

Факултет МАШИНСКИ

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

946/4
(Број захтева)

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

07.06.2012. године
(Датум)

З А Х Т Е В
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

АЕРОДИНАМИЧКА ОПТЕРЕЋЕЊА И ОПТИМИЗАЦИЈА ВЕТРОТУРБИНЕ ЗА СПЕЦИФИЧНЕ РЕСУРСЕ ВЕТРА НА ЛОКАЦИЈАМА У СРБИЈИ

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ Ваздухопловство

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

1. Име, име једног родитеља и презиме кандидата: ДРАГАН (МАРКО) КОМАРОВ
2. Назив и седиште Факултета на коме је стекао високо образовање: Машински факултет у Београду
3. Година дипломирања: 2003.
4. Назив магистарске тезе кандидата: Аеродинамичка оптимизација полатица ротора ветрогенератора за мале брзине ветра применом савремених софтверских алата
5. Назив Факултета на коме је магистарска теза одбрањена: Машински факултет у Београду
6. Година одбране магистарске тезе: 2007.
7. Назив Факултета на коме је кандидат завршио докторске студије: _____ / _____

Одсек, смер или група: _____ / _____

Година завршетка докторских студија: _____ / _____

Обавештавамо Вас да је _____
(назив надлежног тела Факултета)

на седници одржanoј 07.06.2012.
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 disertacije sa obrazloženjem.
2. Akt nadležnog tela fakulteta o podobnosti teme za izradu doktorске disertacije.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
Број:946/3
Датум:07.06.2012.године
Београд, Краљице Марије 16

На захтев мр Драгана Комарова, дипл.инж.маш., бр. 493/1 од 13.03.2012. године, извештаја Комисије у саставу: проф.др Слободан Ступар, ментор, доц.др Александар Симоновић, проф.др Слободан Гвозденовић, Саобраћајни факултет Београд, бр. 946/2 од 04.06.2012. године, а на основу чл. 128. Закона о високом образовању, Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду на седници од 07.06.2012. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Прихвата се предлог о испуњености услова и о научној заснованости теме докторске дисертације **«АЕРОДИНАМИЧКА ОПТЕРЕЋЕЊА И ОПТИМИЗАЦИЈА ВЕТРОТУРБИНЕ ЗА СПЕЦИФИЧНЕ РЕСУРСЕ ВЕТРА НА ЛОКАЦИЈАМА У СРБИЈИ»** докторанта **МР ДРАГАНА КОМАРОВА**, дипл.инж.маш.

За ментора докторанту **Мр Драгану Комарову**, именује се **проф.др Слободан Ступар**.

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

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић

Предмет: Извештај о испуњености услова докторанта и научне заснованости теме

На основу пријаве за одобрење израде докторске дисертације мр Драгана Комарова, дипл. инж. маш., бр. 493/1 од 13.03.2012. године и Одлуке Научно-наставног већа бр. 946/1 од 24.05.2012. године о прихватању теме и формирању Комисије за оцену испуњености услова кандидата и научне заснованости теме докторске дисертације, Комисија у саставу др Слободан Ступар, редовни професор Машинског факултета Универзитета у Београду, др Александар Симоновић, доцент Машинског факултета Универзитета у Београду и др Слободан Гвозденовић, редовни професор Саобраћајног факултета Универзитета у Београду подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

Предложени назив теме је:

„АЕРОДИНАМИЧКА ОПТЕРЕЋЕЊА И ОПТИМИЗАЦИЈА ВЕТРОТУРБИНЕ ЗА СПЕЦИФИЧНЕ РЕСУРСЕ ВЕТРА НА ЛОКАЦИЈАМА У СРБИЈИ“

1. ИСПУЊЕНОСТ УСЛОВА КАНДИДАТА

1.1 Биографски подаци о кандидату

Кандидат мр Драган Комаров рођен је 20.09.1977. године у Београду где је завршио основну школу и гимназију. Дипломирао је на Машинском факултету Универзитета у Београду на Одсеку за хидроенергетику 13.07.2003. године. Последипломске студије завршио је на истом факултету на Одсеку за ваздухопловство, где 26.10.2007. године стиче звање магистра техничких наука одбраном магистарског рада под насловом „Аеродинамичка оптимизација лопатица ротора ветрогенератора за мале брзине ветра применом савремених софтверских алата“.

Као стипендиста Министарства науке и заштите животне средине од 10.03.2004. године до 30.06.2005. године, био је ангажован у Иновационом центру Машинског факултета у Београду при Одсеку за хидроенергетику за потребе пројекта развоја софтвера за симулацију вибрација у хидропостројењима. У периоду од 2005. до 2007. године запослен је на Машинском факултету у својству истраживач – приправник и ангажован на пројекту финансираном од стране Министарства за науку и заштиту животне средине ев. бр. ТР-6373 „Развој лаког хеликоптера“, као и иновационом пројекту ев. бр. ИП-8123 „Развој технолошки напредне ветротурбине оптимизираних за мале брзине ветра“ током 2006. и 2007. године. Од новембра 2007. године запослен у Центру за ваздухопловство Машинског факултета у Београду на пословима стручног сарадника, где између осталог, учествује у реализацији наставе на предметима Ветротурбине, Ветротурбине 2, Прорачунска аеродинамика и Увод у инжењерске симулације. Као истраживач учествовао је у реализацији пројекта технолошког развоја финансираног од стране Министарства науке у периоду од 2008. до 2010. године, ев. бр. 18029 под називом „Развој технологија пројектовања и израде лопатица ветротурбина великих снага и других великогабаритних композитних структура“. Од 2010. године ангажован је на пројекту ев. бр.

35035 „Истраживање и развој савремених приступа пројектовања композитних лопатица ротора високих перформанси“. Стручно се усавршава у областима прорачунске механике флуида и обновљивих извора енергије – ветротурбина. Аутор и коаутор је више од 30 научно-стручних радова. У оквиру сарадње са привредом учествовао је у изradi више од 50 студија, елабората и главних машинских пројеката за различита постројења. Члан је Инжењерске коморе Србије, поседује лиценцу одговорног пројектанта термотехнике, термоенергетике, процесне и гасне технике.

Говори енглески језик. Ожењен је и отац је једног детета.

1.2 Списак објављених научно-стручних радова кандидата

1.2.1 Радови публиковани у међународним научним часописима

- [1] **Komarov D**, Stupar S, Simonović A, Stanojević M. *Prospects of wind energy sector development in Serbia with relevant regulatory framework overview*. Renewable and Sustainable Energy Reviews vol. 16 no. 5, pp. 2618-2630, 2012. IF 2010: 4.595, ISSN: 1364-0312, M21

1.2.2 Радови публиковани у научним часописима националног значаја

- [1] **Komarov D**, Stupar S, Posteljnik Z. *Review of the current wind energy technologies and global market*. Journal of Applied Engineering Science, vol. 9, No. 4, pp. 437-448, 2011, M52
- [2] Stupar S, Simonović A, Peković O, **Komarov D**, Stanojević M. *Stress and strain analysis and reconstruction of root section of steel chimney*. Journal of Applied Engineering Science, Vol. 6, No. 21, pp. 19-22, 2008, M53
- [3] Stupar S, Simonović A, Tanasković T, **Komarov D**, Stanojević M. *Overview and analysis of stress and strained steel chimney's state*. Journal of Applied Engineering Science, vol. 5, no. 17, pp. 39-44, 2007, M53

1.2.3 Радови саопштени на међународним и домаћим скуповима штампаним у целини

- [1] Сворцан Ј, Ступар С, **Комаров Д**, Зорић Н. *Аутоматизација процеса моделирања лопатица ветротурбине у програмском пакету CATIA*. 38. Јупитер конференција, 25. CAD/CAM симпозијум. Машински факултет Универзитета у Београду. Београд, 2012, M63
- [2] **Комаров Д**, Ступар С, Симоновић А, Станојевић М. *Параметризација елемената лопатице ветротурбине применом CST методе*. 38. Јупитер конференција, 25. CAD/CAM симпозијум. Машински факултет Универзитета у Београду. Београд, 2012, M63
- [3] Постељник З, **Комаров Д**, Станојевић М, Сворцан Ј. *Пројектовање и анализа термоизолационе облоге корених укрућења челичних димњака*. 38. Јупитер конференција, 25. CAD/CAM симпозијум. Машински факултет Универзитета у Београду. Београд, 2012, M63
- [4] **Комаров Д**, Ступар С, Симоновић А, Зорић Н. *Параметризација фамилије аеропрофила за корени део лопатице ветротурбине*, 37. Јупитер конференција, 33. симпозијум НУ, работи, ФТС –Машински факултет Универзитета у Београду, 2011, M63
- [5] Stupar G, Tucaković D, Živanović T, Ivanović V, Živanović V, **Komarov D**, *3-D model of solid and gas phase flow in the duct bend behind the mill gas classifier at the fan mill*, Proceedings of the 24th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Novi Sad, 2011, M33

- [6] Svorcan J, **Комаров Д**, Stupar S. *Preliminary CFD analysis of flow through redesigned root section of industrial chimney*. III International Symposium "Contemporary Problems of Fluid Mechanics" University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, 2011, M33
- [7] **Комаров Д**, Ступар С, Симоновић А, Тривковић С, Станојевић М. *Трендови у индустрији ветротурбина и могући правци развоја домаће ветроенергетике*. Међународно саветовање Енергетика 2010, Златибор 2010, М63
- [8] Ступар С, Живановић Т, Туцаковић Д, **Комаров Д**. *Примена CAD софтвера за визуелизацију техничког решења реконструкције вентилаторског млина*. 36. ЈУПИТЕР конференција - 23. CAD/CAM симпозијум. Машински факултет Универзитета у Београду. Београд, 2010, М63
- [9] Петровић З, Ступар С, Симоновић А, **Комаров Д**. *Развој композитне кабине хеликоптера и израда калупа*. 35. ЈУПИТЕР конференција - 22. CAD/CAM симпозијум. Машински факултет Универзитета у Београду. Београд, 2008, М63
- [10] Ступар С, Симоновић А, Пековић О, **Комаров Д**. *Анализа напонско деформационог стања димњака за потребе санације кореног дела челичног димњака*. 34. ЈУПИТЕР конференција - 21. CAD/CAM симпозијум. Машински факултет Универзитета у Београду. Београд, 2008, М63
- [11] Ступар С, Симоновић А, **Комаров Д**, Пековић О, Станојевић М. *Радне карактеристике реконструисаних расхладних кула бр. 16 и 18 ТЕ Колубара А*. Индустријска енергетика и заштита животне средине у земљама Југоисточне Европе ИЕЕП2008. Златибор, 2008, М63
- [12] Ступар С, Симоновић А, Пековић О, **Комаров Д**. *Савремене компјутерски оријентисане методе пројектовања оптимизованих лопатица ротора ветротурбина*. Индустријска енергетика и заштита животне средине у земљама Југоисточне Европе ИЕЕП2008. Златибор, 2008, М63
- [13] Ступар С, Симоновић А, **Комаров Д**, Пековић О, Станојевић М. *Повећање расхладног капацитета расхладних кула бр. 16 и 18 ТЕ Колубара А*. 21. међународни конгрес о процесној индустрији -PROCESSING 2008. Суботица 2008, М33
- [14] Ступар С, Симоновић А, **Комаров Д**. *Утицај врсте испуне на радне карактеристике расхладних кула бр. 16 и 18 ТЕ Колубара А*. Међународни симпозијум Електране 2008. Врњачка Бања 2008, М33
- [15] Ступар С, Симоновић А, Пековић О, **Комаров Д**. *Утицај конструктивног решења челичног димњака на напонско стање око димоводних канала*. 33. ЈУПИТЕР конференција - 20. CAD/CAM симпозијум. Машински факултет у Београду, Златибор 2007, М63

Техничка решења

- [1] Ступар С, Симоновић А, Драговић В, **Комаров Д**. *Савремена композитна лопатица двокраког ротора ветротурбине снаге 6 kW*. Машински факултет Београд, 2011. – нови производ, М81
- [2] Ступар С, Симоновић А, Драговић В, **Комаров Д**. *Савремена композитна лопатица трокраког ротора ветротурбине снаге 6 kW*. Машински факултет Београд, 2011. – нови производ, М81
- [3] Ступар С, Симоновић А, Сворцан Ј, **Комаров Д**, Пековић О, Тривковић С. *Софтвер за генерисање модела витких конструкција - примена на индустријске једноплашне димњаке*. Машински факултет Београд, 2011. – прототип, М85

- [4] Ступар С, Симоновић А, **Комаров Д**, Пековић О, Постељник З., Станојевић М. *Носећа конструкција расхладне куле*. Машински факултет Београд, 2011. – индустријски прототип, М82
- [5] Ступар С, Симоновић А, **Комаров Д**, Пековић О, Тривковић С, Сворцан Ј. *Реконструкција кореног дела структуре двоплашног челичног димњака ТЕНТ „Б“ димензија Ø3,3/Ø3 x 60m*. Машински факултет Београд, 2011. – прототип, М85
- [6] Симоновић А, Ступар С, Пековић О, **Комаров Д**, Тривковић С. *Уређај за контролу силе затезања у челичним ужадима*. Машински факултет Београд. 2010. – индустријски прототип, М82
- [7] Ступар С, Симоновић А, **Комаров Д**, Пековић О, Тривковић С. *Мерно аквизициони систем за испитивање фреквентних карактеристика ваздухопловних конструкција*. Машински факултет Београд. 2010. – прототип, М85
- [8] Ступар С, Симоновић А, **Комаров Д**, Пековић О, Тривковић С, Станојевић М. *Фамилија аеропрофила за корени део лопатице ветротурбине велике снаге*. Машински факултет Београд. 2009. – прототип, М85
- [9] Ступар С, Симоновић А, **Комаров Д**, Тривковић С, Пековић О. *Испитни сто-инсталација за испитивање сегмената композитних лопатица на статичка и динамичка оптерећења*. Машински факултет Београд. 2009. – ново лабораторијско постројење, М83
- [10] Ступар С, Симоновић А, **Комаров Д**, Тривковић С, Пековић О. *Уређај за мерење силе у челичним ужадима ослоњима витких великогабаритних структура енергетских постројења*. Машински факултет Београд. 2009. – прототип, М85

Остали релевантни резултати

- [1] Ступар С, **Комаров Д**, Симоновић А. *Могућности развоја ветроенергетских капацитета у Србији*. Сусрети просторних планера Србије – Обновљиви извори енергије у просторном развоју Србије. Инжењерска комора Србије, 2011

2. НАУЧНА ЗАСНОВАНOST ТЕМЕ

2.1 Проблем и предмет истраживања

Предмет истраживања предложене докторске дисертације је одређивање аеродинамичких оптерећења ветротурбина и оптимизација ротора према расположивом ресурсу ветра на изабраним локацијама у Србији. При оптимизацији потребно је задовољити критеријуме како у погледу ефикасности, тако и у погледу структуре - чврстоће лопатица ротора за предвиђене радне режиме и стандардима дефинисаним екстремним оптерећењима. У идеалном случају лопатице ветротурбине би требало да буду специфично пројектоване за услове на локацији изградње [1].

Методологија пројектовања лопатица ветротурбина у фази концептуалног развоја подразумева дефинисање димензија и облика ротора према постављеним пројектним захтевима, као што су намена, номинална снага, годишња производња енергије, пројектовани радни век, цена произведене енергије итд. Између осталог, проблем пројектовања и проналажења оптималног облика лопатице зависи од процене ресурса ветра дате локације, номиналне снаге, избора електрогенератора и начина повезивања ветротурбине на електроенергетски систем. С обзиром да се при пројектовању ветротурбине мора имати на уму комплетно радно подручје, као и вишезначност решења, може се стећи слика о комплексности проналажења оптималног аеродинамичког облика ротора тј. лопатице ветротурбине који је у директној вези са методама прорачуна струјања, односно методама

одређивања аеродинамичких оптерећења лопатица и одговарајућих аеропрофила [2]. У итеративном поступку, за задати ресурс ветра, потребно је пронаћи оптимално концептуално решење ротора које се у каснијим фазама пројектовања детаљно разрађује. Потребно је дефинисати геометрију ротора на основу извршених прорачуна аеродинамичких и других оптерећења, при чему се најчешће тежи постизању оптималног решења у смислу максималног искоришћења расположивог ресурса ветра уз остваривање минималне масе лопатице поштујући ограничења у погледу чврстоће, доступних материјала, технологија израде, финансијских и других ресурса.

Аеродинамичко моделирање ротора за инжењерске потребе обично је интегрисано са моделима ресурса ветра и динамике система ветротурбине. Интегрисани аероеластични модел за прорачун перформанси и напонско-деформационог стања је предуслов за пројектовање, развој и оптимизацију ветротурбина. Ветроурбине су изложене дејству атмосферске турбуленције, струјању у граничном слоју тла, правац ветра је променљив, постоје ефекти вртложења који потичу од околних ветротурбина. Као последица, силе су променљиве у времену и простору. Стохастички опис поља ветра и динамички модел лопатица и остатка структуре ветротурбине могу бити саставни делови аеродинамичке анализе.

Одређивање перформанси и оптерећења ветротурбина може се реализовати применом неке од постојећих теорија и метода, као што су теорија (идеалног) ротора, теорија елемента лопатице, вртложна теорија, панел метода, вискозно-невискозне методе, нумеричко решавање Навије-Стоксових, односно Рејнолдсових једначина применом методе коначних запремина или методе коначних елемената итд. [3, 4]. Још увек се ретко среће моделирање струјања применом великих и одвојених вртлога услед велике хардверске захтевности.

У инжењерској пракси најчешће се користи теорија елемента крака (лопатице) ротора (у даљем тексту – теорија елемента лопатице) [5]. У односу на раније поменуте методе, потребни хардверски ресурси за прорачуне применом теорије елемента лопатице су занемарљиви и време извршавања кода је веома кратко, због чега се врло често користи у софтверима за прорачун аероеластичности лопатица ветротурбина. Ипак, имајући у виду претпоставке под којима је теорија изведена, она није у могућности да обезбеди резултате у свим радним режимима ротора ветротурбина. Физикалност која при томе није узета у обзир узима се корекционим факторима, нпр. утицај вртложења изазваног ротацијом ротора, ефекти нестационарности ветра, ефекти при опструјавању коначног броја лопатица итд. (Прандтлова корекција, корекције за одложен слом узгона за ротирајуће лопатице и емпиријске корекције које описују битне струјне параметре у радним режимима тешко оптерећеног ротора - радни режими у којима је аксијални индукциони фактор већи од 0.2-0.4 у зависности од аутора).

У последњој деценији интензивирани су напори у правцу истраживања метода заснованих на решавању Навије-Стоксових (Рејнолдсових) једначина при опструјавању актуатор диска на коме су задате претходно израчунате запреминске силе [6]. Ова итеративна метода прорачуна у спрези са теоријом елемента лопатице може дати резултате у ширем интервалу радних режима ротора ветротурбина.

Такође треба поменути симулације струјања око ротора ветротурбина решавањем Рејнолдсових једначина и методом одвојених вртлога (Detached Eddy Simulation) [7]. Добијени резултати дају квалитативан увид у процесе који се дешавају при опструјавању ротирајућих лопатица. Међутим, применом Рејнолдсових једначина уз коришћење стандардних турбулентних модела није могуће узети у обзир преображај граничног слоја што је од велике важности за квалитетну анализу струјања на деловима лопатице са великим отцепљењем. Недавно су се појавила истраживања која користе методе базиране на радовима Ментера које дају нешто боље резултате у поменутим режимима рада ротора ветротурбина [8,9].

Поменуте нумеричке методе могу узети у обзир нестационарност струјања, вискозност и утицај ротације на радијално струјање у пресеку ротора ветротурбине. Проблеми су везани за моделирање турбулентности, с обзиром да ниједан постојећи модел не покрива све режими струјања ни у знатно једноставнијим случајевима од ротора ветротурбине. Предности су општост, велика

количина информација о струјању и елиминисање корекционих фактора потребних за методе засноване на примени теорије елемента лопатице. Недостаци су велика хардверска захтевност, дуготрајна припрема модела за прорачун и обрада добијених резултата, као и непоузданост резултата. Ова група метода се још увек највише користи у научно – истраживачке сврхе.

Обављена испитивања ветротурбина у аеротунелима (нпр. NREL Phase VI ветротурбина и пројекат MEXICO [10, 11]) и на терену [12] открили су неке од недостатака у коришћеним алатима за аеродинамички прорачун ротора ветротурбина. Прорачуни перформанси користећи теорију елемента лопатице веома су осетљиви на улазне податке о елементима лопатице. Прорачуни који се заснивају на нумеричком решавању Навије-Стоксових (Рејнолдсових) једначина дају прихватљиве резултате за брзине ветра који дефинишу радне режиме у којима нема већег отцепљења струје (до 10 m/s за NREL Phase VI ветротурбину). Ове симулације могу бити од користи за поређење аеродинамичких карактеристика одговарајућих пресека – елемената лопатица са дводимензионалним резултатима и испитивањима с обзиром да ова метода прорачуна не узима аеродинамичке карактеристике аеропрофила као улазне параметре [13]. За већину нерешених проблема постоје инжењерски усвојене корекције које дају прихватљиве резултате. Имајући у виду убрзани развој ветротурбина и ограниченост примене постојећих корекција потребно је дубље разумевање физике струјања и моделирање базирано на корелацији експерименталних испитивања и нумеричких симулација.

При разматрању свих метода биће обрађене могућности и начини њиховог повезивања са техникама оптимизације, а затим и имплементације у методологију пројектовања са одговарајућим аеродинамичким моделима струјања око ротора ветротурбина. Методи оптимизације о којима се у литератури могу наћи информације, а чија ће примена на дефинисање аеродинамичког облика лопатице ветротурбина бити истражена су:

1. инверзно пројектовање,
2. еволутивне методе,
3. градијентне методе.

Итеративни поступак развоја концептуалног решења лопатица ротора ветротурбина могуће је делимично аутоматизовати и адекватним задавањем улазних података побољшати применом неке од техника градијентне или неградијентне оптимизације. Градијентне методе, с обзиром на могућности, могу се применити за оптимизацију постојећих ротора за модификовани ресурс ветра, као и за прецизно прилагођавање карактеристика ротора према усвојеним критеријумима и ограничењима на посматраном параметарском домену [14]. Неградијентне методе, као што је генетски алгоритам, могуће је применити за развој нових ротора с обзиром да не постоји опасност од идентификовања локалних минимума [15]. Ипак, имајући у виду велики број варијантних решења који у том случају треба испитати, примена ове технике оптимизације обично је везана за хардверски мање захтевне методе аеродинамичког прорачуна. У циљу смањења броја варијантних решења за које треба извршити аеродинамички прорачун могу се искористити неуронске мреже у спрези са генетским алгоритмом [16]. Општије методе оптимизације ветротурбина могу обухватити аеродинамику и структуру ветротурбине и обично имају за циљ да се минимизира цена произведене енергије. Из тог разлога потребни су прецизни и ефикасни модели за процену перформанси и оптерећења ветротурбине.

Према Стратегији развоја енергетике Републике Србије до 2015. која је усвојена 2005. године обновљиви извори енергије сврстани су у приоритете. Доношењем потребних законских и подзаконских аката који регулишу област обновљивих извора енергије и права на повлашћене цене енергије произведене из обновљивих извора дат је допринос у правцу стицања потребних услова за улагање у обновљиве изворе енергије. У протеклој деценији интензивирани су активности на утврђивању потенцијала енергије ветра на територији Србије. Сprovedено је више студија и истраживања у којима су идентификоване области са повољним ресурсима за изградњу ветротурбина [17-19]. Применом статистичких метода обраде података о брзинама ветра из доступних

хидрометеоролошких станица и нумеричких метода извршена је процена расположивог ресурса ветра. Идентификоване су области и локације које су погодне за експлоатацију енергије ветра. Такође је извршен и одређен број испитивања и моделирања ресурса ветра на микролокацијама [20-23]. Доступни подаци представљају добар основ за идентификацију ресурса ветра према коме се може извршити оптимизација ротора ветротурбине за специфичне локације у Србији.

Извод из литературе релевантне за предмет истраживања

- [1] Fuglsang et al. *Site-specific Design Optimization of Wind Turbines*. Wind Energ. 2002; 5:261-279
- [2] Bak C. *Sensitivity of Key Parameters in Aerodynamic Wind Turbine Rotor Design on Power and Energy Performance*. Journal of Physics: Conference Series 75 (2007)
- [3] Johansen J, Soerensen N. N. Et al. *3D Navier-Stokes simulations of a rotor designed for maximum aerodynamic efficiency*. 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2007
- [4] Soerensen J.N. *Aerodynamic Aspects of Wind Energy Conversion*. Annu. Rev. Fluid Mech. 2011. 43:427-48
- [5] Fuglsang P, Sangill O, Hansen P. *Design of a 21 m Blade with Risoe-A1 Airfoils for Active Stall Controlled Wind Turbines*. Risoe National Laboratory. Report No. Risoe-R-1374, 2002
- [6] Madsen H.A. et al. *Validation and modification of the Blade Element Momentum Theory based on comparisons with actuator disc simulations*. Wind Energ. 2010; 13; 4:373-389
- [7] Johansen J. Soerensen N. N. et al. *Detached-Eddy Simulation of Flow Around the NREL Phase VI Blade*. Wind Energ. 2002;5:185-197
- [8] Langtry R.B, Menter F. R. *Transition Modeling for General CFD Applications in Aeronautics*. AIAA 2005-522
- [9] Soerensen N.N, Bechmann A, Zahle F. *3D CFD computations of transitional flows using DES and a correlation based transition model*. Wind Energ. 2011, 14(1):77-90
- [10] Micallef D et. al. *Validating BEM, Direct and Inverse Free Wake Models with the MEXICO Experiment*. 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2010
- [11] Lindenburg C. *Analysis of the stationary measurements on the UAE phase-VI rotor in the NASA-Ames wind tunnel*, ECN, 2003
- [12] Schepers J. G. et al. *Final report of IEA Annex XIV:Field Rotor Aerodynamics*. ECN, 1997
- [13] Risoe DTU. *Research in Aeroelasticity EFP-2007-II*. Report No. Risoe-R-1698(EN), 2009.
- [14] Kenway G, Martins J. *Aerostructural Shape Optimization of Wind Turbine Blades Considering Site-Specific Winds*. 12th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, 2008
- [15] Benini E, Toffolo A. *Optimal Design of Horizontal-Axis Wind Turbines Using Blade-Element Theory and Evolutionary Computation*. J. Sol. Energy Eng. 2002; 124 (4): 357-364
- [16] Ribeiro A.F.P, Awruch A, Gomes H. *An airfoil optimization technique for wind turbines*. Applied Mathematical Modelling 2012. Article in Press
- [17] Путник Р. et al. *Мogućност коришћења енергије ветра за производњу електричне енергије*. Текон-техноконсалтинг, Београд, 2002
- [18] Гбурчик П, et al. *Студија енергетског потенцијала Србије за коришћење сунчевог зрачења и енергије ветра*, Студија ЕЕ704-1052А, Центар за мултидисциплинарне студије Универзитета у Београду, 2004.
- [19] Катић В. et al. *Атлас ветрова на територији АП Војводине*. Факултет техничких наука, Нови Сад, 2008
- [20] NIP SA. *Wind farm feasibility study. Belgrade: Strengthening of the Renewable Energy Department of Serbian Energy Efficiency Agency*, 2008
- [21] Đurišić Ž, Bubnjević M, Mikičić D, Rajaković N. *Wind Atlas of Vojvodina, Serbia*. Proc. of European Wind Energy Conference (EWEC 2007), 2007

- [22] Klisić Đ, Zlatanović M, Radovanović I. *WindSim computational flow dynamics model testing using databases from two wind measurement stations*. Electronics 2011; 15 (2):43-8
- [23] Stevanović Ž, Stevanović Ž, Stojanović A. *Micro-siting for experimental determination of wind energy potential in region of Kostolac*, 13. Symposium of Thermal Engineers of Serbia, University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering, 2007

2.2 Циљеви и задаци истраживања

Истраживање се одвија у више спрегнутих фаза те се циљеви истраживања могу сврстати у опште и специфичне. Општи циљеви истраживања односе се на развој оптимизованих лопатица за ресурс ветра на локацијама у Србији и развој методологије пројектовања лопатице ветротурбине применом савремених метода аеродинамичког и динамичког прорачуна и оптимизације.

С обзиром да је истраживањем предвиђено да се посебна пажња посвети одређивању аеродинамичких оптерећења и оптимизацији специфични циљеви су:

- побољшање постојећих инжењерских метода прорачуна корекцијама у режимима рада тешко оптерећених ротора и корекцијама које узимају у обзир радијално струјање на аеродинамичке коефицијенте елемената лопатица,
- идентификација и модификације турбулентног модела у циљу постизања прихватљиве тачности прорачуна за концептуални развој ротора,
- имплементација прорачуна аеродинамичких карактеристика аеропрофила применом методе коначних запремина у методологију пројектовања и оптимизације ротора ветротурбине,
- одређивање оптималног корака ротора за задате локације у интервалу радних брзина ветра за константан и варијабилан број обртаја ротора са променљивим кораком,
- дефинисање домена, методе параметризације, параметара, циљне функције и ограничења за ефикасну реализацију оптимизације.

Све моделе и методе прорачуна и оптимизације које су предмет истраживања потребно је упоредити са доступним експерименталним резултатима. На основу прорачуна аеродинамичких карактеристика различитих конфигурација лопатица и карактеристика струјања, биће извршене модификације облика у циљу даљег побољшања и прилагођавања перформанси ротора специфичним условима струјања ваздуха на одређеним локацијама у Србији.

2.3 Полазне хипотезе

Истраживање се заснива на основним хипотезама механике флуида, прорачунске механике флуида и отпорности материјала са циљем одређивања аеродинамичких оптерећења и напонско-деформационог стања лопатица ветротурбина, као и оптимизације за ресурсе ветра на специфичним локацијама у Србији. Хипотезе специфичне за предмет истраживања су:

1. Дефинисањем одговарајућег математичком модела, дискретизацијом струјног поља око лопатице ротора и решавањем добијеног система алгебарских једначина могу се одредити аеродинамичка оптерећења ротора са прихватљивом тачношћу у поређењу са експерименталним резултатима.

2. Постављањем одговарајућих парцијалних диференцијалних једначина, граничних и почетних услова, те дискретизацијом струјног поља око елемента лопатице и решавањем добијеног система алгебарских једначина могуће је одредити аеродинамичке карактеристике са прихватљивом тачношћу за техничке примене у области прорачуна аеродинамичких оптерећења ротора применом теорије елемента лопатице.

3. Компаративном анализом тродимензионалних симулација струјања око лопатица ветротурбине са одговарајућим дводимензионалним и једнодимензионалним моделима ротора, као и поређењем резултата поменутих тродимензионалних симулација и дводимензионалних симулација струјања и експериментима утврђених аеродинамичких карактеристика лопатица, могуће је извршити квантификовање утицаја ротације на аеродинамичке карактеристика елемената лопатица ротора.

4. Применом хардверских ресурса савремених рачунарских ресурса могуће је извести (аеродинамичку) оптимизацију ротора ветротурбине према задатим критеријумима за специфичну локацију користећи теорију елемента лопатице и методе коначних запремина за прорачун аеродинамичких карактеристика елемената лопатица.

5. Адекватним избором критеријума и ограничења оптимизације и математичким моделима за прорачун битних физичких величина могуће је пројектовати лопатице ветротурбина за локације са III класом ветра према ИЕС класификацији побољшаних аеродинамичких и структурних карактеристика који су конструктивно и технолошки оствариви - изводљиви.

6. Оптимизација се реализује за претходно дефинисан електрогенератор спрегнут са ротором ветротурбине према максималној аеродинамичкој снази. На овај начин се у случају оптимизације чији је критеријум постизање минималне цене енергије елиминише утицај цене електрогенератора у случају разматрања варијантних решења ветротурбине са истом максималном снагом.

2.4 Научне методе истраживања

У оквиру истраживања биће примењене опште, основне и специфичне научне методе које се примењују у машинству, ваздухопловству, енергетици и другим научно-стручним областима које су у вези са предметом истраживања. С обзиром на комплексност предмета истраживања у појединим фазама биће примењиване методе анализе и синтезе постојећих знања систематизованих у оквиру прегледа доступне литературе и досадашњих истраживања. У каснијим фазама истраживања, након усвајања модификованих метода одређивања аеродинамичких оптерећења, те валидације добијених резултата поређењем са објављеним експерименталним резултатима, предвиђа се извођење општих закључака применом методе генерализације.

У току истраживања по потреби биће примењиване хипотетичко-дедуктивна, аналитичко-дедуктивна, статистичка и компаративна метода, као и метода математичког моделирања физичких појава при опструјавању лопатица ветротурбине.

Имајући у виду интердисциплинарност истраживања у току реализације биће коришћене следеће специфичне научне методе:

1. Аналитичке методе за одређивање оптималног облика лопатице ротора
2. Нумеричке методе прорачуна струјања нестишљивог вискозног флуида
3. Нумеричке методе прорачуна напонско-деформационог стања лопатице
4. Нумеричке методе обраде и визуелизације резултата
5. Методе оптимизације
6. Статистичке методе корелације резултата нумеричких симулација и доступних експерименталних резултата
7. Статистичке методе за моделирање ресурса ветра на специфичним локацијама

2.5 Очекивани научни допринос

Имајући у виду да се истраживање односи на технолошку област која се у свету у последњој деценији развија великом брзином, очекује се да ће предложена дисертација мотивисати даља

истраживања у овој области и у нашој земљи. Резултати ће бити корисни за даља научна истраживања аеродинамике аеропрофила, ротора и прорачунске аеродинамике. Предложена методологија прорачуна струјања око лопатице ветротурбине може представљати део ширег прорачуна интеракције флуида и структуре лопатице.

Истраживачки рад у току израде дисертације би требало да доведе до следећих научних доприноса:

1. Систематизација метода аеродинамичког прорачуна ветротурбина.
2. Идентификација поменутих метода које се могу применити за потребе пројектовања и оптимизације ротора ветротурбина имајући на уму хардверске ресурсе који су доступни током истраживања.
3. Модификовање и побољшање постојећих CFD софтвера и развој нових, посебно прилагођених рутина намењених прорачуну струјања око ротирајућих лопатица ветротурбина.
4. Идентификација и продубљивање разумевања комплексних физичких појава које настају при опструјавању ротирајућих лопатица ветротурбина, а које утичу на дефинисање структуре лопатица која је у стању да издржи статичка и динамичка оптерећења у току дугог радног века.
5. Стручни резултати који ће истраживањем бити остварени се односе на примену развијених метода за прорачун оптимизованих ротора за ресурсе ветра на територији Републике Србије.

2.6 План истраживања и структура докторске дисертације

У иницијалној фази израде докторске дисертације биће извршен опсежан преглед доступне литературе која се бави предметом истраживања. Такође ће бити обрађени научни радови из сродних области истраживања, као што су аеродинамика ротора ваздухоплова и струјање при ниским Рејнолдсовим бројевима код беспилотних и ултралаких летелица. У овој фази ће бити детаљно дефинисани потребни софтверски и хардверски ресурси за нумеричке прорачуне и оптимизацију.

У другој фази ће бити изведени математички модели за одређивање аеродинамичких оптерећења ротора ветротурбина, при чему ће се разматрати две групе модела који се решавају нумерички. Подела је начињена према очекиваним потребним хардверским ресурсима за прорачун и обраду добијених резултата, као и намени разматраних модела. У оквиру ове фазе се дефинише методологија оптимизације ротора ветротурбине. У овој фази предвиђено је поређење резултата са доступним експерименталним испитивањима и валидација математичких модела који ће представљати основ за реализацију треће фазе истраживања.

У трећој фази истраживања се имплементирају остварени резултати у циљу оптимизације ротора ветротурбине за специфичне локације у Србији и дефинисане ресурсе ветра.

Предвиђено је да докторска дисертација садржи следећа поглавља:

1. Уводна разматрања
2. Преглед доступне литературе и досадашњих истраживања
3. Математички модел за одређивање аеродинамичких оптерећења ротора ветротурбина
4. Резултати и дискусија резултата аеродинамичког прорачуна
5. Технике оптимизације ротора ветротурбина
6. Имплементација развијених модела у методологију пројектовања ротора ветротурбина
7. Закључак
8. Литература
9. Прилози

2.7 Закључак о теми

На основу разматрања изложеног проблема и предмета истраживања закључује се да тема представља актуелну научно-истраживачку област. Планирани циљеви, задаци, полазне хипотезе и научни допринос истраживања, као и предвиђене научне методе указују на научну заснованост докторске дисертације.

3. ОПШТИ ЗАКЉУЧАК

На основу анализе поднете пријаве кандидата мр Драгана Комарова, дипл. инж. маш., чланови Комисије за оцену испуњености услова кандидата и научне заснованости теме докторске дисертације закључили су да кандидат испуњава законске и друге услове за рад на докторској дисертацији, као и да је предложена тема адекватна да буде предмет докторске дисертације. Комисија за оцену испуњености услова кандидата и научне заснованости теме докторске дисертације предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Београду да кандидату

мр Драгану Комарову, дипл. инж. маш.

одобри тему докторске дисертације под називом:

**„АЕРОДИНАМИЧКА ОПТЕРЕЋЕЊА И ОПТИМИЗАЦИЈА ВЕТРОТУРБИНЕ ЗА
СПЕЦИФИЧНЕ РЕСУРСЕ ВЕТРА НА ЛОКАЦИЈАМА У СРБИЈИ“**

Научна област: Ваздухопловство

Предлог за ментора:

За ментора за рад на овој докторској дисертацији предлаже се проф. др Слободан Ступар, редовни професор на Катедри за ваздухопловство Машинског факултета Универзитета у Београду.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

др Слободан Ступар, ред. проф.
Машински факултет Универзитета у Београду

др Александар Симоновић, доцент
Машински факултет Универзитета у Београду

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

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ

за кандидата мр Драган Комаров

Име и презиме ментора: Слободан Ступар

Звање: Редовни професор на Машинском факултету у Београду

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. **Komarov Dragan, Stupar Slobodan, Simonovic Aleksandar, Stanojevic Marija. Prospects of wind energy sector development in Serbia with relevant regulatory framework overview. Renewable and sustainable energy reviews (2012) vol. 16 no. 5, str. 2618-2630, IF 2010: 4.595, ISSN: 1364-0312, <http://www.elsevier.com/locate/rser>**
2. Trifkovic Dragan, Stupar Slobodan, Bosnjak Srdjan, Milovancevic Milorad, Krstic Branimir, Rajic Zoran, Dunjic Momcilo. **Failure analysis of the combat jet aircraft rudder shaft. Engineering failure analysis (2011) vol. 18. no. 8, str. 1998-2007, IF 2010: 0.765, ISSN 1350-6307, <http://www.elsevier.com/locate/engfailanal>**
3. Petrovic Zlatko, Stupar Slobodan, Kostic Ivan, Simonovic Aleksandar. **Determination of a light helicopter flight performance at the preliminary design stage. Strojnski vestnik – Journal of mechanical engineering (2010), vol. 56. no. 9, str. 535-543, IF 2010: 0.466, ISSN: 0039-2480, <http://www.fs.uni-lj.si/sv>**
4. Stamenkovic Dragi, Maksimovic Katarina, Nikolic-Stanojevic Vera, Maksimovic Stevan, Stupar Slobodan, Vasovic Ivana. **Fatigue Life Estimation of Notched Structural Components. Strojnski vestnik – Journal of mechanical engineering (2010), vol. 56. no. 12, str. 846-852, IF 2010: 0.466, ISSN: 0039-2480, <http://www.fs.uni-lj.si/sv>**
5. Ilic Ivana, Petrovic Zlatko, Maksimirovic Mirko, Stupar Slobodan, Stamenkovic Dragi. Computation Method in Failure Analysis of Mechanical Fastened Joints at Layered Composites. **Strojnski vestnik – Journal of mechanical engineering**, DOI: **10.5545/sv-jme.2010.157**, IF: 2010: 0.466, ISSN: 0039-2480, http://www.sv-jme.eu/data/upload/2012/Clanki/12_02/2011_157_Ilic_02_w.pdf

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 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 односне 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 04.06.2012.

М.П.
