

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
Машински факултет

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о завршеној докторској дисертацији кандидата
Биљане Илић, дипл. маш. инж.

Одлуком број 1165/3 од 01.06.2017. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Биљане Илић, дипл. маш. инж., са насловом:

**ХИБРИДНИ СИСТЕМ УПРАВЉАЊА СТРУЈАЊЕМ
У АЕРОТУНЕЛИМА ВЕЛИКИХ БРЗИНА**

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

Кандидат Биљана Илић, дипл. маш. инж., пријавила је израду докторске дисертације под називом **“Хибридни систем управљања струјањем у аеротунелима великих брзина”** Машинском факултету у Београду, 08.02.2016. године под бројем 312/1. Кандидат је за менторе предложила др Слободана Ступара, ред. проф. и др Марка Милоша, ванр. проф..

На основу пријаве кандидата, Колегијум наставника Катедре за ваздухопловство је дао сагласност (број 312/2 од 08.09.2016. године) на предлог теме докторске дисертације и предлог ментора.

Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду, на основу пријаве кандидата и сагласности Катедре за ваздухопловство, донело је одлуку (број 312/3 од 15.09.2016. године) да се прихвата тема докторске дисертације **“Хибридни систем управљања струјањем у аеротунелима великих брзина”**, да се именују ментори др Слободан Ступар, ред. проф. и др Марко Милош, в. проф., и да се именује Комисија за оцену подобности теме и кандидата у саставу др Слободан Ступар, ред. проф., др Марко Милош, ванр. проф., др Златко Петровић, ред. проф., др Александар Симоновић, ванр. проф. и др Слободан Гвозденовић, ред. проф. (Саобраћајни факултет у Београду).

Комисија за оцену подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације и научне заснованости теме “Хибридни систем управљања струјањем у аеротунелима великих брзина” поднела је реферат (број 312/4 од 29.09.2016. године) у коме предлаже да се одобри тема докторске дисертације, наводећи да је пријављена тема адекватна за израду докторске дисертације, да кандидат испуњава законске услове и да има истраживачке квалификације за рад на докторској дисертацији.

Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду је на седници одржаној 20.10.2016. године донело одлуку (број 312/5) да се прихвата научна заснованост теме и да кандидат испуњава услове за израду докторске дисертације.

Рад на пријављеној дисертацији је одобрен одлуком Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду број 61206-5410/2-16 од 31.10.2016. године.

Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду је решењем број 1065/1 од 15.05.2017. године одобрило продужетак рока за завршетак докторских студија за два семестра у школској 2016/2017. години, на основу молбе кандидата (број 9/12125) од 26.09.2016. године.

На основу извештаја ментора, др Слободана Ступара, ред. проф. у пензији и др Марка Милоша, ванр. проф. (број 1165/1 од 26.05.2017. године), да је кандидат Биљана Илић, дипл. маш. инж., завршила докторску дисертацију, као и предлога Катедре за ваздухопловство (број 1165/2 од 29.05.2017. године), Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду је на седници одржаној 01.06.2017. године донело одлуку (број 1165/3) о именовању Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације у саставу др Слободан Ступар, ред. проф. у пензији (ментор), др Марко Милош, ванр. проф. (ментор), др Златко Петровић, ред. проф., др Александар Симоновић, ред. проф. и др Слободан Гвозденовић, ред. проф. (Саобраћајни факултет у Београду).

1.2 Научна област дисертације

Докторска дисертација **“Хибридни систем управљања струјањем у аеротунелима великих брзина”** припада области Техничких наука, научној области Машинства, а ужој научној области Ваздухопловства, за коју је матичан Машински факултет Универзитета у Београду.

1.3 Биографски подаци о кандидату

Биљана Г. Илић је рођена 23. марта 1974. године у Ужицу. Основну школу и гимназију је завршила у Ужицу, са одличним успехом. Студије Машинског факултета Универзитета у Београду уписала је 1993. године, као прва на листи. Дипломирала је 18.06.1999. године, на Катедри за ваздухопловство, са просечном оценом током студија 9.24, одбранивши дипломски рад из области управљања летелицама на тему “Нелинеаран модел кретања авиона у простору” са оценом 10. Докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду уписала је 2010. године.

У Војнотехнички институт у Београду је примљена 2001. године на позицију истраживача сарадника, где је до 2006. године обављала посао тест инжењера у Одсеку аеротунела малих брзина Сектора за експерименталну аеродинамику. У

том периоду је била ангажована на извођењу сложених аеродинамичких испитивања модела ваздухопловних и неваздухопловних објеката у аеротунелима малих брзина. Водила је тим одговоран за аеротунелска испитивања модела авиона за почетну обуку, модела беспилотне летелице, падобрана, више модела ракета и ветротурбина. Такође је учествовала у вишегодишњем истраживању квалитета струјања у аеротунелима малих брзина, у оквиру кога је успостављена процедура периодичне калибрације и верификације аеротунела малих брзина VTI T-35, уз поређење резултата испитивања модела стандардне геометрије са референтним светским аеротунелима.

На позицију самосталног истраживача у Одсеку аеротунела великих брзина Сектора за експерименталну аеродинамику је постављена 2006. године, где је као систем инжењер почела да се бави својим основним истраживачким интересом, а то је управљање струјањем, област која комбинује методе теорије управљања и механике флуида, односно аеродинамике, а која је тек почела интензивније да се развија. У периоду до 2009. године водила је тим одговоран за управљање аеротунелима великих брзина, првенствено за управљачки систем аеротунела великих брзина VTI T-38, најкомплексније и најангажованије инсталације Сектора за експерименталну аеродинамику. Бавила се активностима потребним за безбедан и ефикасан рад аеротунела, уз истовремено увођење унапређења у погледу аутоматизације рада и нових експерименталних метода, чиме су значајно проширене могућности испитивања у аеротунелу VTI T-38 и повећана његова конкурентност у односу на светске аеротунеле.

На позицију водећег истраживача у Сектору за експерименталну аеродинамику изабрана је 2009. године. Делокруг рада за који је задужена су управљачки системи свих аеротунела Сектора за експерименталну аеродинамику и вођење тимова задужених за исправност система и безбедан, ефикасан и неометан рад. Аутор је концепта модернизације управљачких система аеротунела Сектора за експерименталну аеродинамику. Тренутно води пројекте увођења нових управљачких система у три аеротунела Војнотехничког института (VTI T-32, VTI T-35 и VTI T-38) и одговорна је за све активности у вези са њиховом интеграцијом, од идејног решења до конкретне реализације.

Учествовала је у више истраживачких задатака Министарства одбране Републике Србије у оквиру Војнотехничког института за потребе Војске Србије:

- Истраживање утицаја новог система за прихват модела и инјекторског система на параметре струјања у аеротунелу малих брзина VTI T-35 (2003-2006. године)
- Истраживање унутрашњих аеродинамичких вага високе крутости за коришћење у аеротунелу великих брзина VTI T-38 (2009-2010. године)
- Истраживање могућности побољшања квалитета мерења на високим Маховим бројевима у аеротунелу VTI T-38 (2011-2012. године)
- Истраживање могућности побољшања квалитета мерења у аеротунелу малих брзина VTI T-35 (2013-2016. године)
- Истраживање и развој нових метода испитивања у аеротунелима (2017-2019. године).

Током професионалне каријере је била ангажована у више десетина сложених аеродинамичких испитивања у аеротунелима Војнотехничког института у оквиру уговора са домаћим и међународним клијентима.

У више прилика је водила стручне курсеве Сектора за експерименталну аеродинамику за полазнике из иностранства у области експерименталне аеродинамике и техника мерења у аеротунелима. Аутор је више аеротунелских техничких информација.

Од јуна 2011. године је сертификовани LabVIEW програмер (NI Certified LabVIEW Developer), после положеног испита у оквиру процеса сертификације компаније National Instruments (Austin, Texas, USA).

Током 2011. године похађала је стручни курс „Инструментација и обрада сигнала“ („Instrumentation and Signal Processing“) у организацији Факултета за примењене науке Универзитета Кренфилд у Великој Британији (School of Applied Sciences, Cranfield University, United Kingdom). Курс је модул MSc и PhD студија у програму школовања на универзитету и посвећен је напредним техникама обраде сигнала са мерне опреме, а намењен је инжењерима са искуством у области техника мерења.

Аутор је и коаутор 32 интерна стручна извештаја у оквиру Војнотехничког института, 1 научно-техничке информације, 14 радова на међународним научно-стручним конференцијама, 7 радова у међународним научно-стручним часописима и 3 техничка решења. Говори, чита и пише енглески, руски и италијански језик.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1 Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Биљане Илић, дипл. маш. инж., под називом „Хибридни систем управљања струјањем у аеротунелима великих брзина“ је документ формата А4 са текстом на српском језику на 223 стране. Дисертација садржи следећа поглавља:

- 1 Увод
- 2 Аеротунели
- 3 Стање у области управљања струјањем у аеротунелима великих брзина
- 4 Модел аеротунела великих брзина
- 5 Анализа система управљања струјањем у аеротунелима великих брзина
- 6 Синтеза система управљања струјањем у аеротунелима великих брзина
- 7 Хибридна управљачка хијерархија у аеротунелима великих брзина
- 8 Експериментални резултати
- 9 Закључак
- 10 Литература
- 11 Прилози

Дисертација има 121 слику, 18 табела и наведено је 175 библиографских референци.

2.2 Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу су образложени мотиви за избор теме докторске дисертације. Дефинисани су предмет и циљеви истраживања, постављене су полазне хипотезе и дат је преглед коришћених научних метода.

У другом поглављу је објашњен општи принцип рада аеротунела, уз кратак преглед типова инсталација у оквиру неколико начина класификације. Затим је дефинисан тип аеротунела великих брзина који ће бити разматран у дисертацији, уз кратак опис аеротунела VTI T-38 (Војнотехнички институт, Београд) као репрезентативног у овом истраживању. Поглавље се завршава освртом на захтеве који се у овом тренутку постављају пред аеротунеле како би у будућности могли да раде у складу са концептом лабораторије 21. века.

У трећем поглављу је разматрано стање у области управљања струјањем у аеротунелима великих брзина. Описани су принципи управљања Маховим бројем, уз кратак осврт на методе прорачуна геометријског профила млазника. Затим су представљени принципи управљања Рејнолдсовим бројем, заједно са детаљним прегледом истраживања у овој области током претходне три деценије. Поглавље се завршава дискусијом о разлозима за промену парадигме управљања у аеротунелима, као и потенцијалним решењима која могу да доведу до систематског приступа у овој области.

У четвртном поглављу је развијен математички модел аеротунела великих брзина, базиран на контролним механизмима процеса струјања и неколико претпоставки, а са циљем да се користи у синтези система за управљање струјањем у аеротунелима великих брзина. На основу математичког модела је развијен симулациони модел, који је омогућио физичку верификацију и експерименталну верификацију модела аеротунела великих брзина.

У петом поглављу је обављена анализа система управљања струјањем у аеротунелима великих брзина. Идентификована су два кључна проблема важна за побољшање управљања, како у погледу тачности, тако и у погледу трошкова. Први проблем се односи на раздвајање утицаја динамике управљачких елемената од динамике струјања, а други на оцењивање губитка притиска услед експанзије у комори умирења. Дат је предлог решења за оба проблема, као и предлог нове методологије управљања базиране на каскадној управљачкој архитектури са директном компензацијом поремећаја.

У шестом поглављу је дат оквир за синтезу каскадног система управљања струјањем, при чему синтеза управљања примарним процесом у датом облику може да се примени на сваки аеротунел великих брзина, док синтеза управљања секундарним процесом зависи од управљачких елемената у конкретном аеротунелу, а примена је демонстрирана за аеротунел VTI T-38. Развијен је симулациони модел за синтезу система управљања струјањем, а нумеричке симулације су реализоване за аеротунел VTI T-38.

У седмом поглављу је разматрана општа архитектура хибридних динамичких система, са тежиштем на њеној примени у аеротунелима великих брзина. Предложена је хијерархијска управљачка архитектура која омогућава имплементацију развијене методологије управљања струјањем базиране на каскадној архитектури, заједно са решењем за интерфејс дискретне и континуалне динамике. Имплементација каскадне архитектуре у управљачкој хијерархији је илустрована за аеротунел VTI T-38.

У осмом поглављу су анализирани резултати експерименталне верификације система управљања у аеротунелу VTI T-38. Обављена је компаративна анализа резултата експеримената и нумеричких симулација, као и резултата експеримената са старим и новим системом управљања у аеротунелу VTI T-38. Дата је анализа утицаја жељених и почетних услова на управљање, заједно са анализом перформанси система управљања струјањем.

У деветом поглављу је образложен научни допринос дисертације и предложени су могући правци даљих истраживања на бази представљених резултата.

У десетом поглављу је наведена литература коришћена при изради докторске дисертације.

У једанаестом поглављу су садржана два прилога. У првом прилогу су, у облику табела и дијаграма, детаљно представљени резултати прорачуна притиска у управљачком вентилу и губитка притиска услед експанзије у комори умирења за 18 експеримената на девет Махових бројева, као допуна резултатима прорачуна за четири експеримента на два Махова броја који су дати у петом поглављу. У другом прилогу су дати резултати 22 експеримента на 11 Махових бројева којима је експериментално верификован систем управљања у аеротунелу VTI T-38.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1 Савременост и оригиналност

Докторска дисертација “Хибридни систем управљања струјањем у аеротунелима великих брзина” даје систематску методологију која представља оригиналан оквир за управљање струјањем у аеротунелима великих брзина, а са применом и у широј области управљања струјањем. Намера кандидата је била да комбиновањем метода из две широке области истраживања – механике флуида, односно аеродинамике и теорије управљања – омогући бољи физички увид у струјање флуида у аеротунелима великих брзина, сматрајући да резултат такве анализе може да буде нови приступ у управљању динамичким системима базираним на струјању флуида. Имајући у виду каскадну природу сваког физичког система у коме постоји активно управљање струјањем, као и инхерентну нелинеарност таквих система, препоручена је каскадна управљачка архитектура са директном компензацијом поремећаја. Примењене методе управљања – линеарни каскадни алгоритам са повратном спрегом и нелинеарни алгоритам компензације поремећаја – резултат су детаљне анализе динамике процеса струјања и динамике процеса у управљачком елементу, као и њихових међусобних утицаја.

Оригиналност и савременост приступа примењеног у дисертацији се првенствено огледају у синергији метода теорије управљања и аеродинамике, области које се већ деценијама независно развијају, док су се озбиљнији напори усмерени на систематско обједињавање ових области појавили релативно скоро. Алтернативни приступи који се у пракси користе за управљање струјањем у аеротунелима су базирани искључиво на методама теорије управљања и типични су по великим трошковима интеграције система, обимним тестирањима пре пуштања у рад и великом броју управљачких параметара, уз упадљиво непостојање систематске и утврђене методологије развоја ових система. Научна оправданост израде ове докторске дисертације је стога у чињеници да проблем управљања струјањем у аеротунелима није раније разматран на начин представљен у дисертацији. Разматрањем физичких принципа процеса и њиховог узајамног дејства у раној фази пројектовања система развијена је оригинална методологија управљања струјањем у аеротунелима великих брзина, која доноси побољшање тачности управљања и енергетске ефикасности рада аеротунела, као и смањење трошкова интеграције система и обима тестирања пре пуштања у рад.

Посебан допринос истраживања се огледа у креирању функционалног модела за симулацију одзива аеротунела великих брзина на промене улазних параметара, као и функционалног модела за синтезу система управљања струјањем.

3.2 Осврт на референтну и коришћену литературу

Списак литературе која је коришћена у докторској дисертацији је дат у посебном поглављу. Прегледом списка коришћене литературе закључено је да је кандидат у доброј мери располагала савременом референтном литературом из области теоријске и експерименталне аеродинамике, теорије система аутоматског управљања, управљања струјањем, модела процеса и анализе модела, теорије хибридних система, као и литературом која се бави савременим методама активног управљања струјањем у аеротунелима и другим системима. Извори су били међународни научни часописи, стручни уџбеници и књиге, зборници са међународних научних и стручних конференција, технички извештаји, као и референтна документа, попут патената и поглавља из енциклопедија. Литература на српском језику у већини наведених области је оскудна, а у области управљања струјањем у аеротунелима практично је и нема. Литерарни извори који су кандидату послужили за систематизацију постојећих сазнања из области којима се бави докторска дисертација су коректно цитирани.

Прегледом доступне литературе нису пронађени примери примене методологије предложене у дисертацији на управљање струјањем у аеротунелима или другим системима који свој рад базирају на управљању струјањем.

3.3 Опис и адекватност примењених научних метода

Пројектовање система за управљање струјањем је вишедисциплинарна активност која у примени у аеротунелима подразумева комбиновање метода из две области истраживања – аеродинамике и теорије управљања. На основу теоријских и практичних резултата доступних у литератури, као и на основу претходних искустава кандидата, пројектовање је подељено на више корака који заједно чине систематску методологију управљања струјањем у аеротунелима великих брзина.

У поступку постизања научних резултата у истраживању је коришћено више научних метода, које могу да се класификују у оквиру логичког дела научног рада и истраживања, теоријско-методолошког приступа и технике истраживања.

У оквиру логичког дела научног рада и истраживања коришћене су метода анализе и метода синтезе. *Функционална анализа* је коришћена за откривање међусобних односа, повезаности и зависности у области предмета истраживања. Применом ове методе анализирана је сложена међусобна веза динамике струјања и динамике управљачког елемента, присутна како у аеротунелима великих брзина, тако и у свим системима у којима постоји неки облик активног управљања струјањем. *Компаративна анализа* је коришћена за утврђивање сличности и разлика међу ранијим истраживањима у области предмета истраживања. На основу ове анализе је утврђено да је заједничко за ранија истраживања непостојање систематске методологије управљања струјањем у аеротунелима великих брзина, а да се понуђена решења разликују по комплексности примењених метода управљања. *Факторска анализа* је коришћена

за одређивање најважнијих фактора у области предмета истраживања. Неки од фактора који су у овој анализи идентификовани као важни за управљање струјањем су губици услед експанзије иза управљачког елемента и раздвајање утицаја динамике струјања и динамике управљачког елемента, као и потреба за променом централизоване парадигме управљања у аеротунелима. *Репродуктивна синтеза* је коришћена за синтезу система управљања на бази обављених анализа и увођења у разматрање нових фактора.

У оквиру теоријско-методолошког приступа коришћене су метода моделовања, компаративна метода и статистичка метода. *Метода моделовања* је примењена у развоју математичког модела аеротунела великих брзина, као и математичког модела примарног управљачког система у оквиру каскадне управљачке архитектуре. На основу математичких модела аеротунела и управљачког система развијени су симулациони модели. *Симулација* је коришћена за испитивање одзива аеротунела на промене улазних параметара, као и за синтезу система управљања струјањем и подешавање управљачких параметара. *Компаративна метода* је коришћена за упоређивање експерименталних резултата са резултатима симулација, односно за експерименталну верификацију математичког модела аеротунела и система за управљање струјањем. Иста метода је коришћена за упоређивање резултата остварених са старим и новим управљачким системом у аеротунелу VTI T-38. *Статистичка метода* је коришћена за анализу и обраду експерименталних података.

У оквиру технике истраживања, за прикупљање података је коришћена *експериментална метода*. Применом ове методе је реализовано прикупљање података потребних за унапређење математичког модела аеротунела и његову експерименталну верификацију, као и за експерименталну верификацију система за управљање струјањем у аеротунелима великих брзина.

У дисертацији су тако коришћене теоријске, експерименталне и нумеричке научне методе, које су адекватне за предмет истраживања, правилно су примењене у анализи добијених резултата и омогућиле су извођење релевантних закључака.

3.4 Применљивост остварених резултата

Радом на докторској дисертацији остварени су значајни резултати са трајном научном вредношћу и практичном применљивошћу у области управљања струјањем у аеротунелима великих брзина, као и у широј области управљања струјањем.

Теоријска знања су проширена првенствено на пољу обједињавања механике флуида, односно аеродинамике, и теорије управљања, комбиновањем метода из ове две широке истраживачке области које су се до сада углавном развијале независно. Увођењем у разматрање других релевантних фактора, ова знања могу да буду основа и за друга истраживања у области управљања струјањем.

Значајна практична и употребна вредност се огледа у развијеним моделима и процедурама, који омогућавају симулацију одзива аеротунела на промене улазних параметара и синтезу система управљања струјањем у аеротунелима, а који су добар оквир и за пројектовање система управљања струјањем у општем случају.

Предлогом систематске методологије управљања струјањем у аеротунелима великих брзина тако је створен потенцијал за њену универзалну и флексибилну примену и у пројектовању других система у којима постоји неки облик активног

управљања струјањем, односно у којима управљачке елементе покрећу актуатори за чији је рад потребан неки облик енергије, а приоритет представљају висока тачност и енергетска ефикасност. Како развијена методологија предвиђа разматрање физичких принципа процеса у раној фази пројектовања, очекује се да њена примена и у другим системима доведе до побољшања квалитета управљања и знатно смањених трошкова интеграције система, слично као у случају аеротунела великих брзина.

3.5 Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Чланови комисије сматрају да је кандидат показала способност да самостално и систематски решава инжењерске и научне проблеме, да користи расположиву литературу и да успешно влада савременим истраживачким методама. Поседује широко теоријско знање и практично искуство потребно за даљи успешан научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1 Приказ остварених научних доприноса

Ова дисертација је документовано проширила постојећа знања и остварила научни допринос у области управљања струјањем у аеротунелима великих брзина, као и у области управљања струјањем у општем случају.

Остварени су следећи научни доприноси:

- Развијена је систематска методологија управљања струјањем у аеротунелима великих брзина, а са применом и у широј области управљања струјањем.
- Развијен је математички модел за симулацију одзива аеротунела великих брзина на промене улазних параметара, у који је на адекватан начин укључен утицај губитка притиска у комори умирења.
- Дефинисана је метода за процену губитка притиска у комори умирења услед експанзије иза управљачког елемента.
- Дефинисан је приступ за међусобно раздвајање утицаја динамике процеса струјања и утицаја динамике процеса у управљачком елементу на аеродинамичко појачање управљачког елемента који се користи за активно управљање струјањем.
- Развијен је математички модел за симулацију система управљања струјањем у аеротунелима великих брзина, који представља оквир за пројектовање, интеграцију, анализу перформанси, анализу безбедности и функционални развој система.
- Предложен је приступ за пројектовање хибридног хијерархијског система управљања струјањем са дистрибуираним управљачким функцијама којим се уводи нова парадигма управљања у аеротунелима великих брзина.

- Систем управљања струјањем је пројектован, интегрисан и експериментално верификован у аеротунелу VTI T-38 (Војнотехнички институт, Београд), где је постигнуто значајно побољшање тачности управљања струјањем и енергетске ефикасности експеримената у односу на претходни систем управљања.

У оквиру дисертације су решени досадашњи недостаци у области управљања струјањем у аеротунелима великих брзина. Неки од њих су следећи:

- У доступној литератури не постоји математички модел аеротунела великих брзина у коме је разматран утицај губитка притиска у комори умирења услед експанзије иза управљачког елемента, а разлог су тешкоће у одређивању овог губитка. Метода за процену губитка притиска у комори умирења развијена у овом истраживању, базирана на итеративној нумеричкој процедури и експерименталним подацима, омогућава доста тачно предвиђање преласка критичног у подкритично струјање у управљачком елементу, а тиме и компензовање овог извора нелинеарности процеса струјања.
- Математички модели аеротунела великих брзина доступни у литератури се углавном свде на карактеристике управљачког вентила које даје произвођач. Недостатак овог приступа је занемаривање сложеног процеса струјања у осталим компонентама аеротунела, као и применљивост само на појединачну инсталацију у којој се користи тај тип вентила. Математички модел аеротунела развијен у овом истраживању је модел са концентрисаним параметрима, са свим главним компонентама аеротунела као контролним запреминама, и универзално је применљив на све аеротунеле великих брзина. У оквиру модела је занемарена динамика актуатора који покрећу управљачке елементе, због разноврсности решења која се користе у различитим аеротунелима. Како су актуатори ефективно део управљачког система, а не аеротунела као објекта управљања, узимање у обзир динамике актуатора је предвиђено у математичком моделу за симулацију система управљања струјањем у аеротунелима великих брзина, који је такође развијен у овом истраживању.
- У доступној литератури је проблем управљања притиском струјања у аеротунелима великих брзина углавном решаван повратном спрегом по притиску, са жељеном позицијом управљачког вентила као управљачким излазом. Имајући у виду бар неколико пута бржу динамику процеса у управљачком вентилу у односу на динамику процеса струјања, без обзира на примењену методу управљања, приступ са једном повратном спрегом онемогућава компензовање нелинеарности и поремећаја процеса у управљачком вентилу пре него што њихов ефекат постане приметан на притиску струјања као управљаној променљивој. У овом истраживању је проблем решен увођењем две повратне спреге у каскадној архитектури, где је једна повратна спрега по позицији управљачког вентила, а друга по притиску струјања. Нелинеарност процеса у управљачком вентилу се тако решава у унутрашњој петљи каскадног управљачког система, без утицаја на спољну петљу која се бави процесом струјања.

- Због изразите нелинеарности процеса струјања у аеротунелима великих брзина, системи управљања струјањем доступни у литератури су типични по великом броју различитих управљачких параметара који се користе у радном опсегу аеротунела. Поред великих трошкова интеграције система услед обимног тестирања и подешавања система пре пуштања у рад, овај приступ даје неуједначену тачност управљања у радном опсегу. Алгоритам директне компензације дефинисан у овом истраживању, базиран на основним једначинама струјања и мерењу поремећаја, ефективно елиминише највећи део нелинеарности процеса струјања и омогућава да се, поред њега, за додатну корекцију преостале грешке управљања користи једноставан линеарни алгоритам са повратном спрегом и са једним сетом управљачких параметара у читавом радном опсегу. Овај алгоритам је универзално применљив у свим аеротунелима великих брзина. Тачност управљања притиском струјања која је применом алгоритма директне компензације и ПИ алгоритма са једним сетом управљачких параметара постигнута у аеротунелу VTI T-38 је уједначена у читавом радном опсегу и износи 0.1%, и то је према изворима из литературе најбоља тачност која је до сада постигнута у аеротунелима великих брзина.
- Један од највећих проблема у аеротунелима великих брзина је губитак енергије у првој фази експеримената, током успостављања жељеног притиска струјања. Због великих разлика у масеном протоку у различитим деловима радног опсега аеротунела, овај процес је веома нелинеаран. Приступ примењен у овом истраживању, базиран на алгоритму директне компензације и линеарном алгоритму са повратном спрегом, омогућава да се различитим уделом алгоритма са повратном спрегом у укупном управљању оствари минимално трајање успостављања притиска струјања које је уједначено у радном опсегу аеротунела. Време успостављања притиска струјања које је применом алгоритма директне компензације и ПИ алгоритма са једним сетом управљачких параметара постигнуто у аеротунелу VTI T-38 је уједначено у читавом радном опсегу и износи 2.5 – 3.0 секунди, што је за неколико секунди краће у односу на претходни управљачки систем у овој инсталацији. Процењена уштеда енергије са новим системом управљања у односу на стари систем у аеротунелу VTI T-38 износи око 20%, односно око 5000 kWh на дневном нивоу.
- Каскадна структура сваког система у коме постоји активно управљање струјањем, која подразумева управљање позицијом управљачког елемента и управљање неким параметром струјања, углавном је занемаривана у истраживањима посвећеним управљању струјањем у аеротунелима великих брзина. Услед тога су системи управљања струјањем у аеротунелима великих брзина доступни у литератури централизовани. У овом истраживању је централизована парадигма управљања замењена хибридном хијерархијском архитектуром са дистрибуираним управљачким функцијама, која је до сада коришћена у неким сложеним системима, али не у аеротунелима. Каскадна управљачка архитектура је смештена на два од пет препоручених нивоа хијерархије, где је управљање процесима у управљачким елементима смештено на нижем нивоу, а управљање параметрима струјања на вишем нивоу хијерархије. У аеротунелу VTI T-38 се управљачке петље за процесе у управљачким елементима извршавају

паралелно на програмираним FPGA логичким колима, док алгоритми за управљање параметрима струјања раде на вишем процесорском нивоу. Хардверска архитектура је тако потпуно прилагођена предложеној управљачкој хијерархији.

4.2 Критичка анализа резултата истраживања

У докторској дисертацији је на адекватан начин извршена систематизација постојећих знања из области управљања струјањем у аеротунелима великих брзина.

Истраживања обављена у оквиру дисертације бавила су се побољшањем сличности струјања око модела у аеротунелима великих брзина са струјањем око реалних објеката путем управљања основним параметрима сличности струјања, а то су Махов број и Рејнолдсов број. Занемаривањем промене температуре, проблем управљања Рејнолдсовим бројем је сведен на проблем управљања притиском у комори умирења, односно притиском струјања. Овај приступ је уобичајен у аеротунелској пракси и оправдан ограниченим трајањем испитивања. Даљи рад у овој области би могао да буде усмерен на испитивање утицаја промене температуре и на укључивање овог утицаја у управљање, тако да се уместо управљања притиском струјања ефективно постигне управљање Рејнолдсовим бројем. Један од највећих изазова у том смислу представљаће избор сензора температуре погодних за примену у условима струјања у аеротунелима великих брзина, а са довољно брзим одзивом.

Математички модел аеротунела великих брзина и методологија управљања струјањем предложени у дисертацији се односе на суперсонични опсег брзина. Развијени модел и методологија управљања би могли да се прошире и примене на специфичне проблеме присутне у трансоничном и хиперсоничном опсегу брзина, попут управљања Маховим бројем у трансоничним аеротунелима.

4.3 Верификација научних доприноса

Доприноси докторске дисертације су верификовани кроз следеће радове и друге релевантне резултате објављене од стране кандидата у међународним и домаћим часописима или саопштене на међународним скуповима:

Категорија M14:

1. **Пић В.**, Milosavljević M., Isaković J., Miloš M.: *Stagnation Pressure Transient Control in a High-Pressure Supersonic Blowdown Wind Tunnel Test Facility*, - Materials Today: Proceedings, Vol. 3, No. 4, 2016, pp. 987-992, doi: 10.1016/j.matpr.2016.03.034, ISSN: 2214-7853.

Категорија M21:

2. **Пић В.**, Miloš M., Isaković J.: *Cascade Nonlinear Feedforward-Feedback Control of Stagnation Pressure in a Supersonic Blowdown Wind Tunnel*, - Measurement, Vol. 95, 2017, pp. 424-438, doi: 10.1016/j.measurement.2016.10.046, ISSN: 0263-2241 (IF = 1.742).

Категорија M24:

3. **Илић В.**, Miloš M., Milosavljević M., Isaković J.: *Model-Based Stagnation Pressure Control in a Supersonic Wind Tunnel*, - FME Transactions, Vol. 44, No. 1, 2016, pp. 1-9, doi: 10.5937/fmet1601001I, ISSN: 1451-2092.

Категорија М33:

4. **Илић В.**, Vuković Đ., Milosavljević M.: *A LabVIEW™ based Video Acquisition and Recording System in the T-38 Trisonic Wind Tunnel*, - Proceedings of the 3th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH 2009, Belgrade, 08-09.10. 2009, pp. 1-6, ISBN: 978-86-81123-40-9.
5. Vuković Đ., **Илић В.**, Milosavljević M.: *Upgrade of the Roll-Angle-Setting Mechanism on the Model Support System in the T-38 Wind Tunnel in VTI*, - Proceedings of the 4th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH 2011, Belgrade, 06-07.10. 2011, pp. 23-28, ISBN: 978-86-81123-50-8.
6. **Илић В.**, Milosavljević M., Isaković J.: *Wind Tunnel Flexible Nozzle Position Control*, - 6th International Scientific Conference on Smart Defence Solutions and Technologies HEMUS 2012, Plovdiv, 30.05-02.06. 2012, pp. 1-8.
7. Samardžić M., Anastasijević Z., Marinkovski D., **Илић В.**, Damljanović D., Rajić Z., Ćurčić, D.: *Measurement of Stability Derivatives in Yaw using the Forced Oscillatory Technique*, - 5th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH 2012, Belgrade, 18-19.09. 2012, pp. 26-30, ISBN: 978-86-81123-58-4.
8. **Илић В.**, Milosavljević M.: *A New Control System for the Flexible Nozzle in the T-38 Trisonic Wind Tunnel*, - 6th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH 2014, Belgrade, 09-10.10. 2014, pp. 67-72, ISBN: 978-86-81123-71-3.
9. Vuković Đ., Damljanović D., Ćurčić D., **Илић В.**, Samardžić M., Marinkovski D., Isaković J.: *Experimental Challenges in a High-Reynolds-Number High-Dynamic-Pressure Supersonic Wind Tunnel Facility*, - Proceedings of the 50th 3AF International Conference on Applied Aerodynamics, Toulouse, 29.03-01.04. 2015, Paper ID: FP28-2015-vukovic, pp. 1-8.

Категорија М34:

10. **Илић В.**, Milosavljević M., Isaković J., Miloš M.: *Stagnation Pressure Transient Control in a High-Pressure Supersonic Blowdown Wind Tunnel Test Facility*, - Proceedings of the 32nd Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics, Stary Smokovec, 2015, pp. 82-83, ISBN: 978-80-554-1094-4.

Категорија М83:

11. **Илић В.**, Вуковић Ђ., Милосављевић М., Дамљановић Д., Исаковић Ј., Витић А.: *Систем за визуализацију и снимање испитивања у аеротунелу Т-38*, - Техничко решење у категорији ново лабораторијско постројење, решење: инт. бр. 01/94-186, Војнотехнички институт, Београд, 09.07.2010.
12. Вуковић Ђ., **Илић В.**, Милосављевић М., Исаковић Ј., Ђурчић Д., Оцокољић Г., Дамљановић Д.: *Механизам за промену угла ваљања држача модела у*

аеротунелу са надпритиском, - Техничко решење у категорији ново лабораторијско постројење, решење: инт. бр. 01/94-168, Војнотехнички институт, Београд, 07.06.2015.

Категорија М84:

13. Исаковић Ј., **Илић Б.**, Дамљановић Д., Живковић С., Оцокољић Г.: *Унапређење метода мерења квалитета струјања у аеротунелима*, - Техничко решење у категорији битно побољшана постојећа технологија, решење: инт. бр. 01/94-188, Војнотехнички институт, Београд, 09.07.2010.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Прегледом докторске дисертације кандидата Биљане Илић, дипл. маш. инж., Комисија закључује следеће:

- Тема и резултати остварени у докторској дисертацији су од значаја за развој и унапређење пројектовања система управљања струјањем у аеротунелима великих брзина. Дефинисани математички модели су универзални и могу да се примењују у свим аеротунелима великих брзина прекидног дејства. Методологија управљања струјањем предложена у дисертацији има примену не само у аеротунелима великих брзина, већ и у широј области управљања струјањем.
- Кандидат је у истраживању користила савремене методе и стандардну стручну методологију, а структура дисертације и методологија излагања су у складу са универзитетским нормама.
- Обављеним истраживањима у области управљања струјањем у аеротунелима великих брзина кандидат је показала широко опште знање и искуство у свим елементима пројектовања система управљања струјањем, укључујући математичко моделовање процеса, анализу физичких принципа процеса и њиховог изајамног дејства, анализу и синтезу система управљања и експерименталну верификацију пројектованог система.
- На основу експерименталних резултата истраживања, кандидат је овом дисертацијом дала научни допринос ефикасном развоју система управљања струјањем код којих су основни захтеви висока тачност и енергетска ефикасност, уз минималне трошкове интеграције система. Свеобухватан и систематски приступ у решавању проблема, комбиновање методе из више области истраживања и универзалност понуђених решења дају значајан степен оригиналности докторској дисертацији.
- Остварени научни и практични резултати су верификовани објављивањем радова у међународним часописима, зборницима међународних конференција, као и прихватањем више техничких решења. Радови у међународним часописима су до сада више пута цитирани од стране других аутора.

На основу изложеног, Комисија констатује да је докторска дисертација кандидата Биљане Илић, дипл. маш. инж., “Хибридни систем управљања струјањем у аеротунелима великих брзина” написана према свим стандардима у научно-истраживачком раду, као и да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању, стандардима и Статутом Машинског факултета Универзитета у Београду. Комисија предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да реферат прихвати, дисертацију стави на увид јавности и упути извештај на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду и да се након тога кандидат позове на јавну одбрану.

У Београду, 19. јуна 2017. године

Чланови Комисије за оцену и одбрану:

др Слободан Ступар, ред.проф. у пензији, ментор
Универзитет у Београду, Машински факултет

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

др Златко Петровић, ред.проф.
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Александар Симоновић, ред.проф.
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Слободан Гвозденовић, ред.проф.
Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет