

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Милана Пајнића, мастер инж. електротехнике и рачунарства, за израду докторске дисертације „Управљање меким прекидањем код двосмерног *buck/boost* претварача засновано на елементу са струјно регулисаним коефицијентом магнетне спреге”.

Одлуком бр. 5009/16-1. од 19.4.2019. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Милана Пајнића за израду докторске дисертације и научне заснованости теме „Управљање меким прекидањем код двосмерног *buck/boost* претварача засновано на елементу са струјно регулисаним коефицијентом магнетне спреге”.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Милан Пајнић је рођен 5.1.1990. године у Београду, где је завршио основну школу „Скадарлија“ и средњу електротехничку школу „Никола Тесла“. Основне академске студије завршио је јуна 2014. године, на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на одсеку Електроника одбранивши дипломски рад на тему „Интелигентни мерни претварач атмосферског притиска“. Школске 2014/2015. године уписао се на мастер академске студије на Електротехничком факултету, модул Електроника. Мастер академске студије је завршио у новембру 2015. године са просечном оценом 9.0 и оценом 10 за мастер рад „Анализа, моделовање и управљање резонантним ЛЛЦ конверторима“. На докторске академске студије на Електротехничком факултету, Универзитет у Београду, изборно подручје Електроника, се уписао школске 2016/2017. године.

За време трајања мастер академских студија, кандидат је обављао праксу у истраживачко-развојном институту „ИРИТЕЛ“ а. д. У априлу 2015. године изабран је од стране Научног већа института „ИРИТЕЛ“ а.д. у звање: истраживач приправник. У јануару 2016. године заснива стални радни однос у истраживачко-развојном институту „ИРИТЕЛ“ а. д. на позицији развојног инжењера, у сектору Енергетске електронике. У јануару 2019. године унапређен је на позицију руководиоца Одељења за развој уређаја енергетске електронике.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Кандидат је докторске академске студије на Електротехничком факултету, Универзитет у Београду, изборно подручје Електроника, уписао школске 2016/2017. године. Кандидат је у периоду од тренутка уписа докторских студија до тренутка подношења Захтева за одобрење Дисертације положио све испите предвиђене докторским академским студијама на изборном подручју Електроника, који су систематизовани следећом табелом:

Назив испита	Оцена	ЕПСБ
Управљање сложеним системима	10	9
Дизајн интегрисаних РФ кола	10	9
Интеграција обновљивих извора у дистрибутивни систем	10	9
Одабрана поглавља из аналогне електронике	10	9
Енглески језик	10	6
Одабрана поглавља из енергетске електронике	10	9
Пројектовање наменских рачунарских система	10	9
Енергетски претварачи	10	9
Управљање енергетским претварачима	10	9
Наменске сензорске мреже	10	9

Кандидат Милан Пајнић од 2015. године учествује на пројекту „Развој метода, сензора и система за праћење квалитета воде, ваздуха и земљишта“ ев. број пројекта III 43008 и на пројекту „Иновативне електронске компоненте и системи базирани на неорганским и органским технологијама уграђени у робе и производе широке потрошње“ ев. број пројекта TP32016, које финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије. Доприноси кандидата на поменути пројектима заснивају се на истраживањима која укључују карактеризацију нових магнетних структура и материјала као и карактеризацију енергетских претварача резонантног типа, високе прекидачке учесталости. Аутор је или коаутор 2 рада у међународним часописима са SCI листе, 4 рада на међународним конференцијама и 2 рада на домаћим конференцијама.

Дана 7.5.2019. године одржана је јавна усмена одбрана теме докторске дисертације (докторски испит) пред комисијом у саставу: др Слободан Вукосавић, редовни професор, дописни члан САНУ; др Радивоје Ђурић, доцент и др Жарко Јанда, виши научни сарадник, Институт Никола Тесла, Универзитет у Београду. Оцена Комисије је да је кандидат Милан Пајнић успешно одбранио предложену тему докторске дисертације.

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

Списак радова:

- Међународни часопис од изузетних вредности, **M21a**
- 1. **Pažnić M., Pejović P.: Zero-Voltage Switching Control of an Interleaved Bi-directional Buck/Boost Converter with Variable Coupled Inductor**, IEEE Transactions on Power Electronics, accepted for publication, available for early access, **ISSN: 0885-8993**, DOI:110.1109/TPEL.2019.2893703, **impakt faktor za 2017: 6.812**

- Међународни часопис од врхунских вредности, **M21**
- 2. **Pajnić M.**, Pejović P., Aleksić O.: *Design and analysis of a novel coupled inductor structure with variable coupling coefficient*, IET Power Electronics, Vol. 11, No. 6, pp. 961-967, 2018, ISSN: 1755-4535 (Print), ISSN: 1755-4543 (Online), DOI: [10.1049/iet-pel.2017.0566](https://doi.org/10.1049/iet-pel.2017.0566), **impakt faktor za 2017: 2.261**
- Саопштење са међународног скупа штампано у целини, **M33**
- 3. **Pajnić M.**, Pejović P., Despotović Ž., Lazić M., Skender M.: *Characterization and Gate Drive Design of High Voltage Cascode GaN HEMT*, Session: Power Converters and Devices, Paper T1.2-3, 19th International Symposium Power Electronics – Ee2017, 18-21. October 2017, N. Sad, Serbia. Proceedings of 19th International Symposium Power Electronics - Ee2017, eISSN: 978-1-5386-3502-5, DOI: [10.1109/PEE.2017.8171670](https://doi.org/10.1109/PEE.2017.8171670)
- 4. **Pajnić M.**, Pejović P., Despotović Ž., Lazić M., Skender M.: *Design consideration for high frequency LLC resonant converter with matrix transformer*, Session: Power Converters and Devices, Paper T1.2-4, 19th International Symposium Power Electronics – Ee2017, 18-21. October 2017, N. Sad, Serbia. Proceedings of 19th International Symposium Power Electronics - Ee2017, eISSN: 978-1-5386-3502-5, DOI: [10.1109/PEE.2017.8171669](https://doi.org/10.1109/PEE.2017.8171669)
- 5. **Pajnić M.**, Lazić M., Cvejić Z.: *Small Signal Modeling of Series-Parallel Resonant Converters Based on Extended Describing Function*, Proceedings of the Small Systems Simulation Symposium 2016, 6 th, February 12-14, Niš, Serbia, Zbornik radova –CD izdanje, ISBN 978-86- 6125-154-2, Ref. M1.7, pp. 46-49
- 6. Lazić M., Petrović D., Cvejić Z., **Pajnić M.**: *The choice of primary energy sources for the organization of uninterrupted power supply*, 3rd International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering, IcETRAN 2016, Zlatibor, Serbia, June 13 – 16, 2016, Proceedings of papers ISBN 978-86-7466-618-0, ELI2.3. pp.1-4
- Саопштење са скупа националног значаја штампано у целини, **M63**:
- 7. **Pajnić M.**, Lazić M., Cvejić Z.: *Matematički model serijsko-paralelnog konvertora na osnovu analize rezonantnog kola u vremenskom domenu*, XV Međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH, Jahorina, Republika Srpska, 16-18. mart 2016. Zbornik radova –CD izdanje, ISBN 978-99955-763-9-4, Vol. 15, Ref. ELS-5, str. 22-27
- 8. **Pajnić M.**, Lazić M., Cvejić Z.: *Modelovanje serijsko-paralelnog konvertora analizom rezonantnog kola u vremenskom domenu i domenu učestalosti*, XV Međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH, Jahorina, Republika Srpska, 16-18. mart 2016. Zbornik radova –CD izdanje, ISBN 978-99955-763-9-4, Vol. 15, Ref. ELS-4, str. 16-21

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 Милана Пајнића. Са посебном пажњом су размотрена искуства 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

Услед све веће потребе за електричном енергијом, протеклих деценија присуствујемо израженом развоју кола енергетске електронике, која се користе за ефикасно претварање и управљање током електричне снаге. Кола енергетске електронике налазе широку примену, од преносивих уређаја до различитих типова електричних возила. Очекује се да ће за наредних двадесет година велики део глобалне електричне снаге потицати из кола енергетске електронике, па се као главни изазов за иноваторе данас намеће повећање енергетске ефикасности и густина снаге кола енергетске електронике.

Најновија достигнућа у области полупроводничких елемената отворила су мноштво прилика за иновацију у области енергетске електронике, а самим тим и одговарајуће изазове. Појавом полупроводничких материјала са великим енергетским процепом попут силицијум-карбида (Silicon Carbide-SiC) и галијум-нитрида (Gallium Nitride-GaN) и њиховом комерцијализацијом, отворена је могућност за појаву физички мањих енергетских претварача, који могу радити на вишим прекидачким фреквенцијама. Са повећањем прекидачке фреквенције, употреба меког прекидања приликом промене стања енергетских прекидача у претварачу постаје наизбежна, јер значајно смањује губитке.

Последњих година, у постојећим једносмерним и наизменичним дистрибутивним системима, укључујући и микромреже системе, долази до интеграције интерминетних дистрибуираних извора као што су ветроелектране и фотонапонски панели, који имају стохастички карактер производње енергије. Такве мреже постају активне са могућим двосмерним токовима снага, тако да се најчешће би-дирекциони напонски претварач користи као интерфејс између складиштене енергије и дистрибуираног, сабирног DC напона и као такав представља критичну компоненту у ефикасном управљању енергијом. Због своје једноставности и високе ефикасности, би-дирекциони, галвански не-изоловани, *buck/boost* напонски претварач је своју примену поред претварача у дистрибутивним системима, нашао и као интегрисани пуњач у електричним возилима.

У стручној литератури појава струјом регулисане индуктивности и трансформатора забележена је средином деветностог века, где су примену нашли у управљању сервомеханизмима, стабилизаторима, радарима и сонарима. Крајем деветностог века ови елементи су били саставни део електричних кола за регулацију мрежног напона, контролу брзине једносмерних мотора и детектовање струје преоптерећења. Недавно је савремена технологија пронашла нове примене ових магнетних уређаја, прилагођавајући и мењајући структуре и материјале, али пре свега тумачећи њихову употребу на другачији начин. Данас ови уређаји своју примену налазе у различитим колима енергетске електронике међу којима су резонантни претварачи, кола за бежични пренос енергије и кола за управљање осветљењем [1]. Услед недовољног развоја нових магнетних материјала који би могли да испрате развој прекидачких компоненти, интеграција струјом контролисаних елемената променљиве индуктивности у кола енергетске електронике представља добру алтернативу у циљу остваривања бољих перформанси енергетских претварача.

Предмет истраживања ове дисертације је рад на развоју двосмерног енергетског претварача вишефазне паралелне структуре и високе прекидачке фреквенције, са контролом меког прекидања енергетских прекидача, помоћу спрегнуте индуктивности са струјно управљивим коефицијентом спреге.

Приступ овако сложене проблеме мора бити интердисциплинаран, тако да ће се сва истраживања у оквиру тезе одвијати у две целине међусобно повезане заједничким циљем. Прва целина ће обухватати развој нове магнетно симетричне структуре, са струјно управљивом спрегом, као и њену карактеризацију са циљем примене у вишефазном напонском претварачу. Такође, радиће се на развоју упрошћеног заменског модела, помоћу којег се може на одговарајући начин, представити карактеристично понашање нове, магнетно

симетричне структуре са управљивим коефицијентом спреге. На основу резултата прве целине, у другом делу дисертације, радиће се на развоју вишефазног, двосмерног енергетског претварача, високе прекидачке фреквенције, са контролом меког прекидања помоћу спрегнуте индуктивности са струјно управљивим коефицијентом спреге.

У уобичајеним, коефицијент спреге индуктивних елемената у енергетским претварачима дефинисан је начином израде и обликом самог елемента, величином ваздушног процепа и начином мотања самих намотаја. Спрегнуте индуктивности са струјно управљивим коефицијентом спреге остварују управљање наизменичном компонентом флукса, управљањем помоћу струје предмагнетизације магнетног материјала. Постојеће реализације ових магнетних регулатора могу се поделити у две групе. У прву групу спадају несиметричне спрегнуте индуктивности са струјно управљивим коефицијентом спреге, код којих промена наизменичног флукса није иста у свим намотајима елемента и које као такве нису погодне за примену у вишефазним претварачима [2]. Другу групу елемената чине симетричне структуре, код којих флукс који потиче од струје предмагнетнења увећава једносмерну радну тачку материјала у целом језгру и тиме значајно утиче губитке у магнетном материјалу [3]. Структура развијена у току овог истраживања ће бити сачињена од наменски направљених феритних језгра, где су управљиве гране магнетног материјала смештене на једнаким удаљеностима од радних грана. Такође, ваздушни процепа у магнетном материјалу су дистрибуирани и постављени у радне гране, како би на тај начин усмерили флукс који потиче од струје предмагнетнења само у управљиве гране структуре. Тиме ће бити обезбеђена симетрична промена флукса у свим намотајима магнетне структуре и смањени губитци у феритном материјалу услед струје предмагнетнења.

Како захтеви за компактнијим и мањим претварачима подижу границе радне прекидачке фреквенције, реализација меког прекидања приликом преласка стања енергетских прекидача у претварачу постаје неизбежна. Такође, употреба меког прекидања ублажава ефекте електромагнетних сметњи претварача, чије потискивање према све строжијим индустријским нормама, често представља изазов за инжењере. Управљањем претварача у граничном режиму, сматра се једноставним и ефикасним начином за остваривање меког прекидања, али је услед велике таласности струје прекидача потребно имплементирати вишефазну паралелну структуру. Остваривање меког прекидања енергетских компоненти у широком опсегу промене вредности оптерећења и улазног/излазног напона у случају вишефазног двосмерног, *buck/boost* енергетског претварача, најчешће се врши додавањем помоћних склопова који повећавају комплексност конвертора и његово управљање [4]. Други вид остваривања меког прекидања представља имплементација квази-резонантног типа управљања, где се синхрони прекидач искључује након тачно дефинисаног времена како би се обезбедило довољно енергије за пражњење паразитне капацитивности главног прекидача, пре његовог укључења. Међутим, повећање времена вођења синхроног прекидача доводи до повећања ефективне вредности струје индуктивности, а тиме и до повећања кондуктивних губитака и губитака у феритном материјалу [5], [6].

Имплементацијом нове магнетне структуре у претходно описани двосмерни претварач и управљањем вредности коефицијента спреге може се постићи управљање меким прекидањем у широком опсегу промене вредности улазног/излазног напона и оптерећења. Наиме, идеја предложеног приступа је да се контролом спреге, заснованом само на вредности улазног/излазног напона, контролише амплитуда резонантне трајекторије приликом промене стања прекидача. Претварач може радити у граничном режиму, док се оптимална вредност коефицијента спреге одређује само на основу измерених вредности улазног/излазног напона, па се на такав начин може остварити меко прекидање прекидача у широком опсегу промене вредности оптерећења и напона претварача. Главна предност предложеног приступа огледа се у једноставности остваривања управљања меким прекидањем, док се услед смањења трајања резонантног периода очекује повећана ефикасност конверзије, нарочито изражена при средњим и малим вредностима оптерећења претварача.

2.1. Релевантна литература из области истраживања

- [1] Perdigão, Marina S., M. F. Menke, Álysson Raniere Seidel, Rafael Adaime Pinto, and J. Marcos Alonso, *A review on variable inductors and variable transformers: Applications to lighting drivers*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 52, No. 1, 2016: pp. 531-547.
- [2] Vollin, Jeff, F. Dong Tan, and S. M. Cuk, *Magnetic regulator modeling*, Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC'93, Conference Proceedings 1993: pp. 604-611.
- [3] Barrett, Alfred Henry, *Controlled-K resonating transformer*, U.S. Patent 5,737,203, issued April 7, 1998.
- [4] M. Pavlovsky, G. Guidi, and A. Kawamura, *Buck/boost dc-dc converter topology with soft switching in the whole operating region*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29, No. 2, 2014: pp. 851-862.
- [5] T. Konjedić, L. Korošec, M. Truntiĉ, C. Restrepo, M. Rodiĉ, and M. Milanoviĉ, *Dcm-based zero-voltage switching control of a bidirectional dc-dc converter with variable switching frequency*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 31, No. 4, 2016: pp. 3273-3288.
- [6] X. Huang, F. C. Lee, Q. Li, and W. Du, *High-frequency highefficiency gan-based interleaved crm bidirectional buck/boost converter with inverse coupled inductor*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 31, No. 6, 2016: pp. 4343-4352.

3. Полазне хипотезе

-Истраживање се заснива на следећим хипотезама:

- Истраживања везана за повећање ефикасности конверзије у случају више-фазног бидирекционог, енергетског претварача, захтевају нови интердисциплинарни приступ. Због тога је неопходно интегрисати истраживања на пољу магнетних структура са променљивим коефицијентом спреге и претварача са контролом меког прекидања приликом преласка стања прекидача.
- Постојеће реализације магнетне структуре са променљивим коефицијентом спреге се не могу применити у симетричним вишефазним претварачима, услед несиметричне расподеле наизменичног флуksа у намотајима и повећаних губитака у магнетном материјалу, који су последица струје предмагнећења. Потребно је развити нову, магнетно симетричну структуру са управљивим коефицијентом спреге.
- Остваривање меког прекидања енергетских прекидача у широком опсегу промене вредности оптерећења и улазног/излазног напона у случају вишефазног двосмерног, енергетског претварача, представља изазов за истраживаче данас. Додавањем помоћних склопова нарушава се једноставност топологије, док примена квази-резонантног типа управљања доводи до повећања ефективне вредности струје индуктивности, а тиме и до повећања кондуктивних губитака и губитака у феромагнетском материјалу. Потребно је развити нов начин управљања меким прекидањем интегрисањем магнетно симетричне структуре са струно управљивим коефицијентом спреге.

4. Научне методе истраживања

- Теоријско разматрање и анализа постојећих магнетних структура са струјно управљивом спрегом и развој нове магнетно симетричне структуре, струјно управљиве спреге, погодне за примену више-фазним енергетским претварачима.

- Аналитичко моделовање структуре помоћу упрошћеног еквивалентног кола и корелисање параметара модела са реализованом новом, магнетно симетричном структуром вршиће се на основу експериментално добијених резултата.
- Теоријско разматрање и анализа постојећих метода управљања меким прекидањем више-фазног двосмерног енергетског претварача и развој нове методе контроле меког прекидања у широком опсегу промене вредности улазног/излазног напона, путем спрегнуте индуктивности са управљивим коефицијентом спреге.
- Експериментални рад: пројектовање и реализација *buck/boost* двофазног конвертора и магнетно спрегнуте индуктивности са управљивим коефицијентом спреге, израда алгоритма и микроконтролерског програма управљања меким прекидањем, експериментална верификација резултата и поређење са теоријским очекивањима.

5. Очекивани научни допринос

- Развој магнетно симетричне структуре, са струјно управљивом вредношћу коефицијента спреге, симетричне расподеле расипног флукса, погодне за примену у више-фазним напонским претварачима.
- Развој упрошћеног аналитичког модела, помоћу којег се може на одговарајући начин представити карактеристично понашање нове магнетно симетричне структуре са управљивим коефицијентом спреге.
- Смањење трајања резонантног периода приликом промене стања прекидача и повећање ефикасности конверзије у широком опсегу промене вредности улазног/излазног напона и оптерећења у случају двофазног, *buck/boost* двосмерног енергетског претварача, високе прекидачке фреквенције, контролом меког прекидања помоћу спрегнуте индуктивности са струјно управљивим коефицијентом спреге.
- Поједностављење начина управљања меким прекидањем у широком опсегу промене вредности улазног/излазног напона и оптерећења двофазног двосмерног енергетског претварача, управљањем вредности коефицијента спреге, чија се вредност одређује само на основу измерених вредности улазног/излазног напона претварача.

6. План истраживања и структура рада

-Истраживања у току ове дисертације чине два једнако важна сегмента:

- Развој магнетно симетричне структуре, са струјно управљивом спрегом, симетричне расподеле расипног флукса, погодне за интеграцију у вишефазне напонске претвараче и развој упрошћеног аналитичког модела помоћу којег се може на одговарајући начин представити карактеристично понашање развијене структуре.
- Развој двофазног *buck/boost*, двосмерног, енергетског претварача, високе прекидачке фреквенције, са контролом меког прекидања у широком опсегу промене вредности улазног/излазног напона и оптерећења помоћу спрегнуте индуктивности са струјно управљивим коефицијентом спреге.

-Структура рада прати активности према претходно наведеном плану истраживања.

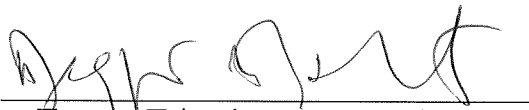
7. Закључак и предлог

При писању извештаја, Комисија је размотрила релевантне чињенице које формирају слику о подобности теме и кандидата. Имајући у виду резултате досадашњег рада кандидата Милана Пајнића, Комисија је стекла неоспорни утисак да кандидат јесте способан за научно истраживачки рад. Анализирајући предложену тему под називом „Управљање меким прекидањем код двосмерног *buck/boost* претварача засновано на елементу са струјно регулисаним коефицијентом магнетне спреге”, 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 Пејовића, редовног професора ЕТФ-а у Београду. У контексту овог предлога, уз Извештај је предложен и списак радова др Предрага Пејовића, редовног професора, који га квалификују као ментора.

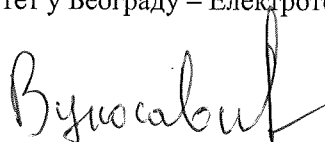
У закључку овог Извештаја, а имајући у виду претходно наведено, Комисија има част да Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду предложи да прихвати тему докторске дисертације „Управљање меким прекидањем код двосмерног *buck/boost* претварача засновано на елементу са струјно регулисаним коефицијентом магнетне спреге” и да кандидату Милану Пајнићу омогући приступ њеној изradi.

У Београду 13.05.2019.

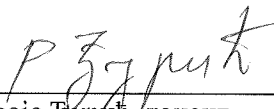
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



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



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



др Радивоје Ђурић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Жарко Јанда, виши научни сарадник
Универзитет у Београду – Институт Никола Тесла