

**НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ**  
**ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА**

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Saif Al Ameri**, студента докторских студија

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета у Београду, бр. 2445/2 од 1.11.2018. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације докторанда **Saif Al Ameri, MSc**, под насловом

**„Синтеза алгоритама навигације и вођења пројектила заснованих на машинском учењу“**  
**(Missile Guidance Navigation and Control Algorithms Design Based on Machine Learning)**

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

**РЕФЕРАТ**

**1. УВОД**

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Saif Al Ameri се уписао на Докторске студије Универзитета у Београду Машинског факултета, школске 2015/2016 године и по програму ових студија, током прва четири семестра положио је све испите са одличним успехом. Од јула 2013. године запослен је у компанији Emirates Advanced Research and Technology Holding из Абу Дабија, на позицији Senior Guidance Navigation Control Engineer. Истовремено је укључен у рад фирме EDePro – Engine Design and Production – Београд, где ради на истраживању и развоју система за управљање и вођење пројектила. Из обимног развојног и истраживачког рада који је имао у фирми EDePro, издвојени су резултати који се односе на област Система наоружања, а који би били база за дефинисање теме и садржине докторске дисертације. На основу ових договора, Saif Al Ameri је урадио и одбранио Пројект идеје дисертације, из којег је дефинисана сама тема. Израда дисертације под насловом **„Синтеза алгоритама навигације и вођења пројектила заснованих на машинском учењу“** (“**Missile Guidance Navigation and Control Algorithms Design Based on Machine Learning**”) одобрена му је одлуком Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду, број 61206-3530/2-18. од 27.08.2018. године.

## 1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација **Saif Al Ameri** под насловом „Синтеза алгоритама навигације и вођења пројектила заснованих на машинском учењу“ (“**Missile Guidance Navigation and Control Algorithms Design Based on Machine Learning**”) припада области техничких наука – машинство, ужа научна област Системи наоружања, за коју је матичан Машински факултет Универзитета у Београду.

За ментора је именован др Драган Лазић, редовни професор за област аутоматско управљање. Додатно примењене методе и приступи покривене су компетенцијама осталих чланова Комисије.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

**Saif Al Ameri**, је рођен 6. априла 1988. године у Ал Аину у Уједињеним Арапским Емиратима. По пресељењу у Шарџах, УАЕ, 2005. године је завршио средњу школу The Sharjah American International School, након чега добија стипендију за студирање у САД. Најпре похађа програм енглеског језика на Универзитету Пенсилванија у периоду 2006-2006. Започео је студије Електротехнике на Универзитету Пурду у САД, али се 2010. враћа у УАЕ, где се уписује на Електротехнички факултет Америчког Универзитета у Дубаиу. Основне академске студије завршава 2013. године, након чега се прикључује компанији Emirates Advanced Research and Technology Holdings, и бива послату у Србију да настави школовање. Завшрава мастер студије на Универзитету у Београду Машински факултет са темом мастер рада „Оптимизација алгорита праћења“. Године 2015. уписује се на докторске студије на Универзитету у Београду Машински факултет.

Током докторских студија наставља да ради у компанији EARTH на развоју алгоритама управљања и вођења. Укључен је у вођење тима за навигацију и управљање. Бави проблемима управљања и вођења пројектила ради реализације задате мисије лета и стабилизацију кинематских параметара лета применом модерних техника машинског учења.

Током студија и рада на развоју алгоритама вођења и управљања, овладао је комплексним коришћењем програмских пакета MS Office (Word, Excel, Power Point, Project), MATLAB, Simulink, програмским језицима C, C++, C#, Art7 with  $\mu$ Vision IDE, Arduino, Python, Assembly for 8085 Microprocessor.

Течно говори, чита и пише арапски и енглески језик.

Од награда и признања, Saif Al Ameri је дипломирао са наградом Magna Cum Laude, а за успех током година студирања се редовно појављивао на Декановој листи.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација „Синтеза алгоритама навигације и вођења пројектила заснованих на машинском учењу“ (“**Missile Guidance Navigation and Control Algorithms Design Based on Machine Learning**”) је обима 262 страница, са 396 слика (скица, дијаграма, фотографија и других илустрација).

Дисертација је подељена у осам поглавља: Увод, Увод у машинско учење, Математичко моделовање, Синтеза аутопилота, Синтеза вођења, Синтеза навигације, Имплементација и верификација и Закључак. Рад садржи и Захвалност као и Литературу.

## 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Уводно поглавље обухвата приказ основних циљева и садржаја предвиђених истраживања, а то је истраживање потенцијалних бенефита од примене метода машинског учења у системима аутоматског управљања и вођења пројектила. Конкретно, даје се фокус на истраживање могућности интеграције машинског учења у терминалној фази вођења, као алтернативи пропорционалној навигацији, интеграцији ИНС-а и GPS-а и употреби Калмановог филтра. Такође, истражује се примена машинског учења на синтези аутопилота по каналима пропињања, скретања и ваљања, насупрот традиционалним решењима са ПИД управљачким алоритмима. У раду се полази се од главне претпоставке, будући да је пројектил динамички аутономни систем, да је он врло прецизно математички моделован, без било каквих упрошћавања која су неверодостојна реалном моделу, па се самим тим захтева математички модел који описује све нелинеарне и нестационарне карактеристике пројектила.

Поглавље „Увод у машинско учење“ даје приказ теорије машинског учења. Обрађују се три главне категорије машинског учења – надгледано, ненадгледано и појачано учење. Такође, даје се увод у вештачке неуронске мреже. Описују се методе тренирања неуронских мрежа, генетски алгоритми и фитнес функције, као и неуроеволуција са појачаном топологијом. Као велики изазов, истиче се проблем синтезе неуронске мреже за вођени пројектил као динамички систем, а то је обучавање мреже када се обрасци не понављају, односно, када је неопходно обучити мрежу да се задовољавајуће понаша у свим могућим ситуацијама током мисије.

Развој нелинарног и нестационарног математичког модела лета пројектила је детаљно приказан у поглављу „Математичко моделовање“. Коришћен је елиптички модел Земље познат као WGS84. Промене температуре, притиска и густине ваздуха су моделоване стандарним COESA атмосферским моделом. Приказани су сви координатни системи који се користе у моделовању кинематике лета пројектила и одговарајуће трансформације. Дат је приказ математичком модела са 6 степени слободе (6DOF). Коришћен је модел пропулзије мотора пројектила. Преко аеродинамичких дериватива, дефинисани су аеродинамичке силе и моменти. Дате су аеродинамичке преносне функције као основа за синтезу и тестирање аутопилота пре непосредне имплементације. Усвојене су структуре преносних функција по каналу ваљања, односно пропињања и скретања, као и преносна функција по нормалном убрзању. У математичком моделу је узета и динамика покретача управљачких крила.

У поглављу „Синтеза аутопилота“, раздвојени су аутопилоти по каналу ваљања, одн. пропињања и скретања. Приказана је усвојена пропорционално диференцијална структура аутопилота стабилизације пројектила по каналу ваљања и извршено иницијално подашавање коефицијената. Код канала пропињања/скретања, усвојена је модификована верзија пропорционално-диференцијално-интегралног регулатора, а коефицијенти су иницијално аналитички одређени методом подешавања полова. Као одговор на класичне аутопилоте, извршена је синтеза два јединствена аутопилота са неуронским мрежама, по каналима ваљања, одн. пропињања/скретања. При том, иако су аутопилоти по каналима пропињања/скретања исте структуре, њихово обучавање и имплементација је урађена засебно. За структуру аутопилота са неуронском мрежом по каналу ваљања је усвоја мрежа са простирањем сигнала унапред, при чему број од десет скривених слојева даје оптимални дизајн. Обучавање неуронске мреже је извршено NEAT методом, при чему је коришћен нелинаран и нестационаран модел лета ракете. За структуру аутопилота са неуронском мрежом по каналу пропињања/скретања је усвоја мрежа са простирањем сигнала унапред, при чему број од петнаест скривених слојева даје оптимални дизајн. Обучавање неуронске мреже је извршено NEAT методом, при чему је коришћен нелинаран и нестационаран модел лета ракете.

Поглавље „Синтеза вођења“ се бави синтезом алгоритма вођења пројектила у терминалној фази лета. Алгоритам вођења је реализован неуронском мрежом, где је улаз у мрежу брзинска грешка линије визирања циља, а излаз нормално убрзање. Оптимални резултат је постигнут мрежом са десет скривених слојева.

Поглавље „Синтеза навигације“ се бави одређивањем положаја тела у простору на основу уређаја интерцијалне навигације на бази магнетно електромеханичких сензора везаних за тело. У дисертацији се користи Саличев алгоритам инерцијалне навигације. Алгоритам навигације представља интеграцију инерцијалне навигације асистираан од стране GPS-а путем неуронске мреже. Неуронска мрежа служи за предикцију положаја тела у NED координатном систему и реализована је са простирањем сигнала унапред, са десет скривених слојева. За обучавање мреже коришћен је потпуни нелинеарни нестационарни модел лета пројектила.

У поглављу „Имплементација и верификација“ је детаљно приказано окружење у коме је извршена верфикација развијених алгоритама. Нелинарни нестационарни модел лета пројектила је развијен у Матлаб Симулинк окружењу. Извршене су нумеричке симулације и дато поређење алгоритама навигације, вођења и управљања реализованих неуронским мрежама насупрот традиционалним. Алгоритам терминалне навигације са неуронском мрежом је поређен са алгоритмом пропорционалне навигације за различите домете и почетне услове. Алгоритам аутопилота по каналима ваљања, одн. пропињања/скретања са неуронском мрежом је поређен са ПИД управљачким алгоритмом. Коначно, алгоритам интеграције ИНС-а и GPS-а са неуронским мрежама је поређен са Калмановим филтром.

„Закључак“ обухвата резиме рада укључујући сублимацију научних и стручних доприноса као и предлог праваца даљих истраживања у овој области. Издвојени су значајни научни доприноси остварени радом на реализацији постављеног циља. Исто тако остварени су врло важни технички резултати који су били изазов и полазиште да се започне овај рад. Показано је да алгоритам навигације са неуронском мрежом развијен машинским учењем показује знатно унапређење у поређењу са стандардним решењем са пропорционалном навигацијом. За аутопилот по каналима ваљања и пропињања је показано да алгоритам са неуронском мрежом позиказује знатно прецизније понашање, док код канала скретања модификовани ПИД алгоритам ради боље. За интеграцију ИНС-а и GPS, показано је да алгоритам са неуронском мрежом прецизнији и може да буде одржива алтернатива.

### **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

#### 3.1. Савременост и оригиналност

У дисертацији је обрађена проблематика и феномени који су присутни у савременим вођеним средствима. Општи тренд у развоју система инерцијалне навигације је да се они заснивају на примени ценовно приступачних решења на бази МЕМС технологије, који, с друге стране захтевају интеграцију и асистенцију GPS-а. Задовољење ових тренова отвара нове феномене за истраживање, развој алгоритама и имплементацију. Сва питања и активности обухваћене Дисертацијом су у складу са овим трендом.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Оригиналност и иновативност ових истраживања чини да слични резултати нису значајно заступљени у литератури. Усклађеност са актуелним истраживањима у свету присутна је у овој Дисертацији кроз приказ и примену принципа решавања аналогних проблема код других сличних решења. Укључено је више од 25 референци са овом тематиком из релеватне литературе из ове области истраживања. На овај начин је тематика и садржина Дисертације усклађена са научним трендом и развојем решења која су предмет овога рада. Осим тога остварен је склад са научним трендом у области аутоматског управљања и вођења пројектила који подразумева подизање нивоа својстава, квалитета рада и понашања техничких система.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У оквиру ове дисертације примењене су методе нумеричке, теоријске и комбиноване методе. Нумерички алгоритми за решавање кретања пројектила у реалној средини су базирани на методологији симулације нелинеарних нестационарних динамичких система. Нумеричка имплементација развијеног математичког модела, као и синтетисаних алгоритама управљања је извршена у програмском окружењу МАТЛАБ Симулинк. Методе естимације параметара инерцијалног навигационог система се базирају на примени Калмановог филтра и вештачких неуронских мрежа.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Као што је у претходном тексту наведено, главни циљ Дисертације је развој алгоритама управљања и вођења пројектила на основу савремених метода машинског учења. С обзиром да методе машинског учења налазе примену у великом броју савремених технологија и апликација, нови резултати из ове области дају велики потенцијал за решавање инжењерских проблема који се иначе теже решавају традиционалним путем. Развијени алгоритми могу да се примене не само на вођене ракетне пројектиле, што је био случај у овој Дисертацији, већ на широку класу аутономних система, као што су авиони, хеликоптери, летећи роботи и слично.

### 3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је потпуно способан за самостални научни рад, што је и потврдио радом на овој дисертацији. У току рада, имао је прилику да ради тиму који се бави развојем и имплементацијом решења у области вођења и управљања пројектила на активним пројектима. Кроз активности на реализацији ових пројеката, кандидат се оспособио са самостално постављање проблема и анализу научних метода које је могуће применити у циљу његовог решавања. Осим склоности ка тимском раду, испољио је смисао за координацију рада тима, планирање, вођење, реализацију и представљање научноистраживачког, развојног и стручног рада.

## 4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Планирана и изведена истраживања у овој Дисертацији довела су до резултата која представљају допринос развоју научне мисли, а могу се сврстати у следеће ставке:

- Развијен нелинеарни нестационарни математички модел вођеног пројектила.
- Детаљни симулациони модел у МАТЛАБ Симулинк окружењу за симулацију динамичког понашања нестационарног нелинеарног модела пројектила у реалном геодетском координатном систему и реалним атмосферским условима.
- Алгоритам интегрисаног навигационог система ИНС-а и GPS-а.
- Алгоритам аутопилота.
- Алгоритам вођења.

### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања и доприноса инжењерској пракси

Сама Дисертација је планирана и заснована на развојном раду и резултатима у којима је кандидат учествовао и водио за потребе пројекта на коме је учествовао. Пошто је реч о развојном раду он се заснива на достигнућим знањима и техничким решењима која су у почетном периоду рада била на располагању. Сам приступ да се начини иновативни искорак, био је изазов, а и потреба да се и у научном смислу учини значајан искорак. Чињеница да је постојала потреба за коришћењем савремених МЕМС сензора, који су прихватљиви са становишта доступности, цене и једноставности уградње, имплицирала је неопходност за компромисом и пројектовањем ИНС-а асистираним од стране GPS-а. Такво техничко решење захтева изналажење метода за елиминисање несавршености оваквих система и повећање тачности до нивоа прихватљивог у експлоатацији. Добро познате традиционалне методе са собом носе ограничења. У овом раду се истражује и даје предлог решења са модерним приступом путем машинског учења и приказују потенцијалне предности у односу на класично решење у интеграцији ИНС-а, GPS-а и аутопилота.

### 4.3. Верификација научних доприноса

Резултате својих истраживања Saif Al Ameri, је верификовао у раду:

#### Kategorija M23

Saif ALAMERI, Dragan LAZIĆ, Milan RISTANOVIĆ: *A Comparative Study of PID, PID With Tracking, and FPID Controller for Missile Canard with an Optimized Genetic Tuning Method Using Simscape Modelling*, Technical Gazette, (2018), Year 2018, Vol. 25, Suppl. 2, pp. 427-436.

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Прегледом и анализом, Комисија је утврдила да Дисертација представља оригинално научно дело са значајним научним и техничким доприносима. Развијен је нестационарни нелинеарни модел кретања вођеног пројектила у реалним условима окружења. Извршена је синтеза алгоритама аутопилота по каналима ваљања, пропињања и скретања применом машинског учења. Извршена је синтеза алгоритама вођења применом машинског учења. Извршена је интеграција ИНС-а и GPS-а применом машинског учења. Показано је да уведени алгоритми управљања, вођења и интеграције могу да буду одржива алтернатива традиционалним решењима.

На основу прегледа докторске дисертације, Комисија за оцену и одбрану дисертације предлаже Наставно-научном већу да се докторска дисертација под називом **„Синтеза алгоритама навигације и вођења пројектила заснованих на машинском учењу“**. (**Missile Guidance Navigation and Control Algorithms Design Based on Machine Learning**), кандидата **Saif Al Ameri**, студента Докторских студија, прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

проф. др Драган Лазић, ментор  
Универзитет у Београду, Машински факултет

в.проф. др Милан Ристановић,  
Универзитет у Београду, Машински факултет

доцент др Ивана Тодић,  
Универзитет у Београду, Машински факултет

проф. др Марко Милош,  
Универзитет у Београду, Машински факултет

проф. др Жарко Ђојбашић,  
Универзитет у Нишу, Машински факултет