

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај о урађеној докторској дисертацији кандидата **Луке Миличића**,
маст.инж.маш.

Одлуком Наставно-научног већа Универзитета у Београду - Машинског факултета бр. 20/5 од 09.07.2026. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Луке Миличића, маст.инж.маш., под називом:

"New algorithm for optimal impact angle guidance"

(„Нови алгоритам оптималног вођења са ограничењем упадног угла“).

После прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала Комисија је сачинила следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања израде дисертације

Кандидат **Лука Н. Миличић, маст. инж. маш.**, уписао је Докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду школске 2020/2021. године. У складу са дефинисаним планом студија и програмом усавршавања, положио је све испите са просечном оценом 10,00 (десет) и одбранио пројекат идеје докторске дисертације.

Кандидат је 03.11.2025. године поднео захтев за одобрење теме докторске дисертације број 1572/1 на Катедри за системе наоружања Машинског факултета Универзитета у Београду. Кандидат је предложио за ментора др Милоша Марковића, ванредног професора Машинског факултета у Београду.

На основу сагласности Катедре за системе наоружања број 1572/2 од 3.12.2025. године, Наставно-научно веће Универзитета у Београду – Машинског факултета донело је 11.12.2025. године Одлуку бр. 1572/3 о именовању Комисије за оцену научне заснованости теме предметне докторске дисертације у саставу:

- др Предраг Елек, редовни професор, Универзитет у Београду – Машински факултет,
- др Александар Обрадовић, редовни професор, Универзитет у Београду – Машински факултет,
- др Милан Ристановић, редовни професор, Универзитет у Београду – Машински факултет,
- др Милош Марковић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Машински факултет,
- др Олег Черкасов, доцент, Московски државни универзитет „Ломоносов“, Факултет за механику и математику.

Комисија је поднела Извештај Наставно-научном већу Универзитета у Београду – Машинског факултета бр. 20/1 од 12.01.2026. године, а Наставно-научно веће донело је Одлуку бр. 20/2 од 15.01.2026. године о прихватању овог Извештаја, којом се одобрава предложена тема, а за ментора је именован др Милош Марковић, ванредни професор.

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду 18.03.2026. године доноси Одлуку бр. 61206-845/2-26 којом се даје сагласност на Одлуку Наставно-научног већа Машинског факултета о прихватању теме докторске дисертације Луке Миличића под називом „Нови алгоритам оптималног вођења са ограничењем упадног угла“ и именовању др Милоша Марковића, ванредног професора за ментора.

На основу обавештења ментора да је кандидат Лука Миличић завршио израду докторске дисертације, као и предлога колегијума наставника Катедре за системе наоружања, Наставно-научно веће Универзитета у Београду – Машинског факултета 09.07.2026. године доноси Одлуку бр. 20/5 о именовању Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације у саставу:

- др Предраг Елек, редовни професор, Универзитет у Београду – Машински факултет,
- др Милош Марковић, ванредни професор, (ментор), Универзитет у Београду – Машински факултет,
- др Александар Обрадовић, редовни професор, Универзитет у Београду – Машински факултет,
- др Милан Ристановић, редовни професор, Универзитет у Београду – Машински факултет,
- др Олег Черкасов, доцент, Московски државни универзитет „Ломоносов“, Факултет за механику и математику.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација Луке Миличића под називом "New algorithm for optimal impact angle guidance" („Нови алгоритам оптималног вођења са ограничењем упадног угла“) припада научној области техничких наука – Машинско инжењерство, ужа научна област Војно машинство – системи наоружања, за коју је матичан Машински факултет Универзитета у Београду.

Израдом ове докторске дисертације руководио је ментор др Милош Марковић, ванредни професор Универзитета у Београду - Машинског факултета на Катедри за системе наоружања, који у протеклих десет година има 6 објављених радова на SCI листи из области система наоружања.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Лука Миличић је рођен [REDACTED]. Основну школу „Филип Кљајић Фића“ завршио је 2011. године са просечном оценом 5,00, након чега уписује средњу школу „Ваздухопловна академија“ у Београду, смер – Техничар ваздушног саобраћаја. Средњу школу завршава 2015. године са просечном оценом 5,00, након чега уписује Машински факултет Универзитета у Београду. 2017. године учествује на такмичењу у знању на Машинијади из предмета Математика 3 где осваја прво место. Године 2018. такође учествује на такмичењу у знању на Машинијади где осваја прво место из предмета Математика 3 и прво место из предмета Механика. Током завршне године Основних академских студија учествовао је у одржавању наставе из предмета Машински елементи 1 и Машински елементи 2 као демонстратор. Основне академске студије завршава 2018. године са просечном оценом током студирања 10,00. Завршни рад на тему „Оптимизација основних параметара у фази општег развојног пројектовања невођене артиљеријске ракете“ из предмета Конструкција ракетног наоружања је радио под менторством проф. др Момчила Милиновића и одбранио са оценом десет. Као један од најбољих студената Машинског факултета на основним академским студијама добијао је Похвале поводом Дана Машинског факултета за изванредан успех. Такође, током трајања Основних академских студија био је стипендиста Фонда за младе таленте Републике Србије „Доситеја“, као и стипендиста Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

Након завршених Основних академских студија на истом факултету 2018. године уписује Мастер академске студије на модулу Системи наоружања. Током Мастер академских студија учествовао је у извођењу наставе на Основним академским студијама на предмету Конструкција ракетног наоружања, Катедре за системе наоружања. Током прве године Мастер академских студија био је стипендиста Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, а током друге године стипендиста Министарства одбране. Мастер академске студије завршава 2020. године са просечном оценом током студирања 10,00. Мастер рад на тему „Синтеза алгорита вођења противоклопне вођене ракете“ из предмета Вођење и управљање пројектила је радио под менторством доц. др Иване Тодић и одбранио са оценом десет. Током Мастер академских студија добијао је Похвале поводом Дана Машинског факултета за изванредан успех, а по завршетку студија проглашен је за студента генерације уписане на факултет школске 2015/2016. године.

Након завршених Мастер академских студија на истом факултету 2020. године уписује Докторске академске студије, где прве две године завршава са просечном оценом десет.

Од марта 2021. године запослен је на Машинском факултету Универзитета у Београду као сарадник у звању асистента са пуним радним временом за ужу научну област Системи наоружања – Војно машинство, где учествује у извођењу вежби на предметима Механика лета пројектила, Динамика лета и аеродинамика пројектила, Вођење и управљање пројектила, Конструкција ракетног наоружања, Пројектовање ракета и лансера.

Од јуна 2021. године учествује у реализацији научноистраживачких задатака у оквиру пројекта “Интегрисана истраживања у области микро, макро и нано машинског инжењерства”.

У свакодневном раду користи следеће програмске пакете: C, C++, C#, Python, Matlab, Simulink, LaTeX, Microsoft Office.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата **Луке Миличића, маг. инж. маш.**, под називом "New algorithm for optimal impact angle guidance" („Нови алгоритам оптималног вођења са ограничењем упадног угла“) написана је на укупно 284 стране А4 формата на енглеском језику. Докторска дисертација садржи 155 слика, 32 табеле и листу од 109 библиографских референци, а чине је следећа поглавља:

1. Увод (Introduction)
2. Оптимално вођење (Optimal guidance)
3. Примена алгоритама оптималног вођења (Application of optimal guidance algorithms)
4. Закључак (Conclusion)

Литература (References)

Прилог А. Принцип минимума (Minimum principle)

Прилог Б. Нумеричке методе (Numerical methods)

Прилог Ц. Симулација лета са шест степени слободе (Six-degree-of-freedom simulation model).

Наведеним поглављима претходе: насловна страна на енглеском језику, насловна страна на српском језику, страна са подацима о менторима и члановима Комисије на енглеском и српском језику, захвалница, сажетак докторске дисертације на енглеском и српском језику, садржај, списак слика, списак табела, и списак коришћених ознака и скраћеница.

Након наведених поглавља и прилога дати су: кратка биографија аутора, Изјава о ауторству, Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и Изјава о коришћењу.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу дисертације дата су општа разматрања и увод у предметну научну област. Дефинисан је проблем вођења летелица у оквиру научних дисциплина навигације, вођења и управљања, и представљени су основни захтеви који се постављају приликом синтезе система вођења. Прегледом научне литературе установљени су недостаци постојећих метода из групе оптималних закона вођења и дефинисани су предмет и циљ истраживања, полазне хипотезе, и научне методе истраживања. На крају овог поглавља истакнут је очекивани научни и стручни допринос, и представљен је план истраживања са структуром рада.

У другом поглављу постављен је оптимизациони проблем минимизације управљачке енергије на трајекторијама са дефинисаним углом вектора брзине у тачки циља. Применом Понтрјагиновог принципа минимума, добијен је двотачкасти гранични проблем и указано је на потешкоће његовог решавања уобичајеним нумеричким методама. Због тога је у наставку дат поступак којим се овај проблем своди на проблем решавања једне нелинеарне једначине, истичући значајно мању потребу за рачунарским ресурсима неопходним за његово решавање. Представљен је општи алгоритам за одређивање оптималне вредности управљачке величине на основу тренутног положаја летелице и оријентације вектора брзине. Размотрен је и специјални случај пењања крстареће ракете, за који је закон вођења дат у затвореној форми по величинама стања. На крају другог поглавља извршено је поређење предложеног поступка вођења са најрелевантнијим методама из прегледаних литературних

извора, и закључено је да су добијене трајекторије јединствене и оптималне са становишта управљачке енергије.

У трећем поглављу извршена је детаљна анализа практичне примене предложене методе оптималног вођења. Анализиране су нумеричке методе неопходне за рачунање управљачке величине и одређена је горња граница грешке ових метода. Установљен је очекивани број итерација поступка за решавање нелинеарне једначине и предложен је алгоритам за одређивање вредности елиптичког интеграла који фигурише у њој, којим се постиже захтевана тачност уз минимални број рачунских операција. На тај начин, добијен је поступак којим је обезбеђено фиксно време извршавања, што је и додатно потврђено експериментима на реалном хардверу. У наставку поглавља описани су поступци имплементације предложених алгоритма на летним рачунарима оперативних летелица, уз оптимизацију у циљу примене у реалном времену. Коначна верификација алгоритма извршена је кроз детаљна лабораторијска испитивања софтвера и хардвера, уз симулације летних услова за два система од интереса: крстареће и балистичке ракете. Приказани су резултати остварени у присуству реалних поремећаја, несавршености у изради, и ограничених маневарских способности. Испитан је утицај грешака навигационог система и неидеалног рада управљачког система. У завршном делу трећег поглавља представљени су резултати успешног летног испитивања крстареће ракете на којој је имплементирана метода оптималног вођења предложена у дисертацији, чиме је потврђена функционалност алгоритма.

У последњем, четвртом поглављу, издвојени су закључци читаве дисертације, у оквиру којих су описани остварени циљеви током рада на њој. Дати су потенцијални правци будућих истраживања у области напредних система вођења летелица, и предложени поступци за додатну примену и даљи развој предложених метода.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација Луке Миличића под називом "New algorithm for optimal impact angle guidance" („Нови алгоритам оптималног вођења са ограничењем упадног угла“) представља савремен и оригиналан допринос у области система наоружања.

У оквиру дисертације, развијен је алгоритам којим се у реалном времену одређује команда вођења (захтевано нормално убрзање) за постизање енергетски оптималних трајекторија, за мисије код којих постоји ограничење крајњег угла вектора брзине. Оригиналност предложене методе потврђена је поређењем са најрелевантнијим законима вођења исте намене, где је показано да су добијене трајекторије јединствене. Додатно, за разлику од већине постојећих метода, за имплементацију алгоритма неопходно је располагати само стандардним навигационим подацима: позицијом и брзином, без потребе за естимацијом додатних величина. За специјалан случај пењања крстареће ракете предложен је и потпуно нови закон вођења у форми повратне спреге.

За потребе извршавања главног алгоритма развијени су и посебни поступци за рачунање свих помоћних величина, који се убрајају у оригиналне доприносе из области нумеричке интеграције, одређивања дозвољених грешака нумеричких метода, као и алгоритма оптимизованих за рад у реалном времену на рачунским машинама ограничене прецизности. Сви поступци су проверени у лабораторијском окружењу на реалном хардверу, уз софтвер који је развијен за потребе верификације нових метода.

Предложени алгоритми валидирани су испитивањем за два савремена средства у оперативној употреби: балистичку ракету мањег домета и крстарећу ракету пете генерације, на којој је и

летним испитивањем потврђена успешна имплементација новог алгоритма оптималног вођења.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде докторске дисертације кандидат је детаљно истражио постојећу релевантну литературу, која покрива посматрану научну област. У уводном делу докторске дисертације кандидат је навео значајне референце из области вођења летелица различитих намена, које су релевантне за тему докторске дисертације. Доступна литература, која је у дисертацији цитирана и издвојена у посебном поглављу, била је полазна основа за приказ постојећег стања у области истраживања, а делом и мотивација за развој новог алгоритма вођења због недостатака постојећих метода. На основу обима коришћене литературе може се закључити да је кандидат имао темељан увид у досадашње доприносе у овој и блиским научним областима, који су обједињени у више референтних књига, одбрањених докторских дисертација и радова из реномираних међународних часописа.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У току рада на докторској дисертацији коришћене су следеће научне методе истраживања:

- Преглед и анализа доступне научне литературе из области вођења летелица, са акцентом на оптималне законе вођења са дефинисаним углом вектора брзине у тачки циља.
- Аналитичко моделирање проблема вођења применом нелинеарног кинематског модела сусрета вођеног објекта и стационарног циља и формулацијом оптимизационог проблема.
- Примена теорије оптималног управљања, ради свођења полазног проблема на двотачкасти гранични проблем.
- Аналитичко упрошћавање добијеног проблема на облик погодан за нумеричко решавање у реалном времену.
- Примена нумеричких метода за решавање нелинеарних једначина и нумеричку интеграцију.
- Нумеричко моделирање лета са шест степени слободе за потребе валидације предложене методе вођења и анализу применљивости у присуству реалних ограничења, поремећаја и грешака у изради.
- Оптимизација параметара алгоритма и анализа утицаја нумеричких апроксимација и ограничене тачности на квалитет решења.
- Компаративна анализа предложене методе са постојећим и конвенционалним законима вођења применом одговарајућих критеријума.
- Анализа утицаја грешака у навигационим подацима, променљиве брзине, кашњења у одговору управљачког система, и кашњења у ажурирању параметара у закону вођења на остварене трајекторије и укупан утрошак енергије.
- Експериментална верификација предложеног алгоритма кроз лабораторијска и летна испитивања, уз анализу добијених резултата.

Примењене методологије истраживања у потпуности одговарају стандардима научно-истраживачког рада у области техничко–технолошких наука и довеле су до остваривања дефинисаних научних циљева докторске дисертације.

3.4. Применљивост остварених резултата

Остварени резултати током истраживања која су приказана у оквиру докторске дисертације, осим научног значаја имају и широк спектар практичне примене, нарочито у области вођења ракетних пројектила. Предложени алгоритам оптималног вођења могуће је користити у циљу побољшања перформанси у следећим сценаријима:

- Почетно вођење крстарећих ракета током фазе пењања на жељену висину крстарења.
- Вођење кроз контролне тачке током фазе крстарења.
- Завршно вођење на циљ са дефинисаним упадним углом.
- Вођење балистичких ракета на основу жељеног профила угла вектора брзине.
- Дејствовање по циљевима великим упадним угловима у циљу смањивања утицаја навигационих грешака.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Током израде докторске дисертације докторанд Лука Н. Миличић, маг. инж. маш., показао је способност да самостално препозна и решава научно-истраживачке и инжењерске проблеме на иновативан начин, као и да самостално овладава напредним методама теоријског и експерименталног карактера користећи релевантне литературне изворе. Наведено истраживање представља добру основу за успешан самосталан научно-истраживачки рад кандидата у будућности. Резултати остварени током израде докторске дисертације доказ су компетентности кандидата за самостални научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Успешном реализацијом циљева истраживања у оквиру докторске дисертације под називом "New algorithm for optimal impact angle guidance" („Нови алгоритам оптималног вођења са ограничењем упадног угла“) кандидата Луке Миличића, остварени су следећи научни доприноси:

- Развој рачунски ефикасног алгоритма за одређивање команде вођења којом се остварују оптималне трајекторије са становишта управљачке енергије, при дефинисаној оријентацији вектора брзине у тачки циља.
- Формирана је методологија имплементације предложеног алгоритма оптималног вођења на микроконтролерима ограничених рачунарских ресурса, оптимизована за рад у реалном времену.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

На основу прегледа релевантне научне литературе и сагледавања постојећих решења из области ове докторске дисертације, Комисија констатује да су приказани резултати истраживања значајни и научно утемељени. Истовремено, на основу увида у задате циљеве истраживања и резултате представљене у докторској дисертацији, констатујемо да су пружени одговори на сва релевантна питања и да су решени сви проблеми са којима се кандидат сусрео у току истраживања.

Током израде дисертације, развијен је оригиналан поступак за одређивање оптималне команде вођења у реалном времену, који омогућава постизање поготка циља под жељеним упадним углом. За разлику од осталих приступа, за примену предложеног алгоритма неопходно је располагати само стандардним навигационим подацима: позицијом и брзином летелице. Додатно, развијена је методологија имплементације наведеног поступка на реалан хардвер и верификована је лабораторијским и летним испитивањима. Примењени приступ развоја методе оптималног вођења представља драгоцену подлогу за анализу и побољшање нових поступака за решавање све захтевнијих проблема вођења и управљања летелица.

4.3. Верификација научних доприноса

Део доприноса докторске дисертације верификован је у раду који је кандидат публиковао у међународном часопису који је на SCI листи, категорије M21:

- [1] **Miličić L.**, Obradović A., Todić I., Pejčev A. (2026). Real-Time Algorithm for Nonlinear Optimal Impact Angle Guidance. *Aerospace*, 13(5), 439.
<https://doi.org/10.3390/aerospace13050439>

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу прегледа и детаљне анализе докторске дисертације под називом "New algorithm for optimal impact angle guidance" („Нови алгоритам оптималног вођења са ограничењем упадног угла“), кандидата Луке Миличића, маг. инж. маш., Комисија за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације констатује да урађена дисертација представља оригиналан научни допринос у научној области машинско инжењерство, ужа научна област: војно машинство – системи наоружања, да је дисертација написана према свим стандардима научноистраживачког рада и да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Машинског факултета Универзитета у Београду.

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације констатује да је кандидат Лука Миличић, маг. инж. маш., успешно завршио докторску дисертацију у складу са предвиђеним предметом и постављеним циљевима истраживања.

Комисија предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да прихвати овај Извештај, да дисертацију "New algorithm for optimal impact angle guidance" („Нови алгоритам оптималног вођења са ограничењем упадног угла“), кандидата Луке Миличића, маг. инж. маш., заједно са овим Извештајем стави на увид јавности у складу са законским одредбама и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 20.07.2026.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Др Предраг Елек, редовни професор,
Универзитет у Београду - Машински факултет

.....
Др Милош Марковић, ванредни професор,
Универзитет у Београду - Машински факултет

.....
Др Александар Обрадовић, редовни професор,
Универзитет у Београду - Машински факултет

.....
Др Милан Ристановић, редовни професор,
Универзитет у Београду - Машински факултет

.....
Др Олег Черкасов, доцент, Московски државни
универзитет „Ломоносов“ – Факултет за механику
и математику