

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај о урађеној докторској дисертацији кандидата Владимира Чеперковића

Одлуком бр. 55/31 од 14. 01. 2025. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену дисертације кандидата Владимира Чеперковића под насловом

**Дистрибуирана метода за самокалибрацију магнеторезистивног
сензора угаоне позиције у серво систему**

(енгл. A distributed method for self-calibration of magnetoresistive angular position sensor within a servo system)

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са Кандидатом, Комисија је сачинила следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат Владимир Чеперковић уписао је докторске академске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, модул Електроника, у октобру 2019. године. Кандидат је положио све испите са оценом 10 и остварио 120 ЕСПБ. Такође је испунио све обавезе везане за студијски истраживачки рад које су предвиђене наставним планом и програмом докторских студија. Кандидат је 27. 10. 2022. пријавио тему докторске дисертације под насловом „Дистрибуирана метода за самокалибрацију магнеторезистивног сензора угаоне позиције у серво систему“ Катедри за електронику на Електротехничком факултету Универзитета у Београду.

Комисија за студије трећег степена Електротехничког факултета Универзитета у Београду је на својој седници одржаној дана 01. 11. 2022. године разматрала пријаву теме за израду докторске дисертације и предлог састава Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације. Комисија за студије трећег степена је пријаву теме и предлог састава комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације упутила Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду на усвајање.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду је, на седници одржаној дана 18. 11. 2022. године, донело одлуку о именовању Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације у саставу:

- др Владимир Рајовић, ванредни професор, Електротехнички факултет у Београду
- др Петар М. Лукић, редовни професор, Машински факултет у Београду
- др Милош Бјелић, доцент, Електротехнички факултет у Београду
- др Жељко Ђуровић, редовни професор, Електротехнички факултет у Београду
- др Радивоје Ђурић, ванредни професор, Електротехнички факултет у Београду

За ментора је предложен др Милан Прокин, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду је, на својој седници одржаној дана 17. 01. 2023. године, усвојило извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата, док је за ментора именован др Милан Прокин, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду је, на својој седници одржаној дана 13.02.2023. године, дало сагласност на предложену тему докторске дисертације и именовање ментора (бр. Одлуке 61206-540/2-23)

Кандидат је предао докторску дисертацију на преглед и оцену 26. 12. 2024. године.

Комисија за студије трећег степена Електротехничког факултета Универзитета у Београду је, на седници одржаној дана 08. 01. 2025. године, потврдила испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду за формирање Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације. Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду је, на својој седници одржаној дана 14. 01. 2025. године, именовало Комисију за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације (бр. одлуке 55/31) у саставу:

- др Владимир Рајовић, ванредни професор, Електротехнички факултет у Београду
- др Радивоје Ђурић, ванредни професор, Електротехнички факултет у Београду
- др Петар М. Лукић, редовни професор, Машински факултет у Београду

1.2. Научна област дисертације

Научна област дисертације је Електротехника и рачунарство, ужа научна област је Електроника, док у оквиру уже научне области припада области Сензорских система. За ову ужу научну област матичан је Електротехнички факултет у Београду. Дисертација је урађена под менторством др Милана Прокина, редовног професора ЕТФ. Ментор испуњава законске услове за ментора, и бави се научним радом у ужој области Електроника.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Владимир Чеперковић рођен је 9. јула 1976. године у Краљеву. Дипломирао је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду 2008. године, на Смеру за аутоматику. Дипломски рад по називом „Анализа и реализација Адаптивног МИМЦ регулатора” оцењен је оценом 10 (десет). Просек оцена у току студија му је био 8,1. Докторске студије је уписао 2019. године на Електротехничком факултету, на модулу Електроника.

Од 2011. до 2015. био је запослен на Катедри за електронику Електротехничког факултета Универзитета у Београду, на позицији истраживач приправник, да би од 2015. године прешао у Центар за научноистраживачки рад, као истраживач сарадник на пројекту. Током овог периода је учествовао на неколико иновационих пројеката и пројеката технолошког развоја финансираних од стране Министарства науке Републике Србије, као и неколико комерцијалних факултетских пројеката. Почевши од јануара 2022. запослен је у компанији Synchrotek Београд, чији је суоснивач.

Области истраживања кандидата обухватају управљање системима, дигиталну обраду сигнала, дигиталну обраду слике, и микропроцесорске системе. Кандидат је аутор или коаутор два рада публикованих у међународним часописима, осам радова саопштених на међународним конференцијама, два рада у националним часописима, као и једног рада саопштеног на националној конференцији. Поред тога, кандидат је аутор или коаутор седам патената реализованих на међународном нивоу, као и два патента реализована на националном нивоу.

Из најуже области непосредно везане за тему доктората, кандидат је први аутор једног рада у врхунском међународном часопису, први аутор једног рада на међународној конференцији, као и први аутор једног рада у домаћем часопису.

Из области примене докторске дисертације, кандидат је коаутор једног рада на међународним конференцијама.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Дисертација је написана на српском језику латиничним писмом и има 130 страна од чега је 116 нумерисано. Дисертација садржи 50 слика и 24 табеле. Дисертација је организована у 7 поглавља, и 1 прилог:

1. Увод
 2. Магнеторезистивни сензори
 3. Интегрисани магнеторезистивни сензори
 4. Мерни процес угаоне позиције
 5. Самокалибрација мерног процеса
 6. Експериментални резултати
 7. Закључак
- А. Модел танког феромагнетног филма

Додатно дисертација садржи и насловне стране на српском и енглеском језику, страну са информацијама о ментору и члановима комисије за преглед и оцену, сажетак на српском и енглеском језику, садржај, списак литературе са 126 референци наведених по редоследу појављивања у тексту, биографију аутора, и потребне изјаве (о ауторству, о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада, и о коришћењу)

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном поглављу дате су основне информације о примени магнеторезистивних сензора угаоне позиције у серво системима. Критички је изложено тренутно стање науке и технике, са посебним освртом на проблем калибрације у реалним применама.

У другом поглављу је најпре изложена феноменолошка основа функционисања магнеторезистивних елемената, на основу које су изведене преносне функције идеализованих елемената, те приказане уобичајене технике линеаризације и проширења мерног опсега. Затим је приказана примена магнеторезистивних елемената у температурно компензованим мерним мостовима за формирање магнеторезистивних сензора, те су показане резултирајуће преносне функције за мостове у зависности од врсте извора напајања. Коначно, приказан је поступак примене ортогоналних магнеторезистивних мерних мостова за конструисање сензора правца магнетног поља, и описано његово понашање у директном, линеарном, и компензованом радном режиму.

Треће поглавље посвећено је аналитичком моделу интегрисаних магнеторезистивних сензора. Представљен је модел реалног магнеторезистивног елемента, на којем је показано како производне толеранције утичу на грешку конверзије. Затим је изведен модел реалног магнеторезистивног мерног моста, где је показано да је грешка мерења последица грешке конверзије индивидуалних магнеторезистивних елемента, као и да ово одступање има облик хармонијске функције са највише трећим хармоником. Изведени модели примењени су за одређивање модела реалног магнеторезистивног сензора правца магнетног поља, независно за сваки од три радна режима. Коначно, унифицирани су модели реалног сензора правца магнетног поља за различите радне режиме, те је показано да је резултирајућа грешка мерења реалног магнеторезистивног сензора правца магнетног поља хармонијска функција, највише четвртог реда.

У четвртом поглављу је представљен модел мерног процеса. Приказана је конструкција, а затим и одређен модел реалног магнеторезистивног претварача угаоне позиције. Показано је да се овај модел може представити као секвенцијална веза три независна сегмента, и то хармонијског сегмента модела, модулятора, и линеарног сегмента модела. Применом псеудо-инверзије модела реалног магнеторезистивног претварача угаоне позиције конструисан је компензатор, у у оквиру кога је развијен метод за демодулацију угла, као и целобројни демодулатор за примену у микропроцесорским системима. На крају су представљени методи за реконструкцију механичке позиције, као и конструкција линеарних обсервера погодних за филтрирање резултата.

У петом поглављу је представљена самокалибрација мерног процеса. Прво је приказана погодна структура серво система са системом мерења угаоне позиције, да би онда била представљена и сама метода за самокалибрацију мерног процеса. Изложене су претпоставке значајне за конструкцију алгоритма управљања, затим структура самокалибрирајућег компензатора, као и метод за синхронизацију методе самокалибрације мерног процеса са алгоритмом управљања позицијом. Потом је изведен поступак идентификације параметара линеарне и хармонијске компензације. У наставку је представљен поступак дистрибуиране методе за самокалибрацију, прилагођене хетерогеној инфраструктури аутомобилске комуникационе мреже. Показано је како се поступци идентификације параметара компензације реализују применом дистрибуиране методе, а затим и како се сама дистрибуирана метода самокалибрације реализује применом стандардних комуникационих протокола намењених аутомобилској индустрији.

Експериментална резултати добијени током израде ове дисертације представљени су у шестом поглављу. Прво је представљена експериментална поставка, организована око наменски конструисане експерименталне апаратуре. Представљена је механичка конструкција апаратуре, њена експериментална конфигурација, а затим и електронски мерни подсистем. Даље су представљене софтверске компоненте, дизајниране да емулирају реално окружење, као и њихово распоређивање на експерименталној поставци. Затим су представљени резултати верификације модела магнеторезистивног претварача угаоне позиције. Показано је да се предложени модел добро поклапа са експерименталним резултатима, и потврђене су хипотезе уведене при његовом креирању. На крају су представљени резултати верификације методе за дистрибуирану самокалибрацију, као и резултати њеног поређења са постојећим решењима.

Коначно, седмо поглавље садржи сумарну анализу резултата, закључке који се могу извести о предложеним методама, као и предлог за даља истраживања.

У прилогу А је изложена физичка анализа магнетизма танког феромагнетног филма. Прво су изложене карактеристике спонтане магнетизације које су последица геометрије и демагнетизационих фактора. Затим је изложен модел густине слободне енергије, као збир магнетокристалне, магнетостатичке и Зиманове слободне енергије. Показано је да се слободна енергија магнетокристалне и магнетостатичке анизотропије могу карактеризирати

помоћу карактеристичног магнетног поља и осе „лаке“ магнетизације, као функције угла који спонтана магнетизација образује са осом „лаке“ магнетизације. На крају је изведен модел кохерентне ротације спонтане магнетизације, као и услови стабилности који су последица магнетног хистерезиса.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација одликује се савременошћу и оригиналношћу у приступу решавању проблема који су од великог значаја за област технологије мерења угаоне позиције у серво системима. Примењене су актуелне методе моделовања и дистрибуиране обраде података, што одражава дубоко разумевање актуелних трендова и изазова у овој области. Оригиналност рада огледа се у развоју новог физичког модела магнеторезистивних сензора који укључује систематске грешке, као и у предложеном методу дистрибуиране самокалибрације, који обједињује иновативне алгоритме и оптимизационе технике.

Најзначајније карактеристике оригиналног реализованог решења у односу на постојеће реализације су:

- постигнута мерна несигурност је мања од 0.5° , што је за ред величине боља тачност од постојећих метода самокалибрације, и упоредиво са резултатима савремених *End-Of-Line* метода калибрације;
- увођење дистрибуираног приступа у процес самокалибрације, заснованог на подели рачунарских ресурса, показало се као изузетно ефикасно решење за смањење рачунарског оптерећења и убрзање конвергенције решења.
- предложени метод дистрибуиране самокалибрације се може извршити на основу изразито скромног скупа улазних података, прикупљених током једног пуног угла ротације осовине при максималној брзини, што је значајно побољшање у односу на постојеће градијентне алгоритме самокалибрације који захтевају податке током 50 до 100 пуних ротација осовине претварача;
- недовољни рачунарски капацитети микроконтролера који се уобичајено примењују у савременим актуаторима надомештени су дистрибуирањем израчунавања, употребом слободних капацитета централног рачунара;
- дистрибуирање рачунски захтевних задатака на централни рачунар је омогућило директно израчунавање оптималног решења;
- потребни ресурси микроконтролера актуатора су минимизовани извођењем целобројних, итеративних, имплементација делова метода који се извршавају на самом микроконтролеру актуатора; и
- реализована метода не захтева промене алгоритама управљања, већ је намењена за директну интеграцију са оптималним контролером позиције.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Кандидат је детаљно претражио одговарајућу литературу. У дисертацији је наведено 126 референци које су нумерисане према редоследу појављивања у тексту. Референце обухватају фундаменталне као и скорашње научне радове који су у вези са темом докторске дисертације, а који су објављени у међународним часописима и зборницима радова међународних конференција, што потврђује значај, релевантност и савременост теме. Такође,

међу референцама су наведени и радови које је кандидат објавио као аутор, верификујући доприносе дисертације

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Примењене научне методе у овој докторској дисертацији су пажљиво одабране и у потпуности адекватне за остваривање дефинисаних истраживачких циљева. Методологија истраживања у оквиру докторске дисертације састојала се у следећем:

- Детаљно је проучена литература у којој се разматра процес мерења применом магнеторезистивних сензора угла.
- Посебно су разматрана решења која примењују самокалибрацију мерног процеса у циљу унапређења дугорочне тачности мерења.
- Сумирани су и систематизовани резултати објављени у доступној литератури .
- Анализирани су квалитативни недостаци доступних метода, као и недостаци који онемогућавају њихову ефикасну имплементацију на микроконтролерима који се уобичајено користе за израду актуатора.
- Развијен је физички модел процеса мерења, на основу аналитичком приступа заснованог на детаљној анализи систематских грешака изазваних геометријским одступањима сензора и неидеалностима аналогног интерфејса.
- Развијена је метода за идентификацију параметара модела мерења применом оптимизационе технике минимизације алгебарског одступања између читавања сензора и очекиваних вредности модела.
- Применом дистрибуираног приступа у процесу самокалибрације, омогућено је дељење рачунарских ресурса и смањење рачунарског оптерећења.
- Експериментално је потврђена практична примена у реалним условима рада серво система са високим степеном прецизности.

3.4. Применљивост остварених резултата

Остварени резултати у овој докторској дисертацији имају велику применљивост у различитим областима технике и индустрије које захтевају високо прецизно мерење угаоне позиције. Развијени методи и модели могу се успешно применити у пројектовању савремених серво система, роботских актуатора, аутомобилских система управљања, као и у ваздухопловним технологијама. Предложени метод дистрибуиране самокалибрације омогућава континуирано праћење и унапређење мерних процеса у условима где је физички приступ сензору ограничен или немогућ, чиме се повећавају поузданост и дуготрајност уређаја. Осим индустријских примена, резултати су од значаја и за научна истраживања у области мерења, где могу послужити као основа за даљу оптимизацију и развој напредних мерних система.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је током израде докторске дисертације показао изузетан ниво стручности, научне зрелости и способности за самостални научни рад. Током истраживања, кандидат је успешно идентификовао проблеме, формулисао истраживачке циљеве и предложио оригинална решења, што указује на његову способност за независно размишљање и истраживање. Темељно је анализирао доступну научну литературу, препознајући недостатке постојећих

метода и идентификујући области за унапређење. Кроз развој физичког модела и дистрибуиране методе самокалибрације, кандидат је показао креативност и иновативност у приступу научним изазовима. Показао је да је предложена имплементација практично применљива, њеном употребом за самокалибрацију мерног система са одговарајућим сензорима у реалним условима рада. Резултате својих истраживања објавио је у међународним часописима са високим импакт фактором. Комплексност истраживања и успешна реализација експерименталних активности доказују способност кандидата да систематично приступи проблему и организује рад на ефикасан начин.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Научни доприноси ове дисертације обухватају:

- детаљан преглед и класификацију литературе из области мерења угаоне позиције применом магнеторезистивних сензора;
- физички модел магнеторезистивних мерних мостова;
- интеграција модела независних мерних мостова у јединствени физички модел магнеторезистивног сензора правца магнетног поља;
- физички модел магнеторезистивног претварача угаоне позиције;
- мерни процес и систем мерења засновани на физичким моделима магнеторезистивног претварача угаоне позиције;
- метода за самокалибрацију мерног процеса;
- метода за идентификацију параметара линеарне компензације;
- метода за идентификацију параметара хармонијске компензације;
- увођење дистрибуираног приступа за идентификацију параметара;
- реализација дистрибуиране методе на мрежном систему аутомобилске платформе 5. генерације;
- експериментална потврда делотворности предложених метода;
- нови правци истраживања у области мерења применом магнеторезистивних сензора.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Резултати истраживања представљени у овој докторској дисертацији указују на значајан научни и практични допринос области магнеторезистивних сензора и њихове примене у серво системима. Развијени физички модел магнеторезистивних сензора угаоне позиције, који укључује систематске грешке настале услед производних одступања и неидеалности аналогног интерфејса, представља кључни корак у побољшању разумевања и постизању веће тачности ових сензора. Овај модел пружа стабилну основу за будућа истраживања и практичну примену у реалним индустријским окружењима.

Иновативна метода дистрибуиране самокалибрације, која обједињује податке добијене током рада сензора и оптимизационе технике за идентификацију параметара модела, успешно превазилази ограничења традиционалних метода. Бржа конвергенција предложеног решења у поређењу са постојећим методама и значајно смањење мерних грешака потврђују

применљивост предложеног приступа у пракси. Постигнута је ред величине боља тачност мерења у поређењу са иницијалним стањем технике, са мерном несигурношћу бољом од 0.5°, што је изузетан резултат.

4.3. Верификација научних доприноса

Из најуже области непосредно везане за тему доктората, кандидат је први аутор једног рада у врхунском међународном часопису (катеорије M21), први аутор једног рада на међународној конференцији (катеорије M33), коаутор једног рада на међународној конференцији (катеорије M33), и први аутор једног рада у националном часопису (катеорије M53):

Категорија M21:

1. V. Čeperković, V. Rajović, M. Prokin, „A distributed method for self-calibration of magnetoresistive angular position sensor within a servo system,“ *Sensors* 2022, 22(16), 5974, 2022, (IF=3.847) (DOI: 10.3390/s22165974).

Категорија M33:

1. V. Čeperković, M. Prokin, D. Prokin, „Single Buffered Angular Speed Measurement Method for Self-Calibration of Magnetoresistive Sensors,“ *Proceedings of 12th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO) 2023*, Budva, Montenegro, 2023, pp. 1 4, (DOI: 10.1109/MECO58584.2023.10155004).
2. M. Prokin, V. Čeperković, D- Prokin, „Double Buffered Angular Speed Measurement Method for Self-Calibration of Magnetoresistive Sensors,“ *Proceedings of 12th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO) 2023*, Budva, Montenegro, 2023, pp. 1 4, (DOI: 10.1109/MECO58584.2023.10155085).

Категорија M53:

1. V. Čeperković, V. Drndarević, „Metod za samokalibraciju magnetno-rezistivnog senzora ugaone pozicije u servo sistemima,“ *Tehnika*, vol. 69, no. 4, pp. 469-476, 2020, (DOI: 10.5937/tehnika2004469C).

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

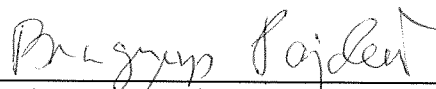
Докторска дисертација представља свеобухватно и систематично истраживање у области магнеторезистивних сензора угаоне позиције и њихове примене у серво системима. Кроз интеграцију теоријских и експерименталних приступа, кандидат је понудио иновативна решења за побољшање тачности и поузданости мерења, са посебним акцентом на развој нових модела и метода дистрибуиране самокалибрације. Резултати доприносе разумевању мерења у магнеторезистивним сензорима и омогућавају практичну примену у роботима, аутомобилима и ваздухопловним технологијама. Предложене методе, засноване на физичком моделовању и дистрибуираној обради података, побољшавају поузданост и применљивост у условима неприступачности или ограничених ресурса. Резултати истраживања имају висок потенцијал за примену у индустрији, нарочито у областима као што су роботика, аутоматизација, аутомобилска индустрија и ваздухопловне технологије. Предложени

приступ дистрибуиране самокалибрације омогућава унапређење рада магнеторезистивних сензора у условима ограниченог физичког приступа или неповољног окружења, чиме се повећава дуготрајност и поузданост система. Кандидат је показао научну зрелост, креативност и способност за самосталан рад, успешно реализујући иновативна решења и њихову примену. Дисертација представља вредан научни допринос и основ за даљи развој у истраживању и пракси.

На основу свега наведеног, Комисија констатује да је кандидат Владимир Чеперковић испунио све формалне и суштинске услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Комисија има задовољство да предложи Наставно-научном већу да се докторска дисертација под називом „Дистрибуирана метода за самокалибрацију магнеторезистивног сензора угаоне позиције у серво систему“ кандидата Владимира Чеперковића прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, дана 29. 01. 2025.

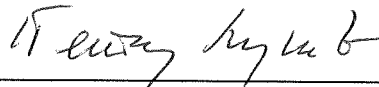
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Владимир Рајовић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Радивоје Ђурић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др. Петар М. Лукић, редовни професор
Универзитет у Београду – Машински факултет