 4: математичка формализација предложеног метода и документовање резултата.

## 7. Закључак и предлог

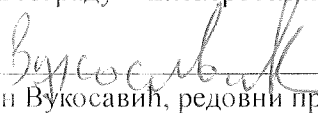
При писању Извештаја, Комисија је размотрила релевантне чињенице које формирају слику о подобности теме и кандидата. Имајући у виду резултате досадашњег рада кандидата Спасоја Мирића, Комисија је стекла неоспорни утисак да кандидат јесте способан за научно-истраживачки рад. Анализирајући предложену тему под називом „Метод за рачунарски ефикасну симулацију енергетских претварача заснован на моделу стања и суперпозицији прекидачких ефеката“, стављајући је у контекст савремених, актуелних научних истраживања, Комисија је у потпуности сагласна да оваква тема задовољава све услове подобности за докторску дисертацију. Комисија констатује да ова тема припада ужој научној области Енергетска електроника, и да је Електротехнички факултет Универзитета у Београду матичан за ову научну област, и при томе за ментора докторске дисертације предлаже др Предрага Пејовић, редовног професора ЕТФ-а у Београду. У контексту овог предлога, уз Извештај је приложен списак радова др Предрага Пејовић, редовног професора, који га квалификују за ментора.

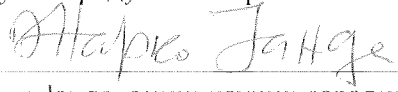
У закључку овог Извештаја, а имајући у виду претходно наведено, Комисија има част да Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду предложи да прихвати тему докторске дисертације „Метод за рачунарски ефикасну симулацију енергетских претварача заснован на моделу стања и суперпозицији прекидачких ефеката“ и да кандидату Спасоју Мирић омогући приступ њеној изradi.

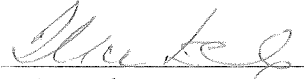
У Београду,  
дана 22.08.2017.

### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

  
др Предраг Пејовић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

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

  
др Жарко Јанда, виши научни сарадник  
Електротехнички институт Никола Тесла

  
др Драган Милићев, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет