

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет:

Извештај Комисије за преглед и оцену докторске дисертације кандидата Милана Пајнића

Одлуком Научног Већа Електротехничког факултета број 5009/16-3 од 25.11.2019. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације кандидата Милана Пајнића под насловом

„Управљање меким прекидањем код двосмерног *buck/boost* претварача засновано на елементу са струјно регулисаним коефицијентом магнетне спреге“

односно

„Zero-voltage switching control of an bi-directional buck/boost converter with variable coupled inductor“

После прегледа достављене Дисертације, Комисија је сачинила следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

- 27.09.2016. Студент Милан Пајнић је уписао докторске академске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду.
- 20.02.2019. Кандидат Милан Пајнић је пријавио тему за израду докторске дисертације под насловом „Управљање меким прекидањем код двосмерног *buck/boost* претварача засновано на елементу са струјно регулисаним коефицијентом магнетне спреге“. За ментора је предложен др Предраг Пејовић, редовни професор Електротехничког факултета у Београду.
- 09.04.2019. 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.
- 19.04.2019. Научно наставно веће је именовало Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертацију у саставу:
 - 1. др Слободан Вукосавић, редовни професор, Електротехнички факултет

- у Београду
2. др Радивоје Ђурић, доцент, Електротехнички факултет у Београду
 3. др Жарко Јанда, виши научни сарадник, Електротехнички институт Никола Тесла

(одлука бр. 5009/16-1 од 19.04.2019. године).

- 07.05.2019. Кандидат је на јавној усменој одбрани предложене теме докторске дисертације (докторски испит) добио оцену „задовољно“.
- 11.06.2019 Наставно-научно веће усвојило је Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5009/16-2 од 11.06.2019. године).
- 01.07.2019 Веће научних области техничких наука дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације (број 61206-2719/2-19 од 1.7.2019. године).
- 14.10.2019. Кандидат Милан Пајнић је предао докторску дисертацију на преглед и оцену.
- 05.11.2019. 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.
- 25.11.2019 Наставно-научно веће Електротехничког факултета у Београду на седници бр. 845 од 12.11.2019. именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације у саставу:
1. др Слободан Вукосавић, редовни професор, Електротехнички факултет у Београду
 2. др Радивоје Ђурић, доцент, Електротехнички факултет у Београду
 3. др Жарко Јанда, виши научни сарадник, Електротехнички институт Никола Тесла
- (одлука бр. 5009/16-3 од 25.11.2019. године).

1.2. Научна област дисертације

Дисертације кандидата Милана Пајнића припада научној области Техничке науке-Електротехника, ужа научна област Енергетска електроника. За ментора дисертације одређен је др Предраг Пејовић, редовни професор на Универзитету у Београду – Електротехнички факултет, због истакнутих доприноса у ужој области Енергетска електроника.

1.3. Биографски подаци о кандидату

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.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација написана је на српском језику и има 141 страну. Подељена је у 6 поглавља: 1. Увод; 2. Анализа постојећих струјом контролисаних елемената индуктивности и спреге; 3. Предлог и анализа нове магнетно симетричне структуре са струјно управљивим коефицијентом спреге; 4. Анализа меког прекидања у случају *buck/boost* двосмерног претварача; 5. Управљање меким прекидањем код двосмерног *buck/boost* претварача засновано на струјно контролисаном елементу управљиве магнетне спреге; 6. Закључак. Литература садржи 121 референцу, које верно приказују транутно стање у области истраживања.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Прво поглавље покрива општи увод у енергетску електронику и њену примену, уз осврт на тренутне трендове побољшања перформанси енергетских претварача и предстојеће изазове у даљем развоју. Дат је кратак преглед области примене, трендова употребе и карактеристика нове генерације прекидачких компоненти. Представљене су основне карактеристике као и област примене струјом контролисаних елемената управљиве магнетне индуктивности. Такође, дат је кратак преглед области примене двосмерног *buck/boost* претварача заједно са главним карактеристикама и трендовима унапређења перформанси. На крају поглавља представљени су циљеви истраживања и структура самог рада.

У другом поглављу представљен је кратак преглед основних карактеристика магнетских материјала, као и кратак опис функционисања елемената магнетних појачавача и регулатора. Дат је преглед основних карактеристика елемената спрегнутих индуктивности и представљена је анализа рада струјом контролисаних елемената управљиве индуктивности, описане су најчешће реализације и њихове карактеристике. Такође, представљена је анализа рада струјом контролисаних елемената управљиве магнетне спреге, презентоване су карактеристике и описани недостаци постојећих решења описаних у литератури која се могу применити у енергетским претварачима.

У трећем поглављу дати су опис и анализа предложене магнетно симетричне структуре са струјно управљивим коефицијентом спреге, као и аналитички модел структуре, представљен помоћу упрошћеног еквивалентног кола. Корелисање параметара аналитичког модела са реализованом новом, магнетно симетричном структуром извршено је на основу експериментално добијених резултата. Представљени су гранични случајеви у којима структура може бити употребљена, као и максималне и минималне оствариве вредности коефицијента спреге. Описан је утицај предложене магнетно симетричне структуре са струјно управљивим коефицијентом спреге на електричне карактеристике дво-фазног претварача, подизача напона и дат пример одређивања параметара предложене структуре, узимајући у обзир максималну дозвољену вредност магнетне индукције у материјалу.

У четвртном поглављу дат је кратак преглед области примене више-фазног двосмерног напонског претварача и преглед карактеристика постојећих решења двосмерних претварача. Представљена је детаљна анализа меког прекидања у случају *buck/boost* двосмерног претварача. Такође, представљена је компаративна анализа постојећих метода за контролу

меког прекидања прекидача у широком опсегу промене радних параметара претварача. Описане су предности и мане постојећих метода које представљају тренутно стање у области истраживања. Дата је детаљна анализа трајања периода приликом преласка стања прекидача, у случају двофазног *buck/boost* двосмерног претварача који ради у граничном режиму рада и представљен утицај постојећих метода за остваривање меког прекидања на вредност релативних прекидачких губитка у претварачу.

У петом поглављу представљена су ограничења у погледу примене спрегнуте индуктивности са управљивим коефицијентом спреге у случају вишефазног двосмерног *buck/boost* претварача, у зависности промене радних параметара претварача. У складу са применом и на основу анализе постојећих решења представљених у литератури, вредности радних параметара претварача су изабране на такав начин да се компаративно може представити значај и предности употребе предложеног метода контроле. На основу одређених параметара реализован је и описан експериментални модел претварача и имплементиран предложени метод управљања меким прекидањем у широком опсегу промене вредности улазно и излазног напона претварача. Експериментални резултати приказани су при кључним вредностима улазно/излазног напона, компаративно, у случају предложене методе контроле и методе предложене у постојећој литератури. Експериментални резултати потврдили су валидност представљеног аналитичког модела добијеног на основу анализе трајања резонантног интервала. Такође, приказани експериментални резултати указују на умањење трајања укупног резонантног периода употребом спрегнуте индуктивности са управљивим коефицијентом спреге, у широком опсегу промене вредности улазно/излазног напона. Употребом предложене методе експериментално је забележено увећање ефикасности претварача, нарочито изражено при средњим и ниским вредностима оптерећења, у широком опсегу промене вредности улазно/излазног напона.

У шестом поглављу дат је сумирни преглед дисертације. Изведени су закључци да се предложена магнетна структура управљиве магнетне спреге може валидно представити помоћу аналитичког модела и применити у вишефазним енергетским претварачима. Такође, применом предложеног начина управљања меким прекидањем у случају двофазног *buck/boost* претварача, употребом представљене структуре управљиве магнетне спреге остварено је умањење трајања резонантног периода и увећање ефикасности претварача, нарочито изражено при средњим и ниским вредностима оптерећења, у широком опсегу промене вредности улазно/излазног напона

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Услед све веће потребе за електричном енергијом, кола енергетске електронике налазе широку примену, од преносивих уређаја до различитих типова електричних возила, па се стим у вези, као главни изазов за истраживаче данас намеће увећање енергетске ефикасности кола енергетске електронике.

Реализација меког прекидања приликом преласка стања енергетских прекидача у претварачу постаје наизбежна, услед све израженијих захтева за компактијим и ефикаснијим претварачима, који подижу границе радне прекидачке учесталости. Ову чињеницу потврђује велики број истраживања у овој области која имају за циљ унапређење карактеристика претварача, пре свега ефикасности у претварању енергије, у широком опсегу промене вредности радних параметара.

У овој дисертацији, представљена је нова, магнетно симетрична структура са струјно управљивом магнетном спрегом. Потом је на основу резултата прве целине, у другој целини представљен нов начин управљања меким прекидањем код *buck/boost* претварача употребом

развијене структуре управљиве магнетне спреге. У постојећој литератури 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. Такође, остваривање меког прекидања енергетских прекидача у широком опсегу промене вредности оптерећења и улазног/излазног напона у случају вишефазног двосмерног енергетског претварача, у постојећој литератури најчешће је реализовано додавањем помоћних склопова или применом квази-резонантног управљања, који доводи до увећања ефективне вредности струје индуктивности, а тиме и до увећања кондуктивних губитака и губитака у феромагнетском материјалу. Савременост предложеног метода огледа се у његовој примени. У овом раду дат је пример употребе методе меког прекидања и представљен експериментални модел двосмерног претварача, док на је на основу експерименталних резултата дата компаративна анализа карактеристика предложеног метода у односу на постојеће релевантне методе предложене у научној литератури.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде дисертације кандидат је истражио постојећу релевантну литературу и коректно навео 121 референцу које су од значаја за тему којом се бави дисертација. Литература целовито обухвата тренутно стање у области истраживања као и део старијих истраживања која су послужила као ослонац.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Методологија истраживања у оквиру докторске дисертације састојала се у следећим активностима:

- Проучавање доступне литературе из области дисертације, ради сагледавања актуелног стања науке и технике у ужој посматраној области.
- Формирање полазних хипотеза и формулација могућих решења.
- Потврда хипотеза резултатима симулација
- Формирање и анализа аналитичких модела који могу на одговарајући начин верно представити карактеристично понашање предложене структуре и методе.
- Потврда валидности аналитичких модела на основу експериментално добијених резултата.
- Упоређивање експерименталних резултата добијених предложеном методом са постојећим методама контроле меког прекидања, у широком опсегу промене вредности оптерећења и улазног/излазног напона.
- Документовање идеја и њихова провера.

Примењена методологија у потпуности одговара стандардима научно-истраживачког рада и у сагласности је са постављеним циљевима дисертације.

3.4. Применљивост остварених резултата

Истраживања и развој нових структура и метода управљања меким прекидањем прекидача у широком опсегу промене радних параметара енергетских претварача, дала су резултате који показују да се предложена структура и методе могу користити при пројектовању претварача високе вредности ефикасности претварања енергије. Резултат тезе се може представити у оквиру две целине.

Резултат прве целине обухвата развој магнетно симетричне структуре, са струјно управљивом магнетном спрегом, симетричне расподеле расипног флуksа, погодне за примену у више-фазним напонским претварачима и упрошћеног аналитичког модела помоћу

којег се може на одговарајући начин представити карактеристично понашање развијене структуре. Резултат прве целине дисертације директно је примењен у оквиру друге целине, у оквиру које је предложен нов метод остваривања меког прекидања, у широком опсегу промене радних параметара енергетских претварача, употребом претходно развијене структуре. Резултат друге целине представља нов метод управљања меким прекидањем у случају дво-фазног претварача који се може користити при пројектовању и реализацији претварача високе вредности ефикасности претварања енергије и прекидачке учесталости.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

На основу прегледане дисертације Комисија процењује да је кандидат Милан Пајнић показао способност за самостални научно-истраживачки рад почевши од систематичног прегледа доступне литературе, разумевања и примене теоријских и практичних концепата, дефинисања проблема, развоја нових метода за решавање постављеног проблема као и анализе добијених резултата. Начин на који је написана дисертација и доприноси који су у њој представљени указују на зрелост кандидата за самосталан научно истраживачки рад. Резултате својих истраживања кандидат је објавио у часописима од међународног значаја.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Основни научни доприноси који су остварени у оквиру докторске дисертације су следећи:

- Развој нове, 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.
- Умањење трајања резонантног периода приликом промене стања прекидача и увећање ефикасности претварања енергије 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.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Сагледавањем постављених циљева истраживања, полазних претпоставки и остварених резултата Комисија може да констатује да је кандидат успешно одговорио на сва битна питања из проблематике којом се бави дисертација.

Развијена је оригинална магнетна структура управљиве спреге и предстаљена помоћу одговарајућег аналитичког модела, док је сама методологија одређивања параметара нове структуре систематизована у виду прецизно дефинисаних корака.

Развијен је нов метод управљања меким прекидањем и на основу експерименталних резултата представљен компаративни приказ унапређења карактеристика двофазног

претварача применом предложеног метода, у односу на постојеће методе доступне у научној литератури.

Комисија констатује да су научни доприноси остварени у дисертацији објављени у научном часопису међународног значаја категорије M21a и научном часопису међународног значаја категорије M21.

4.3. Верификација научних доприноса

Из најуже области непосредно везане за тему докторске дисертације, кандидат је објавио следеће радове у међународним часописима.

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, Vol. 34, Issue 10, 2019, pp. 9562-9572, ISSN: 0885-8993, DOI: [110.1109/TPEL.2019.2893703](https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2893703), **impakt faktor za 2017: 6.812**

Међународни часопис од врхунских вредности, **M21**

2. **Pažnić 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. **Pažnić 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. **Pažnić 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. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата Милана Пајнића под насловом „Управљање меким прекидањем код двосмерног *buck/boost* претварача засновано на елементу са струјно регулисаним коефицијентом магнетне спреге“, односно „Zero-voltage switching control of an bi-directional buck/boost converter with variable coupled inductor“ је написана на српском језику. Дисертација је у складу са образложењем наведеним у пријави теме и садржи све елементе који се захтевају Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

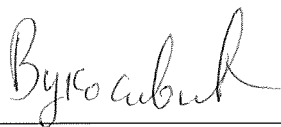
У дисертацији је представљена нова магнетна структура управљиве магнетне спреге и одговарајући аналитички модел који верно описује њено карактеристично понашање, док је сама методологија одређивања параметара нове структуре систематизована у виду прецизно дефинисаних корака. У дисертацији је такође предложен нов метод управљања меким прекидањем код двосмерног енергетског претварача. Метод је имплементиран, а предности његове употребе теоријски и експериментално су верификоване на основу поређења са резултатима других метода предложених у релевантној научној литератури. Доприноси проистекли из ове дисертације имају теоријски значај и примену. Током израде докторске

дисертације кандидат је показао несумњиву способност за самосталан научно-истраживачки рад.

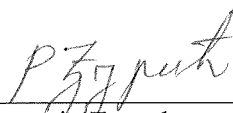
У складу са претходно изнетим, Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под насловом „Управљање меким прекидањем код двосмерног *buck/boost* претварача засновано на елементу са струјно регулисаним коефицијентом магнетне спреге“, односно „Zero-voltage switching control of an bi-directional buck/boost converter with variable coupled inductor“ кандидата Милана Пајнића прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, као и да се после њеног усвајања одобри јавна усмена одбрана дисертације.

У Београду, 23.12.2019,

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



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



др Радивоје Ћурић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



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