

Универзитет у Београду
Електротехнички факултет

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Александре Лекић за израду докторске дисертације

Одлуком бр. 5001/13-1 од 09.11.2016. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Александре Лекић за израду докторске дисертације и научне заснованости теме „Стабилно прекидачко управљање DC-DC конверторима“.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Александра Лекић је рођена 21.09.1989. године у Београду. Завршила је основну школу „Посавски партизани“ у Обреновцу и Гимназију у Обреновцу као вуковац и ђак генерације. На Електротехнички факултет Универзитета у Београду уписала се школске 2008/2009. године. Основне академске студије је завршила 20.06.2012. године са просечном оценом 10 и оценом 10 на дипломском раду под насловом „Спектар струје калема трофазног диодног моста са ESI колом“. На Дан Универзитета 13.09.2013. године проглашена је за студента генерације школске 2011/2012. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. Школске 2012/2013. године уписала се на мастер академске студије на Електротехничком факултету, модул Електроника, и завршила их 10.07.2013. године са просечном оценом 10 и оценом 10 на мастер раду „Симулација прекидачких конвертора на нивоу средњих вредности напона и струја у колу“.

Од децембра 2012. године Александра Лекић је запослена као сарадник у настави на Катедри за електронику, Електротехничког факултета Универзитета у Београду. У марту 2014. године је унапређена у звање асистента на одређено време од три године са пуним радним временом. За време досадашњег радног ангажмана учествовала је у извођењу рачунских и лабораторијских вежби из следећих предмета: Увод у електронику (ОО1УЕ, 13Е041УЕ), Елементи електронике (13Е042ЕЕ), Сигнали и системи (ОЕ2СИС, 13Е042СИС), Практикум из софтверских алата у електроници (13Е042ПСА), Аналогна електроника (ОЕ3АЕ), Енергетска електроника (ОЕ3ЕЕ),

Рачунарска електроника (13E043PE), Линеарна електроника (13E043JE), Техничка документација (13E044TD), РФ електроника (13E044RF, 13M041RF) и Дигитални процесори сигнала (13M041DPS).

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Област истраживања Александре Лекић обухвата енергетску електронику, анализу стабилности електронских кола, пројектовање контроле кола енергетске електронике и симулацију електронских кола. У току рада на факултету од 2014. год. учествује на пројекту „Повећање енергетске ефикасности ХЕ и ТЕ ЕПС-а развојем технологије и уређаја енергетске електронике за регулацију и аутоматизацију“, св. број пројекта ТР33020, који финансира Министарства просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије.

Александра Лекић се на докторске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, изборно подручје Електроника, уписала школске 2013/2014. године. Током досадашњих студија положила је све планом предвиђене испите и то:

Р. бр.	Предмет		Оцена ЕСПБ	
	Акроним	Назив		
1	13Д041ППС	Примена програмабилних система на чипу	10	9
2	13Д041ПМР	Примена микрорачунара	10	9
3	13Д051УСС	Управљање сложеним системима	10	9
4	13Д081СФ	Специјалне функције	10	9
5	13Д091ЕЈ	Енглески језик	10	6
6	13Д041ПНР	Пројектовање наменских рачунарских система	10	9
7	13Д041СМС	Савремени мерни системи	10	9
8	13Д041НСМ	Наменске сензорске мреже	10	9
9	13Д041ОПЕ	Одабрана поглавља из енергетске електронике	10	9
10	13Д081ФАП	Функционална анализа и примене	10	9

Поред положених испита, кандидаткиња је обавила и два студијска истраживачка рада и један научно-стручни рад, што је предвиђено планом докторских студија. Одређен јој је ментор дисертације, професор Вујо Дрндаревић, и период од 2013. до 2016. године провела је у истраживању и припреми дисертације. Тема која је предложена за докторску дисертацију кандидата Александре Лекић припада ужој научној области Електроника и има мултидисциплинарни карактер.

Досадашњи резултати рада кандидата приказани су кроз неколико публикација и то: један рад у врхунском међународном часопису категорије М21, један рад у истакнутом међународном часопису категорије М22, један рад у међународном часопису, један рад у домаћем научном часопису категорије М52, 3 рада на међународним конференцијама категорије М33 и 2 рада на домаћим конференцијама категорије М63. У списку који следи наведене су публикације на којима је Александра Лекић коаутор.

Рад у међународном часопису – M21

- Lekić A., Stipanović D., Hysteresis Switching Control of the Ćuk Converter, IEEE Transactions on Circuits and Systems I—Regular Papers, vol. 63, no. 11, pp. 2048-2061, 2016. ISSN 1549-8328, IF = 2.393, doi: 10.1109/TCSI.2016.2600199

Рад у међународном часопису – M22

- Lekić A., Stipanović D., Hysteresis Switching Control of the Ćuk Converter Operating in Discontinuous Conduction Modes, IEEE Transactions on Circuits and Systems II—Express Briefs, to appear. ISSN 1549-7747, IF = 1.136, doi: 10.1109/TCSII.2016.2631510

Рад у научном часопису

- Lekić, A., Pejović, P., Simulation of Switching Converters on the Level of Averaged Voltages and Currents, Journal of Energy and Power Sources, vol. 1, no. 5, 2014, pp. 233-241. ISSN 2333-9144

Рад у домаћем научном часопису - M52

- Aleksandra Lekić, Dušan Stipanović, LMI Approach for Sliding Mode Control and Analysis of DC-DC Converters, TEHNIKA, vol. 71, no. 5, 2016, pp. 715-723. ISSN 0040-2176

Радови на међународним конференцијама – M33:

- Lekić, A., Pejović, P., Simulation of Switching Converters on the Level of Averaged Voltages and Currents, Proceedings of 17th International Symposium on Power Electronics – Ee, pp. 1-5, 2013, Novi Sad, Serbia. ISBN 978-86-7892-550-4
- Lekić, A., Automated DC-DC Converters Symbolic State-Space Model Generation by the Use of Free Software, Proceedings of 22nd Telecommunications forum TELFOR 2014, pp. 995-998, 2014, Belgrade, Serbia. ISSN 978-1-4799-6191-7
- Janković, S., Popović, I., Lekić, A., Saranovac, L., Proceedings of Power Management for Wireless Sensor Nodes. IcETran-2015, pp. EK11.5.1-EK11.5.4, Srebrno Jezero, Serbia. ISBN 978-86-80509-71-6

Радови на домаћим конференцијама – M63:

- Lekić, A., Merenje ugla snage sinhronе mašine primenom sistema na čipu, Zbornik radova 59. konferencije - Etran 2015, str. EL1.3 1-5, 2015, Srebrno jezero, Srbija. ISBN 978-86-80509-72-3
- Lekić, A., Simulacija prekidačkih konvertora korišćenjem sopstvenih vrednosti i sopstvenih vektora matrice modela stanja, Zbornik radova 60. konferencije - Etran 2016, str. EL1.5 1-6, 2016, Zlatibor, Srbija. ISBN 978-86-7466-618-0

Дана 15.11.2016. године Александра Лекић је полагала испит о подобности теме и кандидата (докторски испит) пред комисијом у саставу: др Милан Прокин, редовни професор, др Драгутин Костић, редовни професор, Саобраћајни факултет Универзитета у Београду, др Александар Ракић, доцент и др Жељко Ђуровић, редовни професор.

Оцена Комисије је да је кандидат Александра Лекић на том испиту добила оцену **задовољава**.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Комисија за оцену подобности теме и кандидата анализирала је претходно наведене чињенице и резултате које је кандидат Александра Лекић остварила током досадашњег образовног процеса и у досадашњем научно-истраживачком раду, како би стекла увид у њене способности за научно-истраживачки рад. Узимајући у обзир посвећеност кандидата у припреми докторске дисертације и до сада остварене резултате, Комисија је мишљења да кандидат има способности да успешно настави започети рад и да је у стању да оствари резултате који могу бити признати и валоризовани и од стране стручне међународне научне заједнице. Став Комисије у вези са наведеним питањима је позитиван и након детаљног образложења саме теме, предложиће да она буде усвојена и да се кандидату омогући да настави са израдом докторске дисертације.

2. Предмет и циљ истраживања

Кола енергетске електронике се користе за ефикасну конверзију и контролу електричне снаге. Конвертори представљају кола енергетске електронике која врше конверзију једносмерног или наизменичног улазног напона или струје у једносмерни или наизменични излазни напон или струју. Према типу улазне и излазне величине деле се на DC-DC конверторе, AC-DC конверторе (исправљачи), DC-AC конверторе (инвертори) и AC-AC конверторе. DC-DC конвертори претварају улазни једносмерни напон или струју у излазни једносмерни напон или струју, при чему се на излазу кола добија појачан или ослабљен улазни напон/струја.

Све израженији захтеви у погледу високих перформанси и што ниже цене, који се постављају пред савремене електронске системе, односе се и на DC-DC конверторе. Поред тога, од DC-DC конвертора се захтева да имају високу ефикасност и што мање димензије. Због тога се развоју и усавршавању прекидачких DC-DC конвертора у последњих неколико година посвећује изузетна пажња. Постоји већи број типова прекидачких конвертора, међутим и даље су у употреби најчешће основни, неизоловани конвертори: *buck*, *boost* и *buck-boost* [1]. Наведени конвертори, који су детаљно описани у литератури [1], и даље су предмет изучавања и усавршавања, као што је случај и са комплекснијим конверторима типа *Ćuk* и *SEPIC* (*Single Ended Primary Inductance Converter*).

Поред неизолованих конвертора, развијени су и многобројни изоловани конвертори, код којих је остварено галванско раздвајање улаза од излаза. Најчешћа реализација раздвајања улаза од излаза конвертора јесте коришћењем трансформатора, који се примењују у нпр. *flyback* конверторима [1]. У последњих неколико година, са даљим развојем интегрисане технологије, све више се користе *switched-capacitor* DC-DC конвертори код којих се конверзија улазне величине у излазну постиже искључиво коришћењем прекидача и кондензатора [2]. Развој ових конвертора је условљен тенденцијом да се калемови што мање користе у интегрисаним колима због њихових великих паразитних отпорности и капацитивности, као и велике површине коју заузимају на чипу.

Како су DC-DC конвертори прекидачка кола састављена од реактивних компонената - калемова и кондензатора и прекидача - диода и транзистора, њима се управља тако што се на управљачку электроду гејт прекидачког транзистора доводи импулсно ширинско модулисани (*Pulse Width Modulated - PWM*) сигнал, те се за ове конверторе користи и назив PWM конвертори. Сигнал помоћу кога се управља конвертором је најчешће периодичан, али може да буде и аperiodичан. Регулација са константном фреквенцијом прекидања се остварује контролом одговарајуће величине у колу на основу чије вредности се дефинише фактор испуњености PWM сигнала. У случају да фреквенција управљачког сигнала није константна, онда се у зависности од вредности контролисане променљиве мења фреквенција прекидања.

Жељена конверзија улазне у излазну величину DC-DC конвертора се постиже пажљивим пројектовањем његове контроле [1]. Контрола се пројектује тако да се добије стабилан систем, са великом фазном маргином, жељеном фреквенцијом прекидања, кратком ивицом раста сигнала, брзом реакцијом на промене и што једноставнијом реализацијом. Због тога постоји стална потреба за усавршавањем контроле конвертора и развојем нових алгоритама управљања. Захваљујући појави микропроцесора, микроконтролера и дигиталних процесора сигнала, који су једноставни за програмирање и широко присутни на тржишту, посебан акценат је стављен на дигиталну контролу [3]. Овакаво стање технологије омогућило је да се убрзано развијају алгоритми који се могу лако имплементирати коришћењем дигиталних процесора сигнала.

Стандардне методе контроле DC-DC конвертора се заснивају на примени PID регулатора, при чему се DC-DC конвертор представља његовим моделом са усредњеним напонима и струјама и то најчешће само за рад конвертора у континуалном режиму [4-5]. Развијени су бројни алгоритми за усредњавање напона и струја у колу [5], од којих је најчешће примењивано усредњавање у простору стања (*state-space averaging*). Често примењивана метода је и метода програмирања струје (*Current Mode Control*), која поред својих предности у ограничавању струје често доводи до појаве хаотичног понашања конвертора [6].

Поред стандардних метода контроле развијене су и бројне друге, као што су *sliding-mode* контрола и хистерезисна контрола. *Sliding-mode* контрола [7] се заснива на постављању прекидачке површине по којој се „крећу“ променљиве стања у току рада конвертора. За разлику од PID регулације, *sliding-mode* контрола узрокује мање динамичке губитке на прекидачима и даје већу фазну маргину функције преноса конвертора. Са друге стране, хистерезисна контрола представља облик хибридне контроле [8-9], која је карактеристична за системе који имају и континуалну и дискретну динамику у колу. У DC-DC конверторима континуалне величине су променљиве стања (струје калемова и напони кондензатора), док је дискретна динамика дефинисана радом прекидача. Посматрањем прекидача као дела кола са дискретном динамиком, могу се задати критеријуми његовог прекидања.

Конструкцијом функције Љапунова квадратне форме која је позитивна за све вредности променљивих стања осим у еквилибријуму, при чему јој је извод негативан, показује се да је систем стабилан по Љапунову. Уколико се дефинише прекидање система на основу минимума извода функције Љапунова, постиже се захтевана стабилност система. За одређивање функције Љапунова погодна је применити линеарне матричне неједначине и конвексно програмирање [11-12]. Хистерезисна контрола са прекидањем на основу минималне вредности извода функције Љапунова увек гарантује стабилност која се добија директно на основу пројектоване контроле.

Циљ истраживања у оквиру предложене докторске дисертације је изналажење контроле која даје стабилно прекидачко управљање DC-DC конверторима. Контрола ће

бити анализирана са аспекта стабилности система и комплексности њене реализације. У оквиру планираних истраживања посебна пажња биће посвећена стабилној хистерезисној и *sliding-mode* контроли DC-DC конвертора. Наведена два типа контроле су посебно значајна јер дају велику фазну маргину функције преноса конвертора и мање динамичке губитке на прекидачима, док су са становишта времена успона узлазне ивице сигнала и стабилности сличне као и PID регулација.

Реализација хистерезисне контроле са прекидањем на основу минималне вредности извода функције Љапунова гарантује стабилност рада конвертора, док се *sliding-mode* контролом постиже једноставна реализација контролера коришћењем унапред дефинисане прекидачке површине. Посебан акценат ће бити стављен на реализацију контроле за Ćuk конвертор чији се континуални режим рада одвија између два гранично стабилна система, што чини пројектовање његове контроле и процену функције Љапунова веома захтевним. Прикључивање између два гранично стабилна система даје квадратну функцију Љапунова, чији извод садржи специфичне семидефинитне квадратне форме које до сада нису анализиране у литератури.

Релевантни радови из области истраживања

- [1] Erickson, Robert W., and Maksimovic D., Fundamentals of power electronics. Springer Science & Business Media, 2007.
- [2] Seeman MD, Sanders SR., "Analysis and optimization of switched-capacitor DC-DC converters," IEEE transactions on power electronics, 2008 Mar; 23(2): 841-51.
- [3] Patella BJ, Prodic A, Zirger A, Maksimovic D. High-frequency digital PWM controller IC for DC-DC converters. IEEE Transactions on Power electronics. 2003 Jan;18(1): 438-46.
- [4] Middlebrook, Richard D., and Cuk S., "A general unified approach to modelling switching-converter power stages", Power Electronics Specialists Conference, IEEE, 1976., pp. 18-34.
- [5] Maksimović D., et al. "Modeling and simulation of power electronic converters." Proceedings of the IEEE 89.6 (2001): 898-912.
- [6] Di Bernardo, Mario, et al. "Switchings, bifurcations, and chaos in DC/DC converters." IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications 45.2 (1998): 133-141.
- [7] Vadim IU., "Survey paper variable structure systems with sliding modes," IEEE Transactions on Automatic control, 1977 Apr; 22(2): 212-22.
- [8] Ye, Hui, Anthony N. Michel, and Ling Hou, "Stability theory for hybrid dynamical systems," IEEE transactions on automatic control 43.4 (1998): 461-474.
- [9] Lin, Hai, and Panos J. Antsaklis. "Stability and stabilizability of switched linear systems: a survey of recent results." IEEE Transactions on Automatic Control 54.2 (2009): 308-322.
- [10] Branicky MS. Multiple Lyapunov functions and other analysis tools for switched and hybrid systems. IEEE Transactions on automatic control. 1998 Apr; 43(4): 475-82.
- [11] Boyd, Stephen P., et al. Linear matrix inequalities in system and control theory. Vol. 15. Philadelphia: Society for industrial and applied mathematics, 1994.
- [12] Boyd, Stephen, and Lieven Vandenberghe, Convex optimization, Cambridge university press, 2004.
- [13] Martinez-Salamero L, Calvente J, Giral R, Poveda A, Fossas E, "Analysis of a bidirectional coupled-inductor Cuk converter operating in sliding mode," IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 1998 Apr; 45(4): 355-63.

3. Полазне хипотезе

Хипотезе на основу којих ће се спровести истраживања у оквиру предложене докторске дисертације су:

- Могуће је регулисати DC-DC конвертор прикључивањем по минимуму извода функције Љапунова.
- Хистерезисна контрола по минимуму извода функције Љапунова увек гарантује стабилност система.
- Могуће је пројектовати хистерезисну контролу само познавањем вредности испуњености импулса и фреквенције прекидања управљачког PWM сигнала. На основу вредности испуњености импулса и фреквенције прекидања се могу проценити сви могући режими рада и прикључивања хистерезисно контролисаног DC-DC конвертора.

4. Научне методе истраживања

Научне методе које ће бити примењене у изради ове докторске дисертације обухватају примену комбинованих теоријских и симулационих метода у циљу решавања напред наведених проблема. У првом делу докторске дисертације биће теоријски обрађени и анализирани постојећи алгоритми контроле DC-DC конвертора и биће извршена њихова компаративна анализа са становишта стабилности. У другом делу докторске дисертације биће вршена анализа, симулација и синтеза *sliding mode* и хистерезисне контроле DC/DC конвертора и биће презентирани резултати којим се верификује рад пројектованих кола.

Хистерезисна регулација ће бити пројектована у неколико корака:

- На основу вредности елемената у колу DC-DC конвертора одредиће се позитивно дефинитна матрица квадратне функције Љапунова и матрице које одговарају изводу функције Љапунова.
- Биће развијен алгоритам за одређивање потребних матрица применом линеарних матричних неједначина и одговарајућих компјутерских алата.
- За одабране вредности испуњености импулса и периоде прекидања PWM сигнала биће одређени прагови хистерезиса којима се постиже жељена регулација.

Нова управљачка стратегија биће имплементирана коришћењем развојних алата MATLAB и CVX и тестирана на моделу Ćuk конвертора.

5. Очекивани научни допринос

У овом раду се очекују следећи научни доприноси:

- Предлог новог алгоритма за одређивање функције Љапунова код DC-DC конвертора који ради у континуалном режиму чији су подсистеми гранично стабилни.

- Развој ефикасног алгоритма за пројектовање хистерезисне контроле DC-DC конвертора. Примена предложеног новог алгоритма даће могућност пројектовања стабилног системом контроле који је једноставан за реализацију. Биће показано да се стабилност система са хистерезисном контролом може обезбедити прекључивањем на основу минимума извода функције Љапунова.
- Процена стабилности рада конвертора за пројектовну контролу и анализа режима рада конвертора у континуалним и дисконтинуалним режимима у зависности од интерних и екстерних прикључивања конвертора.
- Симулациона анализа и потврда предложене стратегије контроле и имплементација и верификација нове методе регулације на примеру Ćuk конвертора као једног од најкомплекснијих DC-DC конвертора чија су оба континуална режима гранично стабилна.
- Експериментална верификација пројектоване контроле на одабраном примеру прекидачког конвертора.

6. План истраживања и структура рада

План истраживања у оквиру ове дисертације састоји се из неколико кључних корака:

- Почетна фаза истраживања односи се на преглед литературе која се бави управљањем прекидачких DC-DC конвертора, могућностима управљања и моделирања оваквих кола и детаљне анализе проблема стабилне контроле DC-DC конвертора.
- Затим, на основу спроведене анализе, биће студирани режими рада DC-DC конвертора и биће процењена стабилност конвертора у континуалном режиму рада.
- Применом линеарних матричних неједначина и конвексног програмирања одредиће се функција Љапунова која гарантује стабилност рада конвертора у континуалном режиму рада. Остварени резултати требало би да послуже као основа за пројектовање једноставне *sliding mode* и хистерезисне контроле.
- Имплементација предложених решења на примеру Ćuk конвертора, као једног од најкомплекснијих DC-DC конвертора, и експериментална верификација на одабраном примеру конвертора.
- Анализа добијених резултата, издвајање предности предложене методологије и лоцирање ограничења у примени.

Структура саме дисертације ће у великој мери пратити наведене фазе истраживања. Осим уводног поглавља предвиђено је једно поглавље прегледног типа која ће управо бити посвећена концепту стабилности динамичких система и анализи DC-DC конвертора. Централна три поглавља дисертације ће садржати анализу пројектовања контроле DC-DC конвертора, процену стабилности, као и детаљну анализу добијених резултата. Последња два поглавља садржаће закључке и коришћену литературу, респективно.

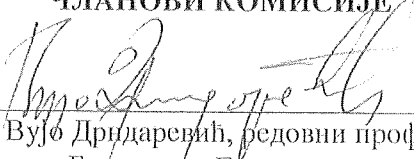
7. Закључак и предлог

На основу приложене документације, као и непосредног увида у резултате досадашњег рада кандидата Александре Лекић, маг. инжењера електротехнике и рачунарства, који су показани у фази истраживања у оквиру докторске дисертације, њеног ангажовања као сарадника на Електротехничком факултету Универзитета у Београду и њеног истраживачког искуства, Комисија је стекла неспорни утисак да кандидат јесте способна за научно-истраживачки рад и за реализацију планираних истраживања. Анализирајући предложену тему под насловом „Стабилно прекидачко управљање DC-DC конверторима“ Комисија је дошла до закључка да је тема актуелна и у научном смислу значајна и, имајући у виду наведене циљеве, очекиване резултате и доприносе, Комисија је сагласна да оваква тема задовољава све услове подобности за докторску дисертацију. Комисија констатује да ова тема припада ужој научној области Електроника, да Електротехнички факултет Универзитета у Београду јесте матичан за ову научну област, и при томе за ментора ове докторске дисертације предлаже др Вуја Дридаревића, редовног професора запосленог на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. У контексту овог предлога, уз извештај је приложен списак радова који квалификују проф. др Вуја Дридаревића за ментора.

На основу свега наведеног Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да прихвати тему докторске дисертације „Стабилно прекидачко управљање DC-DC конверторима“ и да кандидату Александри Лекић омогући да приступи њеној изради.

У Београду, 25. новембар 2016. год.

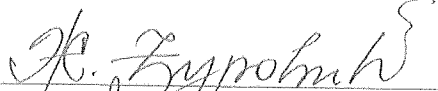
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ


Др Вујо Дридаревић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


Др Милан Прокин, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


Др Драгутин Костић, редовни професор
Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет


Др Александар Ракић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


Др Жељко Ђуровић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет