

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Ђорђа Лекића, дипломираног инжењера електротехнике - мастер за израду докторске дисертације

Одлуком бр. 5005/16-1 од 31. јануара 2022. године, а на основу закључака и записника са 869. седнице Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду која је одржана 19. јануара 2022. године, именовани смо у Комисију за оцену подобности теме и кандидата Ђорђа Лекића, дипломираног инжењера електротехнике – мастер, за израду докторске дисертације и научне заснованости теме под насловом: **„Рачунарски подржано оптимално пројектовање синхроних мотора са сталним магнетима засновано на методи коначних елемената и диференцијалној еволуцији“**

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци:

Ђорђе Лекић је рођен 25. јуна 1990. године у Градишци, Република Српска, Босна и Херцеговина, где је завршио основну школу 2005. године и Гимназију општег смера 2009. године. Студије на Електротехничком факултету Универзитета у Бањој Луци започео је школске 2009/2010. године на одсеку за Електроенергетске и индустријске системе. Дипломирао је 26.09.2013. године на тему „Развој регулисаног електромоторног погона са синхроним мотором“ са просечном оценом 9,70. Добитник је признања за најбољег студента на свим годинама студија на одсеку Електроенергетски и индустријски системи на Електротехничком факултету Универзитета у Бањој Луци у генерацији 2009/2010, као и Златне плакете Универзитета у Бањој Луци за постигнут успех на основном студију и завршетак студија у року.

Након завршетка основних студија 2013. године, школовање је наставио на мастер студијама, такође на Електротехничком факултету Универзитета у Бањој Луци на одсеку за Електроенергетске и индустријске системе. Завршни рад другог циклуса студија је одбранио 11.10.2016. године на тему „Електромагнетни и термички прорачун полифазног торусног индуктора“ са просечном оценом 10,00.

Након завршетка мастер студија 2016. године, школовање је наставио на докторским академским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду на модулу за Енергетске претварааче и погоне. Положио је све испите предвиђене планом студија са

просечном оценом 10,00. Тренутно ради на изради докторске тезе на тему рачунарски подржаног оптималног пројектовања синхроних мотора са сталним магнетима заснованог на методи коначних елемената и диференцијалној еволуцији, под менторством проф. др Слободана Вукосавића.

Од 2013. године је запослен на Катедри за електроенергетику Електротехничког факултета Универзитета у Бањој Луци, где је тренутно ангажован као виши асистент на предметима: Основи електронике, Енергетска електроника, Електричне машине 1, Електричне машине 2, Испитивање електричних машина, Електромоторни погони, Регулација електромоторних погона, Дигитално управљање претварачима и погонима, Специјалне електричне машине и Вишемоторни погони.

Добитник је награде ETF BAFA (Belgrade Alumni and Friends Association) USA Scholarship for PhD Students за 2019/2020. годину. Био је стипендиста Фонда др Милан Јелић Републике Српске као студент докторских студија у 2018/2019. години, те као студент мастер студија у 2013/2014. години. Рецензент је за научне часописе: *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *IEEE Transactions on Energy Conversion* и *IET Electric Power Applications*. Активно говори и пише енглески и немачки језик.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство:

Кандидат Ђорђе Лекић, дипломирани инжењер електротехнике – мастер, уписао је докторске академске студије на Електротехничком факултету 2016. године на модулу Енергетски претварачи и погони.

У току докторских академских студија, до доношења захтева за одобрење теме докторске дисертације, Ђорђе Лекић је испунио све обавезе предвиђене Студијским планом и програмом, чиме је остварио укупно 120 ЕСПБ бодова. Положио је следеће испите:

1. Општа теорија електричних машина (оцена: 10, ЕСПБ: 9),
2. Микропроцесорско управљање електромоторним погонима (оцена: 10, ЕСПБ: 9),
3. Енергетски претварачи (оцена: 10, ЕСПБ: 9),
4. Метода коначних елемената у електромагнетици (оцена: 10, ЕСПБ: 9),
5. Математичко моделовање физичко-техничких процеса (оцена: 10, ЕСПБ: 9),
6. Прелазне појаве у електричним машинама (оцена: 10, ЕСПБ: 9),
7. Математичко моделирање у електротермији (оцена: 10, ЕСПБ: 9),
8. Управљање енергетским претварачима (оцена: 10, ЕСПБ: 9),
9. Вишемоторни електрични погони (оцена: 10, ЕСПБ: 9),
10. Немачки језик (оцена: 10, ЕСПБ: 6).

Испунио је следеће научне и истраживачке обавезе:

1. Научно стручни рад (ЕСПБ: 3),
2. Студијски истраживачки рад I (ЕСПБ: 15),
3. Студијски истраживачки рад II (ЕСПБ: 15).

У оквиру теме докторске дисертације, кандидат Ђорђе Лекић је објавио три рада у научним часописима међународног значаја са SCI листе (два у категорији M21, један у категорији M22). Такође, аутор је једног научног рада у часопису националног значаја у категорији M53. Аутор је три научна рада у зборницима регионалних научних скупова и скупова националног значаја.

1.3. Публиковани радови:

M20

- 1) [M21] **Đ. Lekić** and S. Vukosavić, "Split Ratio Optimization of High Torque Density PM BLDC Machines Considering Copper Loss Density Limitation and Stator Slot Leakage," in *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 100, pp. 231-239, Sep. 2018. doi: [10.1016/j.ijepes.2018.02.029](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.02.029)
- 2) [M22] **Đ. Lekić** and S. Vukosavić, "Computationally Efficient Steady-State Finite Element Simulation of Multiphase PM AC Machines," in *IET Electric Power Applications*, vol. 14, no. 7, pp. 1228 – 1237, Jul. 2020. doi: [10.1049/iet-epa.2019.0922](https://doi.org/10.1049/iet-epa.2019.0922)
- 3) [M23] **Đ. Lekić**, S.N. Vukosavić, "Optimization of Multiphase Single-layer Winding End-connections by Differential Evolution," in *Electrical Engineering*, Jan. 2022. doi: [10.1007/s00202-022-01498-4](https://doi.org/10.1007/s00202-022-01498-4)

M50

- 4) [M53] **Đ. Lekić** and S. Vukosavić, "Finite Element Design of Rotor Permanent Magnet Flux Switching Machine with Arbitrary Slot, Pole and Phase Combinations," in *Electronics*, vol. 22, no. 2, pp. 93-104, Dec. 2018. doi: [10.7251/ELS1822093L](https://doi.org/10.7251/ELS1822093L)

M60

- 5) [M63] **Đ. Lekić** and S. Vukosavić, "Program for Finite Element Based Design of Rotor Permanent Magnet Flux Switching Machine," in *2018 International Symposium on Industrial Electronics (INDEL)*, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, pp. 1-7, 1-3 Nov. 2018. doi: [10.1109/INDEL.2018.8637615](https://doi.org/10.1109/INDEL.2018.8637615)
- 6) [M63] **Đ. Lekić** and S. Vukosavić, "Calculation of Optimal Rotor Permanent Magnet Dimensions for RPMFS Machine," in *2018 17th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*, East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, Bosnia and Herzegovina, pp. 1-6, 21-23 Mar. 2018. doi: [10.1109/INFOTEH.2018.8345516](https://doi.org/10.1109/INFOTEH.2018.8345516)
- 7) [M63] **Ђ. Лекић**, С. Вукосавић, „Аналитичка метода за прорачун оптималног односа унутрашњег и вањског пречника статора BLDC мотора“, *XVI међународни научно-стручни симпозијум ИНФОТЕХ – ЈАХОРИНА 2017*, 22-24. март 2017.

Кандидат Ђорђе Лекић је 14. фебруара 2022. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду јавно усмено бранио предложену тему докторске дисертације, при чему је комисија у саставу:

1. др Драган Милић, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
2. др Жарко Јанда, виши научни сарадник, Електротехнички институт Никола Тесла Универзитет у Београду – Електротехнички Институт Никола Тесла,
3. др Драган Олћан, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,

закључила да је кандидат Ђорђе Лекић на јавној усменој одбрани предложене теме докторске дисертације добио оцену **задовољно** и да задовољава потребне услове за рад на предложеној теми докторске дисертације на Електротехничком факултету Универзитета у Београду.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

На основу резултата које је кандидат постигао у свом досадашњем стручном и научном раду, а од којих бисмо издвојили следеће:

- кандидат је сакупио сто двадесет (120) ЕСПБ (полагањем испита на докторским академским студијама и обављањем научно-истраживачких обавеза),
- дана 14. фебруара 2022. године је јавно одбранио тему докторске дисертације пред Комисијом (др Драган Мухић, доцент, др Жарко Јанда, виши научни сарадник, др Драган Олћан, ванредни професор) формираном од стране Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду на седници број 869. од дана 19. јануара 2022. године,
- публикавање три рада у научним часописима међународног значаја са SCI листе, једног научног рада у часопису националног значаја, као и три научна рада у зборницима регионалних научних скупова и скупова националног значаја из области предложене теме докторске дисертације,
- остварено искуство из области коју покрива предложена тема докторске дисертације које је стекао кроз осам година рада у наставном процесу, научно-истраживачким и стручним пројектима на Електротехничком факултету Универзитета у Бањој Луци,

можемо закључити да кандидат Ђорђе Лекић у сваком погледу испуњава услове који га квалификују да приступи изради докторске дисертације са предложеном темом.

2. Предмет и циљ истраживања

Примена електромеханичког претварања енергије у обновљивим изворима електричне енергије, у индустријској роботизи, друмским возилима, бродовима и летилицама на електрични погон ствара потребу за развојем и пројектовањем електричних машина са увећаним специфичним моментом, смањеним губицима и мањим утроском проводника и феромагнетика. Оптимално пројектовање и предвиђање карактеристика нових врста електричних машина потребно је убрзати и аутоматизовати. Уобичајени поступци пројектовања електричних машина су дуготрајни, они захтевају значајан број инжењерских радних сати проведених у итеративним прорачунима, изради и испитивању прототипова, док је корекције и побољшања могуће спровести тек на основу испитивања и прикупљених емпиријских података. Постепено усавршавање пројекта електричне машине на овај начин може потрајати и више деценија, што је недопустиво у данашњим условима убрзаног индустријског развоја и тржишне конкуренције. Супротно захтевима за скраћеним трајањем фазе пројектовања, од савремених електричних машина се захтевају све боље перформансе уз све значајнија ограничења. Наиме, услед ограничене доступности примарних сировина (бабра, гвожђа и сталних магнета) савремене електричне машине морају бити пројектоване уз минимални утросак материјала, тј. морају остварити тражене експлоатационе карактеристике уз минималну масу и/или запремину. За електричне моторе у електричним возилима пожељне су неке кључне карактеристике, какав је велики специфични моменат и мала валовитост момента. Поред уштеде у материјалу, велики специфични моменат је пожељан због ограниченог простора за уградњу мотора, док је мала валовитост момента пожељна да би се обезбедио миран ход мотора (рад без вибрација) и низак ниво буке. Слични захтеви се јављају и у области индустријске роботике као и код обновљивих извора. Наведене захтеве је тешко испунити применом конвенционалних електричних машина, што је увећало интерес за развој нових врста машина, најчешће синхроног типа (нпр. *Flux Switching*, *Axial Flux*, *Vernier* итд.), које се одликују великом разноврсношћу геометрије магнетског кола и новим решењима изведбе намотаја. Управо ова разноврсност отежава коришћење досадашњих искустава и проналажење оптималних решења.

За решавање наведених проблема потребно је развити методе које би укључиле досадашња инжењерска искуства у алгоритам који аутоматизује поједине фазе пројектовања, верификације међурешења и унапређења дизајна, са елементима доношења одлука који могу подсећати на интелигенцију. Развој машински аутоматизованог поступка оптималног пројектовања електричних машина подразумева свођење процеса пројектовања на сет дискретних одлука, а сам објекат оптимизације (електричну машину) на скуп континуалних и дискретних параметара, те свођење кључних фаза пројектовања на претраживање хибридног (дискретно-континуалног) параметарског простора. Под континуално променљивим параметрима електричне машине подразумевамо геометријске димензије магнетских кола, струјних кола, система за хлађење и механичке позиције, док под дискретним параметрима подразумевамо број жлебова, полова и фаза, као и дискретне вредности пречника проводника. Скуп параметара је у основи веома велики, али се, уз примену инжењерског искуства у области пројектовања електричних машина, скуп може редукovati на параметре који доминантно утичу на исход. Свеобухватно укључивање наведених дискретних параметара у поступак аутоматизованог оптималног пројектовања електричних машина није решено у референтној литератури и представља један од основних предмета истраживања у предложеној дисертацији.

Преглед савремених техника у области пројектовања и оптимизације обртних електричних машина је дат у раду [1], где се посебан акценат ставља на потпуну аутоматизацију процеса пројектовања, на укључивање што већег броја параметара машине у оптимизацију применом метахеуристичких метода, те на примену рачунски ефикасних симулација заснованих на методи коначних елемената (МКЕ, енг. *FEM – Finite Element Method*). Метахеуристичке методе су итеративне методе које користе моделе засноване на природним процесима, вештачкој интелигенцији и стохастичком претраживању за решавање нелинеарних оптимизационих проблема са великим бројем димензија. Међу мноштвом метахеуристичких алгоритама, у области пројектовања електричних машина се највише користи *диференцијална еволуција* [2]-[4], јер показује значајне предности у погледу брзине и стабилности конвергенције у поређењу са другим алгоритмима [5], док истовремено омогућава једноставно укључивање, како континуалних, тако и дискретних варијабли у поступак вишекритеријумске оптимизације [6]. Примена МКЕ гарантује високу тачност резултата оптимизације, јер се на тај начин у обзир узима нелинеарност феромагнетског језгра. Међутим, дуго трајање симулација и даље представља значајну препреку за ширу примену МКЕ у пројектовању и оптимизацији електричних машина. Како је у процесу оптимизације потребно симулирати на стотине различитих машина пре него што се дође до оптималне, јавља се потреба да се минимизира трајање сваке од сукцесивних симулација, као и да се смањи укупан број симулација применом аналитичких поступака који експлоатишу просторну симетрију у геометрији машине као и временску симетрију и периодичност у симулираним таласним облицима [7]-[10]. Генерализација наведених поступака и њихова примена у рачунски ефикасној оптимизацији електричних машина са произвољним бројем жлебова, полова и фаза такође представља један од предмета истраживања у овој дисертацији, који је уско везан за убрзавање процеса оптималног пројектовања електричних машина.

Укључивање дискретних варијабли у поступак оптимизације електричних машина је условљено развојем алгоритама за моделовање намотаја. Савремена истраживања у области намотаја електричних машина показују општу тежњу ка аутоматизацији процеса формирања намотаја на основу уопштених математичких формализама [11]-[13]. Ова тежња је последица примене разноврсних комбинација дискретних бројева жлебова, полова и фаза при пројектовању и оптимизацији савремених електричних машина са разломљеним бројем жлебова по полу и фази (енг. *FSW – Fractional Slot Windings*), где изведба намотаја утиче на специфични обртни моменат преко навојног сачиниоца за основни хармоник, док однос броја жлебова и полова доминантно утиче на валовитост обртног момента [14]. Алгоритми за

аутоматско формирање бочних веза намотаја развијени су само за вишеслојне намотаје [2]-[4], док проблематика аутоматског формирања бочних веза једнослојних намотаја није третирана у референтној литератури. Иако једнослојни намотаји имају већа хармонијска изобличења магнетопобудне силе, они се одликују и већим вредностима фактора испуне жлеба. Алгоритми развијени у [15]-[17] емулирају процес попуњавања жлебова проводницима и омогућавају реалну процену вредности фактора испуне у функцији дискретних вредности пречника округлог бакарног проводника дефинисаних ИЕС стандардом [18]. С аспекта вредности специфичног обртног момента и губитака у бакру, пожељно је да фактор испуне буде максималан. Међутим, ширина отвора жлеба, која значајно утиче на валовитост обртног момента [18], условљава могућу вредност пречника проводника (проводник мора несметано проћи кроз отвор жлеба), тако да пречник проводника којим се остварује максималан фактор испуне не може да се одреди независно од ширине отвора самог жлеба, тј. од валовитости обртног момента. У [15]-[17] је потврђено да је фактор испуне нелинеарна функција пречника и броја проводника у жлебу, дебљине изолације, као и димензија самог жлеба, те се као такав не може сматрати константним и једнаким за све машине разматране у поступку оптимизације. Из свега наведеног следи да је, у области оптималног пројектовања електричних машина, потребно посветити већу пажњу реалном моделовању намотаја и расподеле проводника у жлебу него што је то учињено у референтној литератури.

Анализирана литература показује да је за свеобухватну оптимизацију електричних машина потребно, поред континуалних параметара (димензија магнетског кола), узети у обзир и различите дискретне параметре (број жлебова, полова и фаза), те да је потребно реалније моделовати намотаје и расподелу проводника у жлебу. Да би се овако проширен сет параметара могао успешно претражити, потребно је развити нови метахеуристички поступак оптимизације који ће максимално користити досадашња знања и искуства пројектанта (кроз унапред дефинисане критеријуме, ограничења и дискретне одлуке) као и могућности рачунара и убрзаних симулација на бази МКЕ, да би се циклус проналаaska најбољег решења за пројекат сваке машине што више скратио. Развој описаног поступка и његова примена на свеобухватну оптимизацију специфичног момента и валовитости момента синхроних мотора са сталним магнетима представља основни правац рада у предложеној дисертацији.

Релевантни библиографски извори:

Најзначајнији библиографски извори који се односе на истраживање из области теме докторске дисертације наведени су у следећој листи:

- [1] G. Bramerdorfer, J. A. Tapia, J. J. Pyrhönen and A. Cavagnino, "Modern Electrical Machine Design Optimization: Techniques, Trends, and Best Practices," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 10, pp. 7672 - 7684, Feb. 2018.
- [2] A. M. Silva, F. J. T. E. Ferreira, M. V. Cistelecan and C. H. Antunes, "Multiobjective Design Optimization of Generalized Multilayer Multiphase AC Winding," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 34, no. 4, pp. 2158-2167, Dec. 2019.
- [3] A. M. Silva, C. H. Antunes, A. M. S. Mendes and F. J. T. E. Ferreira, "On Phase Shifting and Diversified Coil-Pitch for Enhanced Multiobjective Winding Design Optimization," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 36, no. 3, pp. 2002-2011, Sept. 2021.
- [4] A. M. Silva, F. J. T. E. Ferreira, and C. H. Antunes, "A hybrid multiobjective differential evolution approach to stator winding optimization," in *Appl. Evol. Comput.*, P. Kaufmann and P. A. Castillo, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 64-71
- [5] S. Das and P. N. Suganthan, "Differential Evolution: A Survey of the State-of-the-Art," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 15, no. 1, pp. 4-31, Feb. 2011.
- [6] J. Lampinen, I. Zelinka, "Mixed Integer-Discrete-Continuous Optimization by Differential Evolution, Part 1: the optimization method," in *Proc. MENDEL'99, 5th Int. Mendel Conf. Soft Comput.*, Brno, Czech Republic, June 9.-12. 1999, pp. 71-76

- [7] G. Bramerdorfer, A. Zăvoianu, S. Silber, E. Lughofer and W. Amrhein, "Possibilities for Speeding Up the FE-Based Optimization of Electrical Machines—A Case Study," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 6, pp. 4668-4677, Nov.-Dec. 2016.
- [8] H. Chen, X. Liu, N. A. O. Demerdash, A. M. EL-Refai, Z. Chen and J. He, "Computationally Efficient Optimization of a Five-Phase Flux-Switching PM Machine Under Different Operating Conditions," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 7, pp. 6495-6508, July 2019.
- [9] G. Y. Sizov, D. M. Ionel and N. A. O. Demerdash, "Modeling and Parametric Design of Permanent-Magnet AC Machines Using Computationally Efficient Finite-Element Analysis," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 6, pp. 2403-2413, June 2012.
- [10] D. M. Ionel and M. Popescu, "Ultrafast Finite-Element Analysis of Brushless PM Machines Based on Space-Time Transformations," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no. 2, pp. 744 - 753, Mar.-Apr. 2011.
- [11] J. Germishuizen and A. Kremser, "Algebraic Design of Symmetrical Windings for AC Machines," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 57, no. 3, pp. 1928-1934, May-June 2021.
- [12] M. Caruso, A. D. Tommaso, F. Marignetti, R. Miceli and G. Galluzzo, "A General Mathematical Formulation for Winding Layout Arrangement of Electrical Machines," *Energies*, vol. 11, no. 2, pp. 446-470, Feb. 2018.
- [13] A. O. D. Tommaso, F. Genduso and R. Miceli, "A New Software Tool for Design, Optimization, and Complete Analysis of Rotating Electrical Machines Windings," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 4, pp. 1-10, Apr. 2015.
- [14] E. Fornasiero, L. Alberti, N. Bianchi and S. Bolognani, "Considerations on Selecting Fractional-Slot Nonoverlapped Coil Windings," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 3, pp. 1316-1324, May-June 2013.
- [15] A. Dietz, A. O. Di Tommaso, F. Marignetti, R. Miceli, and C. Nevoloso, "Enhanced Flexible Algorithm for the Optimization of Slot Filling Factors in Electrical Machines," *Energies*, vol. 13, Feb. 2020.
- [16] P. Herrmann, P. Stenzel, U. Vögele and C. Endisch, "Optimization algorithms for maximizing the slot filling factor of technically feasible slot geometries and winding layouts," *2016 6th Int. Electric Drives Prod. Conf. (EDPC)*, 2016, pp. 149-155.
- [17] N. Raabe, "An algorithm for the filling factor calculation of electrical machines standard slots," *2014 Int. Conf. Electric Mach. (ICEM)*, 2014, pp. 981-986.
- [18] IEC 60317-0-1 Specifications for particular types of winding wires Part 0-1: General requirements - Enamelled round copper wire, 2008.

3. Полазне хипотезе

Полазне хипотезе за истраживање у склопу предложене докторске дисертације су:

- Укључивањем дискретних параметара (броја жлебова, полова и фаза) у поступак рачунарски аутоматизоване метахеуристичке оптимизације синхроних мотора са сталним магнетима, повећава се разноврсност разматраних оптималних решења и отвара се могућност проналаска иновативних решења до којих не би било могуће доћи у кратком времену применом конвенционалних метода пројектовања.
- За сваки мотор разматран у процесу оптимизације, који у општем случају може имати произвољан број жлебова, полова и фаза, могуће је одредити теоријски минималан број магнетостатичких симулација методом коначних елемената, које је неопходно извршити да би се реконструисала једна пуна периода основног хармоника флуksних обухвата и електромоторних сила свих фазних намотаја, као и електромагнетског момента. Реконструкција таласних облика се заснива на уопштеним једначинама које је могуће аналитички извести за сваку комбинацију броја жлебова, полова и фаза, узимајући у обзир временску симетрију и периодичност у симулираним таласним облицима. На тај начин се скраћује време трајања сваке симулације и убрзава се процес оптималног пројектовања помоћу рачунара.
- Начин формирања бочних веза намотаја (који зависи од броја жлебова, полова и фаза) као и вредност фактора испуне (која зависи од пречника, расподеле и броја проводника унутар жлеба, те од димензија жлеба) се не могу сматрати идентичним за

све моторе разматране у поступку оптимизације. Реалнијим моделовањем тродимензионалне геометрије бочних веза намотаја, као и расподеле проводника унутар жлеба, могуће је тачније узети у обзир разлике у перформансама синхроних мотора са различитим комбинацијама броја жлебова, полова и фаза, што омогућава проналажење оптималних машина са мањим утрошком бакра, мањим губицима и већим специфичним моментом него када би се утицај изведбе бочних веза занемарио, а фактор испуне сматрао константним за све моторе у оптимизационом поступку.

- Циљеви свеобухватног оптималног пројектовања синхроног мотора са сталним магнетима су увећање специфичног момента и умањење валовитости момента кроз варијацију проширеног сета континуалних и дискретних параметара мотора. Наведени критеријуми се могу оптимизовати развојем наменског метахеуристичког поступка оптимизације који ће максимално користити досадашња знања и искуства пројектанта (кроз унапред дефинисане критеријуме, ограничења и дискретне одлуке) као и могућности рачунара и убрзаних симулација методом коначних елемената.

4. Научне методе истраживања

У овој дисертацији биће примењене следеће методе истраживања:

- Развој нове свеобухватне методологије рачунарски аутоматизованог пројектовања синхроних мотора са сталним магнетима засноване на примени рачунски ефикасних симулација методом коначних елемената и алгоритма диференцијалне еволуције, која поред варијације континуалних геометријских димензија мотора узима у обзир и варијацију дискретних параметара намотаја те омогућује да се одреди оптимална комбинација броја жлебова, полова и фаза која ће резултовати максималним специфичним моментом и минималном валовитошћу момента.
- Развој уопштене методологије за реконструкцију таласних облика фазних величина и електромагнетског момента синхроних мотора са сталним магнетима и произвољним бројем жлебова, полова и фаза на основу минималног броја магнетостатичких симулација методом коначних елемената.
- Развој уопштене методологије за оптимално формирање бочних веза једнослојних намотаја са произвољним бројем жлебова, полова и фаза, засноване на алгоритму диференцијалне еволуције.
- Развој нумеричких алгоритама за естимацију фактора испуне жлеба бакром за произвољну геометрију жлеба, пречника и броја проводника у жлебу, као и за једнослојне и двослојне намотаје.
- Примена методологије за аутоматизовано генерисање дводимензионих симулационих модела синхроних мотора са произвољним бројем жлебова, полова и фаза у сврху евалуације перформанси сваког мотора у склопу метахеуристичког оптимизационог поступка применом методе коначних елемената.
- Експериментална верификација примењених модела на наменски оптимизованој RPMFS машини (енг. RPMFS – *Rotor Permanent Magnet Flux Switching*).

5. Очекивани научни допринос

Очекује се да ће ова дисертација довести до следећих научних доприноса:

- Развој свеобухватног оптимизационог поступка за пројектовање синхроних мотора са сталним магнетима који, поред варијације димензија магнетског кола мотора, узима у обзир и варијацију броја жлебова, полова и фаза, тј. варијацију намотаја, те уважава

утицај тродимензионалне геометрије бочних веза као и утицај расподеле проводника унутар жлеба на перформансе мотора са произвољним бројем жлебова, полова и фаза.

- Развој уопштених једначина за рачунски ефикасну реконструкцију таласних облика фазних величина и електромагнетског момента синхроних мотора са сталним магнетима и произвољним бројем жлебова, полова и фаза на основу минималног броја магнетостатичких симулација методом коначних елемената.
- Развој флексибилног метахеуристичког алгорита за оптимизацију бочних веза једнослојних намотаја са произвољним бројем жлебова, полова и фаза, који резултује минималном дужином намотаја, тј. минималним утрошком бакра, минималним губицима и отпорностима намотаја, али и максималном једноставношћу намотаја, тј. минималним бројем различитих навојних делова.

6. План истраживања и структура рада

Планирано је да се истраживање изведе у следећим фазама:

- У првој фази биће развијени поступци за аутоматизовано генерисање симулационих модела синхроних мотора са произвољним бројем жлебова, полова и фаза у сврху евалуације перформанси сваког мотора у склопу метахеуристичког оптимизационог поступка применом методе коначних елемената.
- У другој фази биће развијена методологија за рачунски ефикасну симулацију синхроних мотора са сталним магнетима и произвољним бројем жлебова, полова и фаза на основу минималног броја магнетостатичких симулација методом коначних елемената и уопштених једначина за аналитичку реконструкцију таласних облика фазних величина и електромагнетског момента.
- У трећој фази биће развијени поступци за аутоматизовано формирање и оптимизацију бочних веза намотаја за моторе са произвољним бројем жлебова, полова и фаза. Такође, у овој фази ће бити развијени и нумерички поступци за естимацију фактора испуне за произвољну геометрију жлеба, пречник и број проводника у жлебу, као и за једнослојне и двослојне намотаје. Тиме ће бити заокружени сви поступци за реално и рачунарски аутоматизовано моделовање и евалуацију намотаја са произвољним бројем жлебова, полова и фаза.
- У четвртој фази ће бити развијен свеобухватни оптимизациони поступак за пројектовање синхроних мотора са сталним магнетима који, поред варијације димензија магнетског кола мотора, узима у обзир и варијацију броја жлебова, полова и фаза, тј. варијацију намотаја, те уважава утицај тродимензионалне геометрије бочних веза као и утицај расподеле проводника унутар жлеба на перформансе мотора са различитим бројем жлебова, полова и фаза
- У петој фази ће бити реализована лабораторијска поставка и биће извршена експериментална верификација примењених модела на наменски оптимизованој RPMFS машини (енг. RPMFS – *Rotor Permanent Magnet Flux Switching*).

На основу резултата наведених пет фаза истраживања биће формулисани и приказани главни научни доприноси, уз образложење њиховог значаја, области примене и уз поређење са решењима доступним у референтној литератури. Очекује се да ће резултати остварени кроз ову дисертацију створити предуслове за рачунски ефикасно пројектовање иновативних решења за савремене синхроне моторе са сталним магнетима, чије перформансе у погледу специфичног обртног момента и процентуалне валовитости обртног момента премашују перформансе постојећих решења.

7. Закључак и предлог

На основу приложене документације, као и непосредног увида у досадашњи научни рад кандидата Ђорђа Лекића, дипломираног инжењера електротехнике – мастер, Комисија је закључила да:

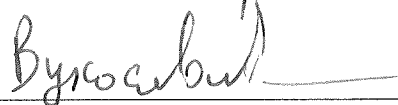
1. кандидат испуњава све формалне и суштинске услове прописане Законом о високом образовању и Статутом Електротехничког факултета Универзитета у Београду за одобрење теме за израду докторске дисертације;
2. предложена тема је научно заснована, а резултати до којих ће се доћи израдом ове дисертације представљаће значајан и оригиналан допринос у предметној области истраживања.

Ужа научна област теме су електричне машине, за коју је Електротехнички факултет Универзитета у Београду матичан.

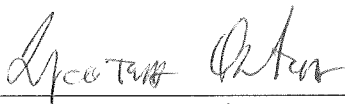
Узимајући у обзир све поменуте чињенице, комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се кандидату Ђорђу Лекићу одобри израда докторске дисертације под насловом „Рачунарски подржано оптимално пројектовање синхроних мотора са сталним магнетима засновано на методи коначних елемената и диференцијалној еволуцији“. За ментора израде докторске дисертације предлаже се др Слободан Вукосавић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Уз овај извештај се прилаже и списак радова предложеног ментора на одговарајућем формулару Универзитета.

У Београду, 21. фебруар 2022. године

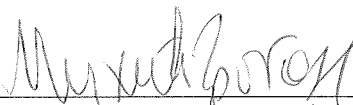
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



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



др Драган Олћан, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Драган Михић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



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