

Факултет МАШИНСКИ

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

Образац 1.

1477/5
(Број захтева)

Већу научних области техничких наука
(Назив стручног већа коме се захтев упућује, сагласно
Члану 6. и чл. 7 став 1. овог Правилника)

18.09.2014.
(Датум)

ЗАХТЕВ
за давање сагласности на предлог теме докторске дисертације

Молимо да сходно чл. 46. ст.5. тач.3. Статута Универзитета у Београду („Гласник Универзитета“, број 131/06), дате сагласност на предлог теме докторске дисертације

РАЗВОЈ НАПРЕДНЕ МЕТОДЕ ПРОРАЧУНА ИНТЕРАКЦИЈЕ ВАЗДУШНЕ СТРУЈЕ И СТРУКТУРЕ ВАЗДУХОПЛОВА У ДОМЕНУ ТРАНСОНИЧНИХ БРЗИНА
(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ Ваздухопловство

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

1. Име, име једног родитеља и презиме кандидата: БОЈАН (ДАРКО) ШЕКУТКОВСКИ

2. Назив и седиште Факултета на коме је стекао високо образовање: Машински факултет Београд

3. Година дипломирања: 2010.

4. Назив магистарске тезе кандидата: /

5. Назив Факултета на коме је магистарска теза одбрањена: /

6. Година одбране магистарске тезе: /

7. Назив Факултета на коме је кандидат уписао докторске студије: Машински факултет Београд

Одсек, смер или група: /

Година уписа докторских студија: 2010

Обавештавамо Вас да је Наставно-научно веће Факултета
(назив надлежног тела Факултета)

на седници одржаној 18.09.2014.
размотрило предложену тему и закључило да је тема подобна за израду докторске дисертације.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић

Прилог:

1. Предлог теме докторске дисертације са образложењем.
2. Акт надлежног тела факултета о подобности теме за израду докторске дисертације.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -

Број: 1477/5

Датум: 18.09.2014. године

Београд, Краљице Марије 16

На захтев Бојана Шекутковског, дипл.инж.маш. - мастер, бр. 1477/1 од 10.07.2014. године, извештаја Комисије у саставу: проф.др Иван Костић, ментор, проф.др Александар Симоновић, коментор, проф.др Зоран Стефановић, проф.др Мирко Динуловић и проф.др Слободан Гвозденовић, Саобраћајни факултет Београд број 1477/4 од 17.09.2014. године, а на основу чл. 30 Закона о високом образовању и чл. 30 Правилника о докторским студијама Машинског факултета Универзитета у Београду, Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду на седници од 18.09.2014. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Прихвата се предлог о испуњености услова и о научној заснованости теме докторске дисертације **«РАЗВОЈ НАПРЕДНЕ МЕТОДЕ ПРОРАЧУНА ИНТЕРАКЦИЈЕ ВАЗДУШНЕ СТРУЈЕ И СТРУКТУРЕ ВАЗДУХОПЛОВА У ДОМЕНУ ТРАНСОНИЧНИХ БРЗИНА»** докторанта **БОЈАНА ШЕКУТКОВСКОГ**, дипл.инж.маш. – мастер.

За ментора докторанту Бојану Шекутковском, именује се **проф.др Иван Костић, коментор проф.др Александар Симоновић.**

Одлуку доставити: Већу Научних области техничких наука Универзитета у Београду на сагласност, ментору и архиви.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић

ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

Предмет: Подобност теме и кандидата Бојана Шекутковског, дипл. инж. маш. - мастера за израду докторске дисертације

Одлуком бр. 1477/3 од 04. 09. 2014. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Бојана Шекутковског, дипл. инж. маш. за израду докторске дисертације и научне заснованости теме „**Развој напредне методе прорачуна интеракције ваздушне струје и структуре ваздухоплова у домену трансоничних брзина**“.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

РЕФЕРАТ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Бојан Д. Шекутковски рођен је 4.2.1986. године у Земуну. Техничку школу “Петар Драпшин”, смер “Ваздухопловни машински техничар”, у Београду, завршио је школске 2004/2005. године где је предложен за ђака генерације. Школске 2005/2006. године уписао је Машински факултет Универзитета у Београду. Основне академске студије завршио је 2008. године, на смеру за Ваздухопловство, одбраном завршног BSc рада: “Идејни пројекат возила на људски погон”, оцена 10 (десет), код професора др Зорана Стефановића. Просечна оцена током Основних академских студија износила је 9.56 (девет, 56/100). Школске 2008/2009. године уписао је Мастер академске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду на смеру за Ваздухопловство. Одбраном мастер рада на тему “Кабински део трупа лаког авиона”, са оценом 10 (десет), код професора др Златка Петровића, стиче академско звање дипломирани инжењер машинства – мастер (19. Март 2010. година), уједно постаје и први дипломирани мастер на Машинском факултету Универзитета у Београду од увођења Болоњског система. Просечна оцена током мастер академских студија износила је 9,91 (девет, 91/100).

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

У мају 2010. године званично је запослен као стручни сарадник у Иновационом центру Машинског факултета у Београду, на међународном пројекту лаког авиона: “BS-03”.

Школске 2010/2011. године уписао је Докторске академске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду, смер за Ваздухопловство. Од новембра 2010. године постаје

сарадник - истраживач на поменутом пројекту лаког авиона.

Као сарадник у настави ангажован је на предметима на основним и мастер академским студијама Машинског факултета Универзитета у Београду, на катедри за Ваздухопловство: “Конструкција и технологија производње летелица” и “Пројектовање летелица”, респективно.

На поменутом пројекту лаког авиона је остварио висок допринос, и као дипломирани машински инжењер својим потписом оверио је већи број извештаја. Непосредно је учествовао у изради конструкције комплетног авиона, као и у лабораторијским статичким испитивањима чврстоће конструкције овог ваздухоплова.

Течно говори и пише Енглески језик и поседује ниво В2 (Задужбина Илије М. Коларца – Центар за наставу страних језика). Познавање рачунара је на високом нивоу, а неки од програмских пакета су: CATIA, OpenFOAM, ANSYS, SolidWorks, Microsoft Office, LaTeX, Microsoft Visual Studio, Adobe Photoshop, GIMP. Оперативни системи: Microsoft Windows, Linux. Програмски језици: Matlab, C/C++, Visaul Basic, Fortran.

Списак објављених радова и других релевантних резултата и активности

Радови у часописима:

Б. Шекутковски, С. Петровић, А. Бојанић, А. Mukhtar, *WINDSHIELD DESIGN FOR THE LIGHT TRAINER AIRCRAFT*, The Journal of Faculty of Technical Sciences – MACHINE DESIGN, Vol. 3 (2011), ISSN 1821-1259, pp. 61-64

Учесће на пројекту лаког тренажног авиона BS-03, Иновациони центар Машинског факултета Универзитета у Београду:

Сви учесници: BASIC ELEMENTS OF FLIGHT TECHNICAL REQUIREMENTS, извештај бр. BS03-C-SP-GD01-01

Сви учесници: REFINED BASIC ELEMENTS OF FLIGHT TECHNICAL REQUIREMENTS, извештај бр. BS03-C-SP-GD17-01

Златко Петровић, Зоран Стефановић, Иван Костић, Александар Пантовић, Ирена Степић, Бојан Шекутковски: LAYOUT OF THE PRIMARY STRUCTURE, извештај бр. BS03-C-TR-GD08-01

Златко Петровић, Александар Пантовић, Бојан Шекутковски: CABIN INTERIOR ARRANGEMENT, извештај бр. BS03-C-TR-GD09-01

Златко Петровић, Александар Пантовић, Бојан Шекутковски: BS-03 ERGONOMIC VERIFICATION, извештај бр. BS03-P-TR-GD06-01

Зоран Стефановић, Златко Петровић, Ирена Степић, Бојан Шекутковски: ASSEMBLY AND SUBASSEMBLY DRAWINGS, извештај бр. BS03-P-TR-GD12-01

Зоран Стефановић, Александар Пантовић, Ирена Степић, Бојан Шекутковски: PRELIMINARY PART DESIGN, извештај бр. BS03-P-SP-GD13-01

Зоран Бојанић, Зоран Стефановић, Александар Пантовић, Златко Петровић, Александар Грбовић, Данило Петрашиновић, Иван Костић, Оливера Костић, Александар Бојанић, Ирена Степић, Бојан Шекутковски: STATIC STRENGTH TEST OF THE WING CASE D-23, извештај бр. BS03-D-TR-TO01-01

Зоран Бојанић, Зоран Стефановић, Александар Пантовић, Златко Петровић, Александар Грбовић, Данило Петрашиновић, Иван Костић, Оливера Костић, Александар Бојанић, Ирена Степић, Бојан Шекутковски: STATIC TEST OF VERTICAL TAIL CASE C-3 AND FUSELAGE UNDER ITS INFLUENCE, извештај бр. BS03-D-TR-TO02-01

Зоран Бојанић, Зоран Стефановић, Александар Пантовић, Златко Петровић, Александар Грбовић, Данило Петрашиновић, Иван Костић, Оливера Костић, Александар Бојанић, Ирена Степић, Бојан Шекутковски: STATIC TEST OF ENGINE MOUNT AND FUSELAGE UNDER ITS INFLUENCE, извештај бр. BS03-D-TR-TO03-01

Зоран Бојанић, Зоран Стефановић, Александар Пантовић, Златко Петровић, Александар Грбовић, Данило Петрашиновић, Иван Костић, Оливера Костић, Александар Бојанић, Ирена Степић, Бојан Шекутковски: STATIC TEST OF HORIZONTAL TAIL, извештај бр. BS03-D-TR-TO04-01

Остале активности

Похађао је курс под називом: “Scientific Computing 1”, predavač: prof dr Hans-Joachim Bungartz, Машински факултет Универзитета у Београду, Мај 2009. године.

Учествовао је на међународном такмичењу студената Ваздухопловства у пројектовању и изради радио-командованих модела авиона у Португалији, Ковиља, 2009. година.

Учествовао је на Red Bull Flugtag такмичењу Јуну 2013. године у овиру тима “Х-2”. Уз сагласност декана Машинског факултета у Београду, Милорада Милованчевића, летелица је успешно склопљена у хангару Машинског факултета. Ово учешће помогло је у стицању допунских знања и вештина у анализи аеродинамичких карактеристика, конструкцији и изради ултра-лаких летелица од композитних материјала.

Активности на докторским студијама

Школске 2010/2011. године уписао је докторске студије на Машинском факултету, на смеру за Ваздухопловство (рег. бр. Д9/10).

ЕСПБ	Прва година (школска 2010/11.)		Друга година (школска 2011/12.)	
	I сем.	II сем.	III сем.	IV сем.
5	Виши курс математике проф. др С. Раденовић оцена: 10 (десет)	Одабрана поглавља из механике флуида проф. др Светислав Чантрак Оцена: 10 (десет)	Одабрана поглавља из интеракције флуида и структуре проф. др Александар Симоновић оцена: 10 (десет)	Припрема за пријаву дисертације
5	Нумеричке методе проф. др М. Спалевић оцена: 10 (десет)	Аеропрофили и узгонске површине проф. др Зоран Стефановић и проф. др Иван Костић Оцена: 10 (десет)	Нумеричка анализа конструкција проф. др Александар Симоновић оцена: 10 (десет)	Лабораторија 4 (истраживање и публиковање за дисертацију-тачка 1.2.1, ред. бр. 1 и 1.2.3. ред. бр. 1, до7 и др.) проф. др Иван Костић оцена: 10 (десет)
5	ОМНИР и комуникација проф. др М. Недељковић оцена: 10 (десет)	Одабрана поглавља из аероеластичности доц. др Мирко Динуловић оцена: 10 (десет)	Лабораторија 3 (истраживање и публиковање за дисертацију-тачка 1.2.3, ред. бр. 1) проф. др Иван Костић оцена: 10 (десет)	
5	Виши курс дигиталних САУ проф. др Зоран Бучевац оцена: 9 (девет)	Лабораторија 2 (истраживање и публиковање за дисертацију-тачка 1.2.4, ред. бр. 1) проф. др Иван Костић оцена: 10 (десет)		
10	Лабораторија 1 (истраживање и публиковање за дисертацију-тачка 1.2.4, ред. бр. 1) проф. др Иван Костић оцена: 10 (десет)			
Укупно ЕСПБ	5+5+5+5+10=30	5+5+5+15=30	5+5+20=30	5+25=30
Просечна оцена	9,92			
Напомена:				
· кандидат је положио 4 обавезна, 5 изборних предмета и 4 предмета везана за лабораторијска истраживања				

Сагласно програму за докторске студије кандидат је положеним испитима, ангажовањем у наставном процесу, истраживањима, публиковањем радова и учешћем у лабораторијским активностима и изради пратећих извештаја и одбраном Пројекта идеје дисертације остварио потребан број бодова и уписао трећу годину, чиме је испунио услов за пријаву докторске дисертације.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

У оквиру стручних и истраживачких активности у периоду од 2010. до 2013. године кандидат је испољио висок степен заинтересованости, одговорности и стручности како за инжењерски, тако и за научни рад, као и спремност и способност за решавање конкретних истраживачких задатака.

На основу биографских података, положених испита на докторским студијама, научних и стручних активности, публикација и учешћа у експерименталним испитивања и обради резултата, Комисија сматра да све ово сумарно квалификује кандидата за успешан и ефикасан научно-истраживачки рад на предложеној теми.

2. Предмет и циљ истраживања

Дефинисање проблема и предмет истраживања

Нумерички прорачун интеракције ваздушне струје и структуре ваздухоплова представља савремени начин анализе спреге која постоји између струјног поља и еластичног опструјаваног тела, и све се више примењује у оперативном пројектовању. Један од битних аспеката примене спрегнуте анализе струјног поља и структуралног одзива јесте одређивање аеродинамичких карактеристика (узгона, отпора и аеродинамичког момента, итд.) статички еластично деформисаних узгонских површина и комплетних конфигурација ваздухоплова током лета. На пример, код узгонских површина долази до промене ефективних вредности угла диједра и витоперења у односу на пројектоване вредности на теоријском моделу, пошто услед дејства аеродинамичких сила при датом Маховом и Рејнолдсовом броју и нападном углу, долази до појаве еластичне флексије и еластичне торзије, чије вредности се мењају сразмерно промени наведених параметара опструјавања. Дугогодишња искуства ваздухопловне индустрије указују на то да се аеродинамичке карактеристике одређене на основу “крутог” - теоријског обриса летелице (аналитичким методама, испитивањима у аеротунелу или нумеричком анализом), могу у приличној мери разликовати од оних које се при истом номиналном режиму опструјавања јављају у лету, управо због одступања реалне, еластично деформисане конфигурације ваздухоплова од његовог пројектованог теоријског облика. Захваљујући изузетно брзом развоју рачунарских ресурса, као и метода нумеричке анализе како струјног поља око ваздухоплова (Computational Fluid Dynamics - CFD) тако и његовог структуралног одзива (Computational Structure Dynamics – CSD), компјутерске анализе аеродинамичких карактеристика ваздухоплова најновије генерације обављају се прорачунским алатима који се базирају на спрегнутим CFD-CSD прорачунским моделима. Тиме се аеродинамички коефицијенти и деривативи одређују на прорачунској геометрији ваздухоплова која одговара оној која се реално јавља током лета при датим номиналним параметрима струјног поља.

Поред аеродинамичких анализа под претпоставком *статичких* еластичних деформација структуре, изузетно битан аспект примене савремених интерактивних CFD-CSD прорачунских модела јесу случајеви када се, при одређеним режимима опструјавања, појављује *динамички* одзив структуре ваздухоплова. Најкритичнији случај динамичког одзива јесте флатер. Флатер представља аероеластичну појаву чије предвиђање је било, и још увек јесте, један од највећих изазова у процесу пројектовања ваздухоплова. Историјски посматрано, анализе флатера вршене су аналитичким, семиемпиријским и експерименталним методама (аеротунелским испитивањима), док су са развојем рачунарске технике, компјутерске методе заузеле изузетно важно место у анализи ове појаве. Флатер представља нестабилну самопобудну врсту вибрација, при којима структура екстаркује енергију струјног поља и често се завршава фаталним исходом

по структуру и ваздухоплов. Током лета јављају се осцилације структуре које су последица неког иницијалног поремећаја. Испод такозване брзине флатера ове осцилације остају пригушене, а изнад ове брзине неки од модова структуре постаје негативно пригушен након чега, често врло интензивно, долази до појаве нестабилних осцилација, где битну улогу поред аеродинамичких и еластичних, имају и инерцијалне силе. Међутим, интеракција ваздушне струје и структуре ваздухоплова не мора увек нужно да укључује и инерцијалне ефекте, као у случају појаве статичке дивергенције, код које у практичном смислу у анализу улазе само аеродинамичке и еластичне силе унутар структуре.

С обзиром да флатер представља интеракцију између три врсте сила - аеродинамичких, еластичних сила структуре и инерцијалних сила (при чему се морају узети у обзир и пригушења присутна у структури), може се издвојити најбитнији побудни фактор за прецизно одређивање флатера, а то је аеродинамичка сила.

Како предмет истраживања ове дисертације, поред анализе интеракције флуида и структуре у случају статичких еластичних деформација структуре, чиме се разматра утицај еластичности на прераспodelу оптерећења, обухвата и предвиђање потенцијалне појаве флатера структуре крила при трансоничном режиму лета, методологија одређивања аеродинамичких сила се усложњава, јер подразумева коришћење комплексних аеродинамичких модела прорачунске динамике флуида за окозвучни домен брзина. У овим истраживањима, аеродинамичке анализе принципски су базиране на решавању система Навије-Стоксових једначина.

Степен комплексности истраживања директно произилази из чињенице да у трансоници постоје изражени ефекти стишљивости, јављају се ударни таласи и њихови положаји варирају, постоји интеракција ударних таласа са турбулентним граничним слојем, одвајање турбулентног граничног слоја (па у том контексту ни ефекти вискозности не могу да се занемаре), итд. Како појава турбуленције знатно утиче на струјно поље иза посматраног тела, потребно је увести додатне претпоставке и корелације како би се одговарајући систем једначина могао затворити. Пошто се у пракси не врши тзв. директно решавање Навије-Стоксових једначина, један од главних проблема анализе струјног поља јесте избор одговарајуће методе: RANS методе или LES методе (Reynolds-Averaged Navier-Stokes или Large Eddy Simulation), или њихове комбинације, као и неминовна имплементација одговарајућег тзв. турбулентног модела. Током досадашњих истраживања везаних за предмет ове дисертације, обављено је и успешно развијање новог турбулентног модела.

Други проблем који се разматра последица је појаве деформације и осцилација структуре. У практичном смислу, то има директан утицај на генерисање прорачунских мрежа током анализе и зато је потребно извршити адекватан избор и верификацију типова елемената, њихове густине и расподеле, као и адаптивности. Трећи битан проблем јесте тзв. интерфејс, који обезбеђује везу између прорачунских модела флуида и структуре, а који је од кључног значаја када је у питању њихова међусобна комуникација. Четврти важан проблем јесте правилно манипулисање једначинама динамике структуре и узимање у обзир ефеката унутрашњег (структуралног) и спољашњег (аеродинамичког) пригушења система који заједно неизбежно утичу на брзину појаве флатера структуре. Како се за прорачун динамике структуре користи коригована Лагранжова формулација, која описује веће деформације и померања, важан аспект члана који се односи на пригушење је његова имплементација у оквиру једначине количине кретања и адекватна дискретизација. Структурално пригушење односи се на разна проклизавања у везама, карактеристике примењених материјала, итд.

Циљеви и опсег истраживања

У оквиру дисертације потребно је извршити опсежна теоријска и експериментална истраживања, која би требало да резултирају у следећем:

1. Правилан избор математичког модела једначина динамике флуида:

- a) Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)
- б) Large Eddy Simulation (LES)
- ц) RANS- LES хибридна метода

Сва три математичка модела имају своје предности и недостатке, мада ће се финални одабир односити на способност одговарајућег турбулентног модела, у комбинацији са RANS, LES или RANS-LES методом, да адекватно моделира природу струјног поља, која непосредно утиче на одзив структуре.

2. Један од кључних доприноса ове дисертације је развијање турбулентног модела прорачунске динамике флуида. Тај турбулентни модел треба да буде у стању да адекватно третира феномене струјања у трансоници, а који се односе на појаву ударних таласа, одвајања граничног слоја, интеракције ударних таласа и турбулентног граничног слоја, одређивање што ширег опсега турбулентних скала, као и све остале пропратне ефекте, с обзиром на потенцијалну нестационарност струјног поља у случају појаве флатера.

3. Избор нумеричких метода које ће са најмањом грешком да спроведу прорачун, а притом да обезбеде што већу тачност, можда и по цену смањења брзине прорачуна. С обзиром на комплексност једначина које се односе на интеракцију флуида и структуре, правилно нумеричко третирање појединих чланова, као што су градијент ∇ , дивергенција $\nabla \bullet$, лапласијан Δ изводи по времену, и други, а који се налазе како у једначинама кретања флуида, кретања мреже, тако и у једначинама које описују кретање структуре, морају се детаљно анализирати.

4. Генерисање мреже захтева посебну пажњу. Њено рафинирање, померање, адаптација и друго, неопходни су у циљу ефикасног спровођења прорачуна интеракције флуида и структуре у трансоничном режиму струјања.

5. Развијање алгорита интеракције флуида и структуре код кога ће једначине струјања флуида и структуре бити адекватно спрегнуте у свом целокупном прорачунском домену. Ово се односи на интеграцију спреге једначина које се односе на динамику флуида и динамику структуре.

Научна област истраживања припада ваздухопловству. Циљ истраживања односи се на развијање напредне прорачунске методе за анализирање интеракције флуида и структуре. Флатер представља једну од најкритичнијих појава која мора бити детектована примењеним прорачунским моделом. У литератури је документовано, у лету и потврђено, да у режиму трансонике долази до значајног смањења брзине флатера. Ова појава позната је као "transonic dip" што значи нагло смањење брзине флатера, и не може тачно да се предвиди коришћењем постојећих линерних метода аеродинамике. Као последица овог недостатка класичних метода прорачуна, потребно је користити напредне методе прорачуна, које подразумевају комбиновану употребу прорачунске динамике флуида (Computational Fluid Dynamics - CFD) и прорачунске динамике структуре (Computational Structure Dynamics – CSD) у релевантном разматраном временском домену. Обе нумеричке методе потребно је спрегнути и тако добити прво алгоритам, а затим и солвер интеракције флуида и структуре (Fluid-Structure Interaction - FSI). Значај истраживања своди се на смањење маргине грешке која постоји при моделирању турбуленције (турбулентних структура) унутар струјног поља, као и симулација физикалности понашања структуре која је блиска реалној.

Списак литературе која ће, поред осталог, бити коришћена током истраживања:

Chung, T.J., *Applied Continuum Mechanics*, New York: Cambridge University Press, 1996

Chung, T.J., *Computational Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, pp. 33-38, 2002

Wilcox, D.C. , *Turbulence Modeling for CFD*, ISBN 1-928729-10-X, 2nd Ed., DCW Industries, Inc., 2004

Menter, F., Egorov, Y., *DESider A European Effort on Hybrid RANS-LES Modelling: Results of the European-Union Funded Project, 2004 - 2007 (Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design). Chapter 2, section 8 Formulation of the Scale-Adaptive Simulation (SAS) Model during the DESIDER Project.*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009

Salas, M.D., *The Curious Events Leading to the Theory of Shock Waves*, NASA Langley Research Center, Invited lecture, 17th Shock Interaction Symposium, Rome, 4–8 September, 2006

Eymard, R., Gallouet, T., Herbin, R., *Finite Volume Methods*, Prepublication n0 97-19 du LATP, UMR 6632, Marseille, September 1997

Thompson, J., Soni, B., Weatherill, N., *GRID GENERATION*, CRC Press, 1999

Ashford, G., *An unstructured grid generation and adaptive solution technique for high-Reynolds-number compressible flows*, Phd thesis, The University of Michigan, 1996

Cebeci, T., Smith, A.M.O., *Analysis of Turbulent Boundary Layers*, Academic Press, Inc., 1974

Hirsch, C., *Numerical Computation of Internal and External Flows*, vol. 2. John Wiley and Sons, 1990

Bouillard, P., Diez P., editors, *Adaptive modelling and simulation*, 2009, Barcelona, Spain: CIMNE; 2009.

Tam, A., Ait-Ali-Yahia, D., Robichaud, MP., Moore, M., Kozel, V., Habashi, WG., *Anisotropic mesh adaptation for 3D flows on structured and unstructured grids*, Comput Methods Appl Mech Eng 2000;189:1205–30.

Laiping, Z., Xinghua, C., Xupeng, D., Zhong, Z., Xin, H., *Applications of Dynamic Hybrid Grid Method for Three-Dimensional Moving/Deforming Boundary Problems*, Computers & Fluids, 2012

- Nathan C. Prewitt, Davy M. Belk, Wei Shyy, *Parallel computing of overset grids for aerodynamic problems with moving objects*, Progress in Aerospace Sciences, 2000, 36:117-172
- Meakin, R.L., *On the spatial and temporal accuracy of overset grid methods for moving body problems*, AIAA Paper 94-1925, 1994
- Baker, T. J., *Single block mesh generation for a fuselage plus two lifting surfaces.*, Proc. 3rd International Conference on Numerical Grid Generation in Computational Fluid Dynamics. Arcilla, A.S., (Ed.), Elsevier Science Publishers B. V., North-Holland, p. 261, 1991
- Rektorys, K., *Variational methods in Mathematics*, Science and Engineering, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht-Holland/Boston-U.S.A., 2th edition, 1975
- Harten, A., *High resolution schemes for hyperbolic conservation laws*, Journal of Computational Physics 49 (1983) 357-393
- Sod, G.A., *Numerical Methods in Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1985
- Barth, T.J., Deconinck, H., *High-order methods for computational physics*, Berlin: Springer; 1999.
- Kroll, N., *Achievements of the European project ADIGMA on adaptive high-order methods for aerospace applications*, In: Proceedings of ECCOMAS CFD 2010. Lisbon, Portugal; 2010.
- Kurganov, A., Tadmor, E., *New high-resolution central schemes for nonlinear conservation laws and convection–diffusion equations*, Journal of Computational Physics 160 (2002) 241–282.
- Jasak, H., Weller, H., Gosman, A., *High resolution NVD differencing scheme for arbitrarily unstructured meshes*, Int J Numer Methods Fluids 1999; 31:431–49.
- Barth, T.J., Jespersen, D.C., *The design and application of upwind schemes on unstructured meshes*, in: AIAA-89-0366, 1989.
- Jan K. Wright, Jonathan E. Cooper, *Introduction to Aircraft Aeroelasticity and Loads*, John Wiley & Sons, Ltd, 2007
- Dewey H. Hodges, G. Alvin Pierce, *Introduction to Structural Dynamics and Aeroelasticity*, Cambridge University Press, 2002
- Michael P. Paidoussis, *Fluid-Structure Interactions: Slender Structures and Axial Flow*, Vol. 1, Academic Press, 1998
- Hans-Joachim Bungartz, Michael Schafer, *Fluid-Structure Interaction: Modelling, Simulation, Optimisation*, Springer, 2006
- Hans-Joachim Bungartz, Miriam Mehl, Michael Schafer, *Fluid-Structure Interaction II: Modelling, Simulation, Optimisation*, Springer, 2010
- Markus Brenk, Hans-Joachim Bungartz, Miriam Mehl, Tobias Neckel, *Fluid-Structure Interaction on Cartesian Grids: Flow Simulation and Coupling Environment*, Institut für Informatik, TU München
- Thomas Wick, *Fluid-structure interactions using different mesh motion techniques*, Computers and Structures, 89 (2001) 1456-1467
- Cui peng, Han Jinglong, *Prediction of flutter characteristics for transport wing with wingtip devices*, Aerospace Science and Technology, 2010
- Xiangying Chen, Ge-Cheng Zha, Ming-Ta Yang, *Numerical simulation of 3-D wing flutter with fully coupled fluid-structural interaction*, Computers & Fluids, 36 (2007) 856-867

3. Полазне хипотезе

На основу изучавања литературе и досадашњих истраживања кандидата у овој области постављена је хипотеза да се развијањем новог и унапређеног турбулентног модела за предвиђање аеродинамичких сила и момената, као и осталих поменутих пропратних феномена трансонице, адекватним спрезањем утицаја флуида и структуре, и коришћењем емпиријских података како би се пригушење у структури узело у обзир, може доћи до адекватних предвиђања интеракције разматране ваздухопловне структуре са флуидом у трансоничном режиму лета.

Основне научне хипотезе од којих се полази у овој дисертацији су:

1. На основу података у литератури и до сада обављених прелиминарних нумеричких симулација извршених коришћењем RANS математичког модела у комбинацији са *k-omega SST* (*k-omega Shear-Stress Transport*) турбулентним моделом, као и RANS-LES математичког модела у комбинацији са *k-omega SST SAS* (*k-omega Shear-Stress Transport Scale-Adaptive Simulation*) турбулентним моделом, дошло се до закључка да RANS-LES методе дају врло прецизне резултате.
2. Резултати се првенствено односе на вртложни траг иза опструјаваног тела (у контексту опсега карактеристичних дужина турбулентних структура), јер енергија вртложног трага у значајној мери утиче на побуду и одзив структуре. RANS-LES методе знатно боље симулирају физикалност процеса у трансоници од RANS метода, и зато могу пронаћи ширу примену у домену интеракције флуида и структуре.
3. На основу до сада обављених истраживања, валидација новонасталог *k-omega SST SAS* турбулентног модела са укљученим ефектима стишљивости, извршена је на ONERA -M6 крилу, за које постоји широка база експерименталних података у литератури. Валидација је извршена на основу поређења мерених и прорачунски одређених коефицијената притиска по попречним пресецима дуж полуразмаха крила. Дати турбулентни модел прилагођен је великим Рејнолдсовим бројевима. Модел *SST SAS* показао је изузетну ефикасност у смислу нумеричког моделирања одвајања граничног слоја и нестационарности струјања.
4. Прорачунске мреже које се односе на флуид и структуру по својој природи међусобно су различите. Стога посебна пажња мора да се посвети интерфејсу, т.ј. вези између флуида и структуре преко којег се обавља размена података у оба смера. С обзиром да ове мреже нису коинцидентне, потребно је адекватно извршити интерполацију добијених вредности, како притиска, тако и еластичних померања (деформација) структуре. Да би се остварила реална симулација аеродинамичких ефеката и утицаја, CFD мрежа ће имати приоритетну улогу, у смислу њене адаптације и рафинирања у зонама изражених промена градијената скаларних величина, као што су притисак, густина, турбулентна вискозност и др.
5. У циљу поједностављења, али и подизања ефикасности прорачунског алгорита, објединиће се имплементација солвера флуида и структуре и спровешће се потпуна интеграција прорачунског система флуид-структура, дакле оствариће се потпуно спрегнут систем у виду јединственог солвера.
6. Да би се адекватно моделирало понашање структуре у временском домену, потребно је узети у обзир и правилно математички моделирати пригушење, извршити његову имплементацију у постојећу кориговану Лагранжеву формулацију за изотропне и ортотропне структуре.

4. Научне методе истраживања

- RANS метода комбинована са *k-omega SST* турбулентним моделом примењена на ONERA-M6 крило и поређење са експерименталним резултатима.
- RANS-LES метода комбинована са *k-omega SST SAS* турбулентним моделом примењена на ONERA -M6 крило и поређење са експерименталним резултатима.
- На основу резултата добијених нумеричком симулацијом и њиховим поређењем са експерименталним (аеротунелским) резултатима, као и међусобним поређењем фиксирајући остале параметре, извршиће се одабир неке од поменутих метода за симулацију једначина кретања флуида.
- Валидација солвера за прорачунску динамику структуре у оквиру процедуре интеракције флуида и структуре и имплементација једначина кретања структуре са узимањем у обзир нелинеарности изазваних пригушењем унутар структуре.
- Спрезање двају система и генерисање коначног алгоритма интеракције флуида и структуре.
- Поређење резултата добијених нумеричком симулацијом са експерименталним резултатима и доношење закључака о релевантности новонастале методе анализе међусобне интеракције флуид-структура.
- Комплетна процедура интеракције флуида и структуре која се односи на имплементацију једначина динамике флуида и динамике структуре базираће се на дискретизацији која је извршена коначним запреминама и решавањем у временском домену.

5. Очекивани научни допринос

Истраживања која ће бити спроведена током израде докторске дисертације у циљу што реалније симулације физикалности процеса интеракције флуида и структуре, омогућиће формирање унапређене методе за моделирање ефеката турбуленције и феномена трансонице, тј. формирање унапређеног турбулентног модела. Како брзина обраде података савремених рачунара прогресивно расте из дана у дан, напредни математички модели (према томе и захтевни) као што су нпр. LES методе, моћи ће да се примене и при великим Рејнолдсовим бројевима, тако да је развијање солвера интеракције флуида и структуре који се базира на њима оправдано. Како структурална пригушења значајно утичу на одзив структуре, а не постоје једначине којима се она могу узети у обзир, користиће се емпиријске релације, чија правилна имплементација у оквиру једначина динамике структуре треба да омогући позитиван допринос, пре свега у случају моделирања осцилаторних одзива структуре. Успешна интеграција CFD-CSD прорачунских модела треба да резултује монолитичким спрегнутим солвером за прорачун како аеродинамичких карактеристика ваздухоплова као еластично деформабилних конструкција, тако и специфичних феномена везаних за проблематику аероеластичности, са акцентом на домену трансоничних брзина.

Очекивани научни допринос се може сумирати у следећем:

1. Развој новог турбулентног модела, способног да верно симулира ефекте турбуленције око и иза опструјаваног тела, као и пропратне феномене струјања који се јављају у трансоничном режиму струјања.
2. Моделирање динамике одзива структуре уз нови приступ имплементацији пригушних ефеката структуре при њеном еластичном деформисању.
3. Формирање новог алгоритма, односно солвера за интеракцију флуида и структуре, односно FSI солвера, који ће поуздано и ефикасно моћи да се примени на ваздухопловне конструкције у трансоничном режиму лета. Целокупан код биће написан у програмском језику C++. Биће омогућена употреба паралелизације прорачуна коришћењем MPI (Message Passing Interface) технологије, као и његова модуларност. Целокупна процедура користи методу коначних запремина која има многе предности због своје конзервативности.

6. План истраживања и структура рада

План истраживања састоји се од следећих фаза:

- Извршиће се преглед и анализа постојећих истраживања која се баве сродном тематиком.
- Извршиће се преглед и анализа оних метода интеракције флуида и структуре које се могу адекватно применити у оквиру овог истраживања.
- Формулисаће се методологије процеса анализе флатера савременим прорачунским методама аероеластичности и интеракције флуида и структуре, извршиће се упоредна анализа.
- Спровешће се нумерички поступак анализе интеракције флуида и структуре.
- Извршиће се анализа и поређење нумерички добијених и расположивих експерименталних резултата и извести одговарајући закључци.

Структура докторске дисертације је следећа:

1. Увод
2. Преглед и критичка анализа претходних истраживања
3. Увод у интеракцију флуида и структуре и опис проблема истраживања
4. Једначине динамике флуида
5. Формулација RANS-LES турбулентних модела
6. Дискретизација једначина динамике флуида коначним запреминама
7. Нумерички поступак решавања једначина динамике флуида
8. Једначине динамике структуре за изотропне и ортотропне структуре
9. Дискретизација једначина динамике структуре коначним запреминама
10. Нумерички поступак решавања једначина динамике структуре
11. Формулација алгоритма интеракције флуида и структуре и имплементација једначина динамике флуида и динамике структуре
12. Кретање прорачунске мреже флуидног домена
13. Валидација метода прорачунске динамике флуида
14. Валидација методе прорачуна инетракције флуида и структуре
15. Закључак и правац даљег истраживања

7. Закључак и предлог

Анализом релевантних података из пријаве кандидата Бојана Шекутковског, дипл. инж. маш. – мастера, Комисија закључује да кандидат испуњава све законом предвиђене услове и истраживачке квалификације за израду докторске дисертације.

Имајући у виду наведено Комисија предлаже Већу докторских студија да кандидату

Бојану Шекутковском

одобри израду докторске дисертације под називом:

Развој напредне методе прорачуна интеракције ваздушне струје и структуре ваздухоплова у домену трансоничних брзина

из уже научне области ваздухопловство. За ментора рада на дисертацији предлаже се проф. др Иван Костић, ванредни професор на Катедри за Ваздухопловство Машинског факултета Универзитета у Београду, а за коментора проф. др Александар Симоновић, ванредни професор на Катедри за Ваздухопловство Машинског факултета Универзитета у Београду.

Београд, 15.09.2014. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ:

Проф. др Иван Костић,
ванредни професор Универзитета у Београду, Машински факултет

Проф. др Александар Симоновић,
ванредни професор Универзитета у Београду, Машински факултет

Проф. др Зоран Стефановић,
редовни професор Универзитета у Београду, Машински факултет

Проф. др Мирко Динуловић,
ванредни професор Универзитета у Београду, Машински факултет

Проф. др Слободан Гвозденовић,
редовни професор Универзитета у Београду, Саобраћајни факултет

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ

за кандидата Бојана Шекутковског

Име и презиме ментора: Иван Костић

Звање: ванредни професор

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. Иван Костић: *Numerical Evaluation of the Aerodynamic Influence of the Helicopter Composite Blade Trailing Edge Tabs*, Archive of Applied Mechanics, Springer-Verlag, ISSN 0939-1533, (2007) 77: pp. 893-909 (IF за 2007 годину 0.523 (M23)).
2. Зоран Стефановић, Иван Костић: *Analysis of the Sailplane Final Approaches Performed by Cosine-Law Speed Variations*, Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, ISSN 0039-2480, 56(2010)7-8, pp. 436-446, UDC UDK 629.734.33:351814343 (IF за 2010 годину 0.466 (M23)).
3. Златко Петровић, Слободан Ступар, Иван Костић, Александар Симоновић: *Determination of a Light Helicopter Flight Performance at the Preliminary Design Stage*, Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, ISSN 0039-2480, 56(2010)9, pp. 535-543, UDC 533.661:629.01 (IF за 2010 годину 0.466 (M23)).
4. Александар Симоновић, Иван Костић, Слободан Ступар, Златко Петровић: *Laboratory Tests of a Hybrid Metal-Composite Transport Helicopter Blade Segment*, Experimental Techniques, John Wiley and Sons, ISSN 0732-8818, 32 (2012), pp. 22-32 (IF за 2012 годину 0.378 (M23)).
5. Иван Костић, Зоран Стефановић, Златко Петровић, Оливера Костић, Abdulhakim Essari: *Hybrid Approach in the Initial Aerodynamic, Stability and Performance Calculations of a Light Airplane*, Tehnički Vjesnik - Technical Gazette, ISSN 1330-3651, 20(2013)4, pp. 605-614, UDK 62(5)=163.42=111 (IF за 2012 годину 0.601 (M23)).
6. Јелена Сворцан, Слободан Ступар, Драган Комаров, Огњен Пековић, Иван Костић: *Aerodynamic Design and Analysis of a Small-scale Vertical Axis Wind Turbine*, Journal of Mechanical Science and Technology, Springer, ISSN 1738-494X, 27 (8) (2013), DOI 10.1007/s12206-011-0913-y, MEST-D-12-01179R1, (IF за 2012 годину 0.616 (M23)).

Заокружити одговарајућу опцију (А, Б, В или Г):

А) У случају менторства дисертације на докторским студијама у групацији техничко-технолошких, природно-математичких и медицинских наука ментор треба да има најмање три рада са SCI, SSCI, AHCI или SCIE листе, као и Math-Net.Ru листе.

Б) У случају менторства дисертације на докторским студијама у групацији друштвено-хуманистичких наука ментор треба да има најмање три рада са релевантне листе научних часописа (Релевантна листа научних часописа обухвата SCI, SSCI, AHCI и SCIE листе, као и ERIH листу, листу часописа које је Министарство за науку класификовало као М24 и додатну листу часописа коју ће, на предлог универзитета, донети Национални савет за високо образовање. Посебно се вреднују и монографије које Министарство науке класификује као М11,М12,М13,М14,М41 и М51.)

В) У случају израде докторске дисертације према ранијим прописима за кандидате који су стекли академски назив магистра наука ментор треба да има пет радова (референци) које га, по оцени Већа научних области, квалификују за ментора односно дисертације.

Г) У случају да у ужој научној области нема квалификованих наставника, приложити одлуку Већа докторских студија о именовању редовног професора за ментора.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Датум 16.09.2014.

М.П.

ПОДАЦИ О КОМЕНТОРУ

за кандидата **Бојана Д. Шекутковског**, М.Сс., дипл. инж. маш, студента докторских студија на Машинском факултету Универзитета у Београду, бр. индекса Д9/10.

Име и презиме коментора: Александар Симоновић

Звање: Ванредни професор на Машинском факултету у Београду

Списак радова који квалификују коментора за вођење докторске дисертације:

1. Spasić Dragoljub, Stupar Slobodan, **Simonović Aleksandar**, Trifković Dragan, Ivanov Toni. The failure analysis of the star-separator of an aircraft cannon. *ENGINEERING FAILURE ANALYSIS*, (2014), vol. 42, str. 74-86, ISSN 1350-6307, DOI: 10.1016/j.engfailanal.2014.03.022, IF(2013)= **1.130**
2. Zoric Nemanja, **Simonovic Aleksandar**, Mitrovic Zoran, Stupar Slobodan, Obradovic Aleksandar, Lukic Nebojsa. Free vibration control of smart composite beams using particle swarm optimized self-tuning fuzzy logic controller. *JOURNAL OF SOUND AND VIBRATION*, (2014), vol. 333 br. 21, str. 5244-5268, ISSN 0022-460X, DOI: 10.1016/j.jsv.2014.06.001, IF(2013)= **1.857**
3. Zorić Nemanja, **Simonović Aleksandar**, Mitrović Zoran, Stupar Slobodan. Optimal vibration control of smart composite beams with optimal size and location of piezoelectric sensing and actuation. *JOURNAL OF INTELLIGENT MATERIAL SYSTEMS AND STRUCTURES*, (2013), vol. 24 br. 4, str. 499-526, ISSN 1045-389X, doi: 10.1177/1045389X12463465, IF(2012)= **1.523**
4. Stupar Slobodan, Isaković Jovan, Komarov Dragan, **Simonović Aleksandar**, Damljanović Dijana. Computational and Experimental Investigation Into Subsonic Flow Around a Finned Ogive Cylinder. *TRANSACTIONS OF FAMENA*, (2012), vol. 36 br. 4, str. 97-110, ISSN 1333-1124, IF(2012)= **0.232**
5. **Simonović Aleksandar**, Kostić Ivan, Stupar Slobodan, Petrović Zlatko. Laboratory Tests of a Hybrid Metal-Composite Transport Helicopter Blade Segment. *EXPERIMENTAL TECHNIQUES*, (2012), vol. 36 br. 3, str. 22-32, ISSN 0732-8818, doi:10.1111/j.1747-1567.2011.00708.x, IF(2012)= **0.378**
6. Arsić Miodrag, Bošnjak Srdjan, Odanović Zoran, Dunjić Momčilo, **Simonović Aleksandar**. Analysis of the spreader track wheels premature damages. *ENGINEERING FAILURE ANALYSIS*, (2012), vol. 20 br. , str. 118-136, ISSN 1350-6307, doi: 10.1016/j.engfailanal.2011.11.005, IF(2012)=**0.855**
7. Bošnjak Srdjan, Zrnić Nenad, Gašić Vlada, Petković Zoran, **Simonović Aleksandar**. External Load Variability of Multibucket Machines for Mechanization. *EQUIPMENT MANUFACTURING TECHNOLOGY*, (2012), vol. 422 br. , str. 678-683, ISSN 1022-6680, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.422.678

8. Komarov Dragan, Stupar Slobodan, **Simonović Aleksandar**, Stanojević Marija. Prospects of wind energy sector development in Serbia with relevant regulatory framework overview. *RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS*, (2012), vol. 16 br. 5, str. 2618-2630, ISSN 1364-0321, doi: 10.1016/j.rser.2012.01.067, IF(2012)=**5.627**
9. Petrović Zlatko, Stupar Slobodan, Kostić Ivan, **Simonović Aleksandar**. Determination of a Light Helicopter Flight Performance at the Preliminary Design Stage. *STROJNISKI VESTNIK-JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING*, (2010), vol. 56 br. 9, str. 535-543, ISSN 0039-2480, IF(2010)=**0.466**
10. Ognjanović Milosav, **Simonović Aleksandar**, Ristivojević Mileta, Lazović Tatjana. Research of rail traction shafts and axles fractures towards impact of service conditions and fatigue damage accumulation. *ENGINEERING FAILURE ANALYSIS*, (2010), vol. 17 br. 7-8, str. 1560-1571, ISSN 1350-6307, doi: 10.1016/j.engfailanal.2010.06.007, IF(2010)=**0.770**

Заокружити одговарајућу опцију (А, Б, В или Г):

А) У случају менторства дисертације на докторским студијама у групацији техничко-технолошких, природно-математичких и медицинских наука ментор треба да има најмање три рада са SCI, SSCI, AHCI или SCle листе, као и Math-Net.Ru листе.

Б) У случају менторства дисертације на докторским студијама у групацији друштвено-хуманистичких наука ментор треба да има најмање три рада са релевантне листе научних часописа (Релевантна листа научних часописа обухвата SCI, SSCI, AHCI и SCle листе, као и ERIH листу, листу часописа које је Министарство за науку класификовало као M24 и додатну листу часописа коју ће, на предлог универзитета, донети Национални савет за високо образовање. Посебно се вреднују и монографије које Министарство науке класификује као M11, M12, M13, M14, M41 и M51.)

В) У случају израде докторске дисертације према ранијим прописима за кандидате који су стекли академски назив магистра наука ментор треба да има пет радова (референци) које га, по оцени Већа научних области, квалификују за ментора односно дисертације.

Г) У случају да у ужој научној области нема квалификованих наставника, приложити одлуку Већа докторских студија о именовању редовног професора за ментора.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Датум 4.07.2013.

М.П.
