

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Александар (Радиша) Милић, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, за израду докторске дисертације

Одлуком 1470/37 бр. од 10.10.2023. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Александар (Радиша) Милић 2017/5012 за израду докторске дисертације и научне заснованости теме „Управљање асинхроним машинама на основу роторских жлебних хармоника присутних у струји статора“ (наслов рада на енглеском језику: „Control of asynchronous machines based on rotor slot harmonics comprised in stator currents”)

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Александар Р. Милић је рођен 13.08.1993. године у Смедереву. Основну и средњу школу завршио је у Смедереву. На Електротехничком факултету у Београду, дипломирао је 2016. године са просечном оценом 9,29. Дипломски рад из области синхроних машина на тему „Динамички модели синхроних машина у раду на крутој мрежи“ одбранио је са оценом 10. Дипломске академске – мастер студије на Електротехничком факултету у Београду, завршио је у септембру 2017. године са просечном оценом 10, са матер радом из области електричних возила на тему „Мултифазне електричне машине у погонским системима електричних возила са интегрисаним пуњачем батерија“. Током студија одрадио је две стручне праксе и то у компанијама „ЕПС Дистрибуција Смедерево“ и „MIKA Projekt Servis.“ Маја 2015. године освојио је прво место у појединачној и тимској конкуренцији у научној дисциплини „Електричне машине“ на међународном такмичењу студената електротехнике – Електријада 2015. године у Бечићима, Црна Гора.

Од 1. 2. 2017. до 1. 3. 2018. године радио је на Катедри за енергетске претвараче и погоне Електротехничког факултета у Београду, у звању сарадника у настави. Од 1.3.2018. запослен је као асистент, такође на Катедри за енергетске претвараче и погоне. Тренутно је ангажован на извођењу рачунских и лабораторијских вежби из предмета:

- Електрична возила
- Дигитално управљање претварачима и погонима
- Дигитално управљање енергетским претварачима и погонима 2
- Претварачка кола за обновљиве изворе енергије
- Управљање енергетским претварачима у електроенергетским мрежама

- Пројекат из дигиталног управљања претварачима и погонима
- Испитивање електричних машина

Александар Милић је аутор 1 рада у часопису са SCI листе (M23), 2 рада у часописима ван SCI листе, 1 рад са међународне конференције по позиву (M31), 6 радова са међународних конференција (M33), 6 радова са домаћих конференција (M63). Са студентима је написао укупно 13 научних радова, од којих су 4 научна рада награђена различитим признањима

Од маја 2017. године има функцију ментора тима студената који, при Лабораторији за дигитално управљање претварачима и погонима, који представља Електротехнички факултет на највећем светском универзитетском такмичењу у области иновативних и енергетски ефикасних решења *IEEE International Future Energy Challenge*. Са укупно пет студентских тимова до сада је остварио наредне успехе:

2023. – “The Outstanding Performance Award” и 2. место на финалу IEEE International Future Energy Challenge 2023 за развијени прототип решења: *Solid State Transformer*, Хановер, Немачка

2022. – “The Best Innovative Design Award” и 2. место на финалу IEEE International Future Energy Challenge 2022, за развијени прототип: *Smart, Efficient and Light Solar Microgrid Inverter*, Ноксвил, САД

2021. – Четврто место на државном такмичењу „Најбоља технолошка иновација Републике Србије“ за пројекат „Solar Bridge“

2020. - “The Outstanding Performance Award” и 2. место на финалу IEEE International Future Energy Challenge 2020 за развијени прототип: *Power Supply for Nano Satellites*, Албург, Данска

2019. - “The Grand Award” и 1. место на финалу IEEE International Future Energy Challenge 2019, за реализован прототип: *E-Drive for a bicycle*, Висконсин, САД

2019. – Прва награда на 10for10 Typhoon HIL академији уз обезбеђене Typhoon HIL Specialist сертификате

2019. – Награда „Zelena jabuka (Green Apple)“ од стране Eco Club of Serbia на RENEXPO fair - power engineering, water management and environmental protection fair

2018. - “The Best Educational Impact Award” и 4. место на финалу IEEE International Future Energy Challenge 2018, за развијени прототип: *DC/DC bidirectional isolated battery charger*, Пекинг, Кина

Од почетка 2019. године активан је члан тима за сарадњу са привредом Електротехничког факултета. Успешно је успоставио сарадњу са преко 70 домаћих и иностраних компанија од чега преко 25 компанија са којима Факултет до тог тренутка није имао формалну сарадњу.

Успешно је организовао и водио реновирање Лабораторије за дигитално управљање претварачима и погонима 2020. године, и Лабораторије за електрична возила 2021. године, као и реализацију три мале соларне електране на крову зграде Техничких факултета, укупне снаге 4.5 kW. Учествовао је у изради великог броја дипломских радова и студентских пројеката. Ангажован је на следећим пројектима:

Међународни: *UNDP circular voucher* - “Solid State Transformer” ; Циркуларни ваучер од стране Министарства заштите животне средине, програма Уједињених нација за развој и Глобалног фонда за животну средину

Домаћи истраживачки: Интегрисани системи за уклањање штетних састојака дима и развој технологија за реализацију термоелектрана и електрана без аерозагађења (TR61432, 21.2.2018 - данас)

Комерцијални: *H-Bridges*, тим студената Електротехничког факултета, спонзорства/донације

Комерцијални: ТЕКО В3: Консултантске услуге из електротехнике, телекомуникација и система управљања

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Александар Милић је у свом истраживачком раду показао изузетно интересовање за области дигиталног управљања брзином и струјом у погонима без давача на вратилу.

Уписао је докторске академске студије школске 2017/18. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на Модулу за Енергетске претвараче и погоне. Све испите предвиђеним овим студијским програмом је положио са просечном оценом 10,00 и остварио 120 ЕСПБ. Списак положених испита приказан је у наставку:

Микропроцесорско управљање енергетским претварачима	1	изборни предмет	9
13Д011МУЕ	Микропроцесорско управљање енергетским претварачима	1	10
13Д011МУП	Микропроцесорско управљање електромоторним погонима	1	10
13Д091ЕЈ	Енглески језик	1	10
13Д011ЕСМ	Електрични сервомотори	1	10
13Д011ППМ	Прелазне појаве у електричним машинама	1	10
13Д011ИЕМ	Испитивање и одржавање електричних машина	1	10
13Д011ЕП	Енергетски претварачи	1	10
13Д011НСЕ	Надгледање стања електричних машина у погону	1	10
13Д011ОТМ	Општа теорија електричних машина	1	10
13Д041ОПЕ	Одабрана поглавља из енергетске електронике	1	10

Кандидат је испунио све обавезе предвиђене наставним планом и програмом докторских студија: Студијски истраживачки рад I (15 ЕСПБ), Студијски истраживачки рад II (15 ЕСПБ) и Научно стручни рад (3 ЕСПБ).

Досадашњи резултати кандидата приказани су кроз више публикација на домаћим и међународним конференцијама као и једног рада у часопису са SCI листе. У наставку следи списак публикација:

Радови у часописима са импакт фактором:

1. L. Stojanović, F. Bakić, A. Milić, Performance Analysis of Single Loop Current Controller at Grid Side Inverter Regarding LCL Filter Parameters and System Delay, ADVANCES IN ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING, Vol. 22, No. 4, pp. 55-64, Dec, 2022. (ISSN: 1582-7445, M23)

Радови у часописима без импакт фактора:

1. A. Milić, S. Vukosavić, DESIGNING METHOD FOR INTEGRATED BATTERY CHARGERS IN ELECTRICAL VEHICLES, FACTA UNIVERSITATIS - SERIES: ELECTRONICS AND ENERGETICS, Vol. 32, No. 4, pp. 513-518, Nov, 2019. (ISSN, 0353-3670)
2. Aleksandar R. Milić, Slobodan N. Vukosavić, Analysis of the magnetomotive force in the multiphase machines within integrated battery chargers for the electric vehicles, TEHNIKA - ELEKTROTEHNIKA, pp. 391-398, May, 2018. (ISSN, 0040-2176)

Рад по позиву са међународне конференције:

1. A. Milić, Open Source Hardware for Designing E-bike Drive, Application of Free Software and Open (PSSOH), Belgrade, Serbia, 24 October 2020 (Session Free Software and Open Hardware in Electrical Engineering and Computer Science, Part 7), Oct, 2020 (M31)

Радови са међународних конференција:

1. Milic and S. Vukosavic, "Sensorless Speed and Vector Control of Induction Motor Based on Rotor Slot Harmonics," *2023 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Orlando, FL, USA, 2023, pp. 2780-2787. doi: 10.1109/APEC43580.2023.10131259. (M33)
2. K. B. Obradović, J. J. Plavšić and A. R. Milić, "Design Procedure for High-Frequency Transformer in LLC Resonant Topology," *2021 21st International Symposium on Power Electronics (Ee)*, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/Ee53374.2021.9628384. (M33)
3. L. Stojanović, F. Bakić and A. Milić, "Influence of system delay on current controller stability and performance at grid-side inverter with LCL filter," *2021 21st International Symposium on Power Electronics (Ee)*, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/Ee53374.2021.9628228. (M33)
4. E. M. Lukić, J. J. Čakarević and A. R. Milić, "Minimization of Commutation Losses in LLC Resonant Converter with GaN HEMTs and Si based MOSFETs," *2021 21st International Symposium on Power Electronics (Ee)*, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/Ee53374.2021.9628216. (M33)
5. K. Obradović, E. Lukić, J. Plavšić, A. Milić, Design of LLC Resonant Tank in a Low Power DC/DC Power Converter, *IcETRAN 2021*, Sep, 2021. (M33)
6. K. Čeranić, M. Gligorijević, L. Stojanović, A. Milić, Implementation and testing of basic algorithms in PV systems with batteries on a common DC link, *IcETRAN*, Sep, 2021. (M33)

Радови са домаћих конференција:

1. L. Savanović, M. Popović, D. Bižić, A. Milić, „Cascade realization of control algorithm for single-phase controlled voltage source“, 36. savetovanje CIGRE Srbija, Maj, 2023. (M63)
2. N. Zdravković, M. Rankić, A. Milić, „Design and testing of single-phase AC/AC converter as SST module“, 36. savetovanje CIGRE Srbija, Maj, 2023. (M63)
3. J. Čakarević, A. Milić, Z. Stojanović, „Phase-locked loop algorithm for estimation signal in power systems“, 36. savetovanje CIGRE Srbija, Maj, 2023. (M63)
4. N. Vladić, A. Mijajlović, A. Milić, „Design and testing of a high-frequency transformer in high power density systems“, 36. savetovanje CIGRE Srbija, Maj, 2023. (M63)
5. E. Lukić, I. Dinčić, A. Milić, „Influence of MPPT converter selection and photovoltaic system configuration on the price and efficiency of the system“, 35. savetovanje CIGRE Srbija, Oct, 2021. (M63)
6. K. Obradović, J. Čakarević, A. Milić, „Comparative analysis of high-frequency and grid transformers in achieving galvanic isolation of single-phase grid inverters“, 35. savetovanje CIGRE Srbija, Oct, 2021. (M63)

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Дана 23.10.2023. године, кандидат Александар Милић је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду усмено полагао испит о подобности предложене теме докторске дисертације и кандидата (докторски испит), пред комисијом у саставу:

- др Драган Милић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
- др Жарко Јанда, виши научни сарадник, Универзитет у Београду – Институт Никола Тесла
- др Зоран Стојановић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

- др Томислав Шекара, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
- др Милан Бебић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

На јавној усменој одбрани предложене теме Комисија је кандидата оценом задовољно.

2. Предмет и циљ истраживања

Примене које захтевају велику поузданост и рад у непогодном окружењу, попут погона у бродовима, летилицама и друмским возилима, захтевају прецизан и поуздан податак о брзини обртања ротора без употребе традиционалних давача на вратилу [1]. Овај концепт се све чешће примењује у спрези са мултифазним машинама како би се увећала толеранција на кварове [2]. Погони без давача на вратилу (енгл.: *sensorless*) налазе примену и код електричних возила, посебно код лаких електричних возила, где се захтева висок степен интеграције вучног система од батерије до редуктора [3]. Услед врло широке примене, *sensorless* алгоритми су већ деценијама предмет истраживања. Временом су развијена решења за оцену брзине обртања вратила код синхроних [4], прекидачких-релуктантних [5], асинхроних и других машина.

До сада публиковани радови који предлажу технике за оцену брзине обртања код трофазних асинхроних машина могу се поделити у три групе. Прву групу чине приступи који уважавају одзив асинхроне машине у појасу основних учестаности, уз претпоставку о простопериодичној расподели магнетске индукције у зазору. Ове методе немају задовољавајући одзив у области малих брзина, њихов рад зависи од параметара модела [6] и подложен је утицају немоделираних нелинеарности [7]. Поменуте методе могу се применити као естиматори или опсервери стања. Другу групу чине технике засноване на уношењу тест сигнала у опсегу до 3 kHz. Ова група решења омогућује рад неосетљив на поремећаје при малим брзинама [8] укључујући и брзину једнаку нули. Поменута решења доводе до валовитости момента и брзине, увећаних губитака, акустичне буке [9] и значајног умањења пропусног опсега у регулацији струје [10].

Методе које користе несавршености у структури машине представљају трећу групу. Анизотропије утичу на расподелу магнетског флукса у зазору и до појаве виших хармоника у магнетопобудној сили, који се одражавају у спектру статорске струје. Наведени хармоници садрже информацију о механичкој брзини обртања вратила, која се може искористити за потребе векторског управљања, регулације струје и брзине. Анизотропије услед засићења [6], расипних индуктивности [11], ексцентрицитета ротора [12], или лома роторских шипки [13] углавном настају услед неправилног рада машине или квара и нису погодне за *sensorless* системе високих перформанси. Алгоритми засновани на роторским жлебним хармоникима (РЖХ) не зависе од параметара машине и пружају велику тачност у оцени брзине, значајно већу од других решења [12]. Обично се користе за детекцију квара мотора [14], естимацију температуре [15] и за утврђивање промена у параметрима током рада [16]. Нелинеарна природа анизотропија ожљебљења и засићења магнетског кола чини да једновремена примена оба феномена буде тешко остварива. Из наведених разлога, решења заснована на РЖХ су пожељна за *sensorless* системе високих перформанси, а према до сада публикованим радовима, примењују се у фреквенцијском или временском домену.

Технике у фреквенцијском домену значајно отежавају примену у реалном времену. Трансформација поворке одбирака у фреквенцијски домен захтева додатни меморијски простор и скопчана је са грешкама у оцени брзине у устаљеном стању услед коначне

резолюције [17] у одређивању спектра. Тачност алгоритма се може побољшати применом сложенијих алгоритама и већег броја одбирака, што значајно увећава време извршавања алгоритма и унета транспортна кашњења. Структуре за оцену брзине засноване на поменутих техникама тешко се примењују у регулацији брзине и струје и углавном се користе за оцену брзине обртања у области већих брзина [18]. Техника у фреквенцијском домену под именом *Chirp-Z* трансформација захтева мањи броја одбирака од раније поменутих метода и омогућује већу тачност при оцени брзине. Ипак, податак о брзини обртања ротора добија се на сваких 726 ms [20]. Пронијева метода заснована на суми квадрата одступања умањује кашњење при оцени брзине користећи исти део одбирака при узастопним извршавањима алгоритма [21]. Код ове методе, грешка у оцени брзине обртања значајно расте са падом учестаности статорске струје. Оцена брзине заснована на анализи максималне коваријансе користи корелациону функцију између улазног и референтног сигнала [22]. Предложена структура је примерена потребама оцене брзине обртања у устаљеном стању. Алгоритам класификације сигнала (енгл: *Multiple signal classification – MUSIC*) омогућује велику тачност у оцени брзине уз транспортна кашњења која расту са димензијама аутокорелационе матрице [23]. Метода се примењује за детекцију кварова и оцену брзине обртања ротора у устаљеном стању.

Према до сада публикованим радовима, за потребе оцене брзине обртања у реалном времену погодније су технике у временском домену које најчешће не захтевају додатни меморијски простор. Велика тачност оцене брзине у устаљеном стању може се остварити применом алгоритма детекције проласка кроз нула (енгл: *zero-crossing*) [24] и алгоритма претраге максимума (енгл: *peak detection*) [25]. Код поменутих метода, положај РЖХ у спектру добија се на основу обрађених сигнала измерених електромоторних сила. Примена ових метода је сложена јер тражи примену напонских давача и преправку машине уградњом додатних спољашњих или унутрашњих намотаја. Структура за оцену брзине са филтрима линеарне фазе и детектором фреквенције користи се за оцену брзине обртања у устаљеном стању [26]. Детектор користи први извод фазе РЖХ, где се износ извода процењује коришћењем диференце једначине четвртог реда и интерполације Лагранжовим полиномима. Методу карактеришу захтев за додатном меморијом и док је један од недостатака присуство виших хармоника у сигналу оцењене брзине обртања ротора.

Структура за оцену брзине може се начинити коришћењем адаптивних дигиталних филтара и рекурзивних алгоритама [27]. Предложено решење значајно умањује пропусни опсег у *sensorless* регулацији брзине на свега 0.5 Hz. Већи пропусни опсег може се постићи спрегом адаптивних дигиталних филтара линеарне фазе, Писаренкове методе и *MCA EXIN* рекурзивних неуралних мрежа [28]. Сложеност описаног решења захтева велико заузеће меморије и једновремену примену три процесора што значајно усложњава и поскупљује уградњу, смањује поузданост и доводи у питање оправданост примене.

Структуре засноване на алгоритмима фазно спрегнуте петље (енгл: *Phase-Locked Loop*) омогућавају минимално кашњење у оцени брзине. Већа тачност постиже се обрадом сигнала на излазу детектора фазе употребом филтара [29-30] или неуралних мрежа [31]. *Sensorless* регулација брзина заснована на фазно спрегнутој петљи експериментално је представљена у [32]. Остварен је пропусни опсег у регулацији од 1 Hz. Поменуто решење захтева мерење електромоторних сила, односно давач напона и уградњу додатних унутрашњих намотаја са изводима за мерење, што поскупљује и ограничава примену методе. Одсуство излазних филтара у предложеној структури доводи до грешака у оцени брзине до 6% што значајно умањује оствариве пропусне опсеге.

Табеларни приказ најзначајнијих метода у до сада публикованим радовима дат је у Табели I.

Може се закључити да методе засноване на РЖХ омогућавају прихвативу тачност у оцени брзине, не зависе од параметара машине и могу радити без неумерених захтева за меморијом. Ипак, ове методе се тренутно доминантно користе за надзор и дијагностику система у устаљеном стању. Њихова примена углавном захтева преправку машине, напонске даваче и додатне процесоре када се алгоритми примењују за потребе *sensorless* управљања, где су до сада остварене перформансе релативно ниске у поређењу са другим решењима. Дакле, постоји јасна потреба за естиматором брзине заснованим на РЖХ који се може користити за потребе *sensorless* регулисаних погона високих перформанси уместо традиционалног давача на вратилу и који се може применити без измена у намотајима машине, без додатних напонских давача и без додатног хардвера за обраду података. Да би се оправдала употреба система за оцену брзине уместо давача, синтеза структуре и алгоритма за прорачун параметара такве структуре биће заснована уз уважавање потребе да се таква структура усклади са контурама за регулацију струје и брзине. Структура за оцену брзине биће намењена асинхроним машинама које су заступљене у индустрији и које се у већој мери користе у модерним електричним возилима.

ТАБЕЛА I

ПОРЕЂЕЊЕ РЕЛЕВАНТНИХ ЕСТИМАТОРА БРЗИНЕ ЗАСНОВАНИХ НА РЖХ У ЛИТЕРАТУРИ

Структура естиматора брзине	Капњење [ms]	Грешка у устаљеном стању [%]	Најнижа радна учестаност статорских струја [Hz]	Време извршавања алгоритма [ms]
Hurst [19]	1000	6.67	1	1000
Aielo [20]	726	0.34	10	726
Sahraoui [21]	462	4.76	20	300
Zinger [32]	150	6.19	6	-
Keysan [24]	-	0.7	5	5
Petric [30]	150	8.2	5	0.025
Ferrah [27]	120-200	0.4	5	0.1
Ye [28]	10	9.26 (0.13)	0.64 (2)	0.4

Релевантни радови из области истраживања:

- [1] J. Yu, H. Shen, H. Wang and X. Wu, "Speed Estimation of Multiphase Induction Motor Using Rotor Slot Harmonics With Limited SNR and Dynamic Load Conditions," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 7, pp. 6618-6631, July 2023, doi: 10.1109/TIE.2022.3201286.
- [2] X. Shangguan and X. Wu, "Analysis of rotor slot harmonics of multiphase induction motor based on detection coil," *2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Gyeongju, Korea, Republic of, 2021, pp. 1386-1389, doi: 10.23919/ICEMS52562.2021.9634249.
- [3] B. Saha, B. Singh and A. Sen, "SMO Based Position Sensorless BLDC Motor Drive Employing Canonical Switching Cell Converter for Light Electric Vehicle," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 59, no. 3, pp. 2974-2984, May-June 2023, doi: 10.1109/TIA.2023.3241607.
- [4] A. Consoli, G. Scarcella, and A. Testa, "Industry application of zero-speed sensorless control techniques for PM synchronous motors," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 37, no. 2, pp. 513-521, 2001, doi: 10.1109/28.913716.
- [5] Y. Maita and I. Miki, "Sensorless Control in Low-speed Region for Switched Reluctance Motor," in *2020 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2020, pp. 1173-1177.
- [6] J. Holtz, "Sensorless Control of Induction Machines—With or Without Signal Injection?," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 1, pp. 7-30, 2006, doi: 10.1109/TIE.2005.862324.
- [7] J. Holtz and J. Quan, "Sensorless vector control of induction motors at very low speed using a nonlinear inverter model and parameter identification," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 38, no. 4, pp. 1087-1095, 2002.
- [8] T. Szalai, G. Berger, and J. Petzoldt, "Stabilizing Sensorless Control Down to Zero Speed by Using the High-Frequency Current Amplitude," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 29, no. 7, pp. 3646-3656, 2014.
- [9] F. Briz, A. Diez, and M. W. Degner, "Dynamic operation of carrier-signal-injection-based sensorless direct field-oriented AC drives," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 36, no. 5, pp. 1360-1368, 2000, doi: 10.1109/28.871285.

- [10] C. S. Staines, G. M. Asher, and M. Sumner, "Rotor-position estimation for induction machines at zero and low frequency utilizing zero-sequence currents," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 42, no. 1, pp. 105–112, 2006.
- [11] E. R. Montero, M. Vogelsberger, and T. Wolbank, "Sensorless Identification of the Initial Rotor Slot Position using One Active Inverter State Excitation in Induction Machines," in *2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, 2021, pp. 581–587. doi: 10.1109/PEMC48073.2021.9432612.
- [12] M. Chirindo, M. A. Khan, and P. Barendse, "Analysis of Non-Intrusive Rotor Speed Estimation Techniques for Inverter-Fed Induction Motors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 36, no. 1, pp. 338–347, 2021.
- [13] M. W. Degner and R. D. Lorenz, "Position estimation in induction machines utilizing rotor bar slot harmonics and carrier-frequency signal injection," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 36, no. 3, pp. 736–742, 2000, doi: 10.1109/28.845048.
- [14] G. M. Joksimović, J. Riger, T. M. Wolbank, N. Perić, and M. Vašak, "Stator-Current Spectrum Signature of Healthy Cage Rotor Induction Machines," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 9, pp. 4025–4033, 2013.
- [15] Z. Gao, T. G. Habetler, R. G. Harley, and R. S. Colby, "A Sensorless Rotor Temperature Estimator for Induction Machines Based on a Current Harmonic Spectral Estimation Scheme," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 1, pp. 407–416, 2008, doi: 10.1109/TIE.2007.896282.
- [16] L. Zhao, J. Huang, J. Chen, and M. Ye, "A Parallel Speed and Rotor Time Constant Identification Scheme for Indirect Field Oriented Induction Motor Drives," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 31, no. 9, pp. 6494–6503, 2016.
- [17] A. Ferrah, K. J. Bradley, and G. M. Asher, "An FFT-based novel approach to noninvasive speed measurement in induction motor drives," *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 41, no. 6, pp. 797–802, 1992, doi: 10.1109/19.199410.
- [18] K. Nishibata, M. Ishida, S. Doki, T. Masuzawa, and M. Fujitsuna, "Speed Estimation Method utilizing Rotor Slot Harmonics Detected from Line Current for Speed Sensorless Drive of Ultra High Speed Induction Machine," in *2006 IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2006, pp. 1591–1596.
- [19] K. D. Hurst and T. G. Habetler, "Sensorless speed measurement using current harmonic spectral estimation in induction machine drives," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 11, no. 1, pp. 66–73, 1996, doi: 10.1109/63.484418.
- [20] M. Aiello, A. Cataliotti, and S. Nuccio, "An induction motor speed measurement method based on current harmonic analysis with the chirp-Z transform," *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 54, no. 5, pp. 1811–1819, 2005.
- [21] M. Sahraoui, A. J. M. Cardoso, K. Yahia, and A. Ghoggal, "The Use of the Modified Prony's Method for Rotor Speed Estimation in Squirrel-Cage Induction Motors," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 52, no. 3, pp. 2194–2202, 2016.
- [22] A. Bellini, G. Franceschini, and C. Tassoni, "Monitoring of induction Machines by maximum covariance method for frequency tracking," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 42, no. 1, pp. 69–78, 2006, doi: 10.1109/TIA.2005.861320.
- [23] S. H. Kia, H. Henao, and G.-A. Capolino, "A High-Resolution Frequency Estimation Method for Three-Phase Induction Machine Fault Detection," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 4, pp. 2305–2314, 2007, doi: 10.1109/TIE.2007.899826.
- [24] O. Keysan and H. B. Ertan, "Real-Time Speed and Position Estimation Using Rotor Slot Harmonics," *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 9, no. 2, pp. 899–908, 2013, doi: 10.1109/TII.2012.2210231.
- [25] M. Ishida and K. Iwata, "Steady-State Characteristics of a Torque and Speed Control System of an Induction Motor Utilizing Rotor Slot Harmonics for Slip Frequency Sensing," *IEEE Trans Power Electron*, vol. PE-2, no. 3, pp. 257–263, 1987, doi: 10.1109/TPEL.1987.4766367.
- [26] Z. Gao, L. Turner, and R. S. Colby, "Application of Linear-Phase Filters in Induction Motor Speed Detection," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 50, no. 6, pp. 3727–3737, 2014, doi: 10.1109/TIA.2014.2346710.
- [27] A. Ferrah *et al.*, "A speed identifier for induction motor drives using real-time adaptive digital filtering," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 34, no. 1, pp. 156–162, 1998, doi: 10.1109/28.658741.
- [28] B. Ye, M. Cirrincione, M. Pucci, and G. Cirrincione, "Speed sensorless control of induction motors based on MCA EXIN Pisarenko method," in *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2015, pp. 2176–2183. doi: 10.1109/ECCE.2015.7309967.
- [29] I. Petrić and S. Vukosavić, "High-performance speed estimation of induction machines based on adaptive filtering," *IET Electr Power Appl*, vol. 14, no. 4, pp. 695–704, 2020.

- [30] B. Ye, M. Cirrincione, G. Cirrincione, M. Pucci, and G. Vitale, "Improved sensorless scalar control by a PLL tracking rotor slotting effects," in *3rd IEEE International Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED 2012)*, 2012, pp. 1–5. doi: 10.1109/SLED.2012.6422808.
- [31] S. Luecke, J. Koupeny, and A. Mertens, "Induction machine speed tracking based on rotor slot harmonics using a modified PLL approach," in *2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)*, 2016, pp. 1–10. doi: 10.1109/EPE.2016.7695518.
- [32] D. S. Zinger, F. Profumo, T. A. Lipo, and D. W. Novotny, "A direct field-oriented controller for induction motor drives using tapped stator windings," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 5, no. 4, pp. 446–453, 1990.

3. Полазне хипотезе

Полазне хипотезе докторске дисертације су:

- Структура за оцену брзине на основу РЖХ може се начинити тако да не зависи од параметара машине, без додатних давача, без потребе за подешавањем сложених матрица са коефицијентима, без захтева за меморијом и без преправки електричне машине и енергетског претварача.
- Структура је заснована на адаптивним дигиталним филтрима и фазно спрегнутој петљи. Може се користити за потребе *sensorless* регулације брзине, струје и векторског управљања високих перформанси.
- Кашњење које алгоритам оцене брзине уноси у надређене регулационе контуре може се значајно умањити адаптацијом параметара структуре у реалном времену у функцији радних режима, брзине обртања ротора и оптерећења на вратилу.
- Адаптацијом параметара структуре и уважавањем нелинеарности фазно спрегнуте петље може се постићи да грешка у оцени брзине буде занемарива у свим режимима где постоји мерљив износ РЖХ у асинхроној машини.
- Уколико се структура за оцену брзине гради уз уважавање динамике надређених регулационих контура, могуће је остварити стабилан рад система у свим релевантним режимима.

4. Научне методе истраживања

Током истраживања анализираће се природа РЖХ, сва до сада публикована решења, као и *sensorless* алгоритми засновани на РЖХ. Анализа и поређење публикованих решења служиће за сагледавање простора за научне и стручне доприносе.

Синтеза алгоритама за оцену брзине и за *sensorless* управљање брзином и моментом биће спроведена употребом програмских пакета *MATLAB* и *PSIM*. Детаљан модел система биће начињен у програму *MATLAB-Simulink*. Примена развијених алгоритама и експериментална испитивања биће извршена програмирањем у С програмском језику. Експериментална испитивања биће спроведена у неколико корака:

- Почетно испитивање алгоритама за оцену брзине и *sensorless* управљања брзином и моментом, на платформи *Hardware in The Loop – HIL 402*.
- Детаљно испитивање у устаљеном стању и прелазним режимима свих елемената структуре на реалној експерименталној поставци.
- Експериментална потврда изведених аналитичких модела
- Поређење резултата предложене структуре са до сада публикованим решењима.

После сагледавања остварених резултата, примене неопходних измена, предложени алгоритми биће додатно испитани са циљем дефинисања ограничења система.

5. Очекивани научни допринос

Очекивани научни доприноси дисертације су:

- Оригинална структура за оцену брзине која омогућава рад уз мању грешку у оцени, мање транспортно кашњење и унапређене перформансе у односу на решења приказана у Табели I.
- Структура која се може применити без додатних хардверских измена или захтева.
- Структура адаптивних дигиталних филтара која значајно умањује утицај динамике контура за регулацију струје и брзине на квалитет оцене брзине обртања.
- Аналитички модел предложене структуре са дефинисаним ограничењима при којима се може гарантовати стабилан рад.
- Методологија одређивања параметара предложене структуре и придружених регулатора која омогућава достизање већег пропусног опсега, мање осетљивости на промене параметара и мање минималне брзине обртања од до сада публикованих решења.

6. План истраживања и структура рада

- 1) Преглед научно-стручних публикације ради анализе расположивих метода за оцену брзине и постојећих праваца истраживања у области дигиталног управљања брзином и моментом без употребе давача на вратилу;
- 2) Развој симулационог модела који би узео у обзир све појаве од значаја, и који би укључивао разумна занемарења у циљу очувања прегледности неопходне за доношење закључака;
- 3) Синтеза и примена прелиминарних елемената структуре. Формирање експерименталне поставке;
- 4) Развој структуре за оцену брзине и придружених алгоритама.
- 5) Експериментално испитивање структуре за оцену брзине;
- 6) Синтеза дигиталног регулатора брзине који користи достигнуте резултате као извор података о брзини обртања вратила;
- 7) Експериментално испитивање система за регулисање брзине са развијеном структуром за оцену брзине. Анализа добијених резултата у устаљеном стању и током прелазних режима, у празном ходу и под оптерећењем, анализу одзива система на промене референтне брзине и промене оптерећења, испитивање спреге између чинилаца система и дефинисање граничних услова при којима важе усвојене претпоставке;
- 8) Пројектовање оригиналног алгорита за прилагођавање параметара дигиталног регулатора брзине и прилагођавање параметара структуре за оцену брзине сходно промени радног режима система;
- 9) Испитивање адаптивне структуре према тачки 7).

7. Закључак и предлог

На основу приложене документације и стеченог целокупног утиска о теми докторске дисертације и досадашњег научног рада кандидата Александра Милића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, Комисија је дошла до следећих закључака:

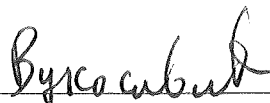
1. Кандидат испуњава све формалне и суштинске потребне услове прописане Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Београду и Статутом Електротехничког факултета Универзитета у Београду, за израду докторске дисертације.

2. Предложена тема „Управљање асинхроним машинама на основу роторских жлебних хармоника присутних у струји статора“ (наслов рада на енглеском језику: „*Control of asynchronous machines based on rotor slot harmonics comprised in stator currents*“) јесте научно заснована, а резултати који ће проистећи израдом ове докторске дисертације представљаће значајан допринос међународној научној заједници. Тема припада ужој научној области Енергетски претварачи и погони.

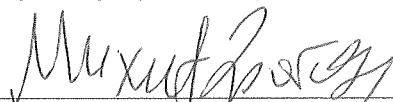
На основу свега претходно изложеног, Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да кандидату Александру Милићу одобори израду докторске тезе под насловом „Управљање асинхроним машинама на основу роторских жлебних хармоника присутних у струји статора“ (наслов рада на енглеском језику: „*Control of asynchronous machines based on rotor slot harmonics comprised in stator currents*“), под менторством др Слободана Вукосавића, редовног професора Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

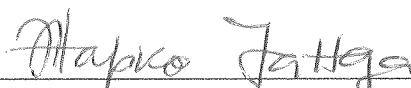
Датум: 26.10.2023. године у Београду.



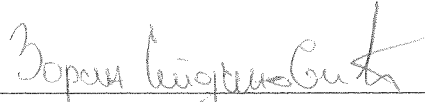
др Слободан Вукосавић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



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



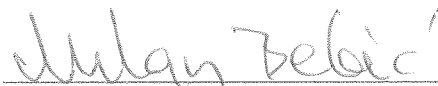
др Жарко Јанда, виши научни сарадник
Универзитет у Београду – Институт Никола Тесла



др Зоран Стојановић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



Др Томислав Шекара, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Милан Бебић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет