

Образац 2.

Факултет Машински

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

Веће научних области техничких наука
(Назив стручног већа коме се захтев упућује, сагласно

303/5

члану 6. и чл. 7 став 1. овог правилника)

(Број захтева)

28.05.2012. године

(Датум)

З А Х Т Е В

за давање сагласности на реферат о урађеној докторској дисертацији

Молимо да, сходно члану 46. ст. 5 тач. 4. Статута Универзитета у Београду („Гласник Универзитета“, број 131/06)“, дате сагласност на реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата:

ВЕСКА (СТОЈАДИН) ЂЕЛИЋА

(име, име једног од родитеља и презиме)

КАНДИДАТ **ВЕСКО (СТОЈАДИН) ЂЕЛИЋ**

(име, име једног од родитеља и презиме)

Пријавио је докторску дисертацију под називом:

АНАЛИЗА УТИЦАЈА ГЕОМЕТРИЈЕ ЛОПАТИЦА ОБРТНОГ КОЛА НА КАРАКТЕРИСТИКЕ КАПЛАНОВИХ ТУРБИНА

Универзитет је дана 17.11.2003. год. својим актом под бр 33/6 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

АНАЛИЗА УТИЦАЈА ГЕОМЕТРИЈЕ ЛОПАТИЦА ОБРТНОГ КОЛА НА КАРАКТЕРИСТИКЕ КАПЛАНОВИХ ТУРБИНА

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата: **ВЕСКА (СТОЈАДИН) ЂЕЛИЋА**

(име, име једног од родитеља и презиме)

Образована је на седници одржаној 01.03.2012. године, одлуком факултета под бр. 303/3, у саставу:

Име и презиме члана комисије	звање	научна област	установа у којој је запослен
1. <u>Др Мирослав Бенишек</u>	Ред. проф. М.Ф. у пензији	Хидрауличне машине и енергетски системи	Машински факултет Београд
2. <u>Др Милош Недељковић</u>	Редовни професор	Хидрауличне машине и енергетски системи	Машински факултет Београд
3. <u>Др Александар Гајић</u>	Редовни професор	Хидрауличне машине и енергетски системи	Машински факултет Београд
4. <u>Др Светислав Чантрак</u>	Редовни професор	Механика флуида	Машински факултет Београд
5. <u>Др Милун Бабић</u>	Редовни професор	Процесна техника	Факул. инжењерских наука у Крагујевцу

Наставно-научно веће факултета прихватило је извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници одржаној дана 26.04.2012. године.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф. др Милорад Милованчевић

Прилог: 1. Извештај комисије са предлогом.

2. Акт Наставно-научног већа факултета о усвајању извештаја.

3. Примедбе дате у току стављања извештаја на увид јавности,
уколико је таквих примедби било.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број: 303/4
Датум: 26.04.2012. године
Београд, Краљице Марије 16

На основу чл. 128. Закона о високом образовању и извештаја Комисије у саставу: др Мирослав Бенишек, ред.проф. М.Ф. у пензији, проф.др Милош Недељковић, проф.др Александар Гајић, проф.др Светислав Чантрак, проф.др Милун Бабић, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу о оцени докторске дисертације „Анализа утицаја геометрије лопатица обртног кола на карактеристике Капланових турбина“ докторанта мр Веска Ђелића, дипл.инж.маш., Наставно-научно веће Машинског факултета на седници одржаној 26.04.2012. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Усваја се извештај за оцену и одбрану докторске дисертације **„АНАЛИЗА УТИЦАЈА ГЕОМЕТРИЈЕ ЛОПАТИЦА ОБРТНОГ КОЛА НА КАРАКТЕРИСТИКЕ КАПЛАНОВИХ ТУРБИНА“** докторанта **МР ВЕСКА ЂЕЛИЋА**, дипл.инж.маш.

Одобрава се одбрана докторске дисертације, пошто је докторска дисертација са извештајем Комисије за оцену и одбрану била стављена на увид јавности у трајању од 30 дана, па како је после свих разматрања на ННВ М.Ф. на крају извештај Комисије коначно усвојен, доставља се Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду да да сагласност на извештај о урађеној докторској дисертацији.

Одлуку доставити: Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, докторанту, ментору и архиви факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић

НАСТАВНО – НАУЧНОМ ВЕЋУ МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Предмет: Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр Веска Ђелића, дипл. инж. маш.

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду бр. 303/3 од 01.03.2012. године, именовали смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр Веска Ђелића, дипл. инж. машинства под насловом: "АНАЛИЗА УТИЦАЈА ГЕОМЕТРИЈЕ ЛОПАТИЦА ОБРТНОГ КОЛА НА КАРАКТЕРИСТИКЕ КАПЛАНОВИХ ТУРБИНА" о чему подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ	
Број:	303/4
Датум:	24-04-2012
Крајини Мар. 15. 11120 Београд 35	

1. Увод

1.1. Наслов и обим дисертације

Докторска дисертација кандидата мр. Веска Ђелића, дипл. инж. машинства под насловом: "АНАЛИЗА УТИЦАЈА ГЕОМЕТРИЈЕ ЛОПАТИЦА ОБРТНОГ КОЛА НА КАРАКТЕРИСТИКЕ КАПЛАНОВИХ ТУРБИНА" је изложена на 156 страна и садржи Увод, 6 поглавља, Закључке и Литературу.

1.2. Хронологија одобравања израде дисертације

Кандидат мр Веско Ђелић, дипл. инж. маш., пријавио је израду докторске дисертације 25.08.2003. под бројем 1134/1 Катедри за хидрауличке машине и енергетске системе Машинског факултета у Београду. Кандидат је за ментора предложио проф. др Мирослава Бенишека. На основу пријаве кандидата и предлога Катедре, одлуком ННВ бр. 1134/2 од 22.10.2003. године, прихваћен је предлог Комисије о испуњености услова кандидата и научне заснованости теме у саставу: проф. др Милош Недељковић, проф. др Александар Гајић, проф. др Зоран Протић професор у пензији, проф. др Светислав Чантрак и проф. др Мирослав Бенишек.

Комисија је поднела Извештај у коме предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да одобри тему докторске дисертације под радним насловом: "АНАЛИЗА УТИЦАЈА ГЕОМЕТРИЈЕ ЛОПАТИЦА ОБРТНОГ КОЛА НА КАРАКТЕРИСТИКЕ КАПЛАНОВИХ ТУРБИНА", наводећи да је предложена тема адекватна за израду докторске дисертације, као и да кандидат испуњава све законске и истраживачке квалификације за рад на дисертацији. У вези са захтевом докторанта Веска Ђелића, дипл. инж. маш., да се одобри израда докторске дисертације, одлуке Научно-наставног већа Машинског факултета у Београду од 30.10.2003. о испуњености услова кандидата за израду докторске дисертације и о именовању ментора, а на основу сагласности Стручног већа за машинске, саобраћајне и организационе науке од 17.11.2003., донета је коначна одлука бр. 1778/1 од 11.12.2003., којом се одобрава рад на теми докторске дисертације "АНАЛИЗА УТИЦАЈА ГЕОМЕТРИЈЕ ЛОПАТИЦА ОБРТНОГ КОЛА НА КАРАКТЕРИСТИКЕ КАПЛАНОВИХ ТУРБИНА", под менторством проф. др Мирослава Бенишека. На захтев кандидата а уз сагласност ментора одлукама ННВ МФ је продужаван рок за израду докторске дисертације. Тако је одлуком ННВ МФ од 15.12.2011., донета одлука о продужењу рока израде дисертације до 15.12.2012. год.

О завршетку докторске дисертације "АНАЛИЗА УТИЦАЈА ГЕОМЕТРИЈЕ ЛОПАТИЦА ОБРТНОГ КОЛА НА КАРАКТЕРИСТИКЕ КАПЛАНОВИХ ТУРБИНА", ментор проф. др Мирослав Бенишек обавестио је катедру за хидрауличке машине и енергетске системе, као и Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду. Предложена је Комисија за оцену и одбрану рада у саставу: проф. др Мирослав Бенишек, проф. др Милош Недељковић, проф. др Александар Гајић, проф. др Светислав Чантрак и проф. др Милун Бабић, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу.

На основу наведеног дописа Наставно-научно веће Машинског факултета је на седници од 01.03.2012. године једногласно усвојило обавештење о завршетку дисертације кандидата мр Веска Ђелића, дипл. инж. машинства под насловом: "АНАЛИЗА УТИЦАЈА ГЕОМЕТРИЈЕ ЛОПАТИЦА ОБРТНОГ КОЛА НА КАРАКТЕРИСТИКЕ КАПЛАНОВИХ ТУРБИНА" и усвојило

предлог Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације (одлука бр. 303/3 од 01.03.2012. год.)

1.3. Место дисертације у одговарајућој научној области

Докторска дисертација "АНАЛИЗА УТИЦАЈА ГЕОМЕТРИЈЕ ЛОПАТИЦА ОБРТНОГ КОЛА НА КАРАКТЕРИСТИКЕ КАПЛАНОВИХ ТУРБИНА" припада области техничких наука, машинство, ужој научној области Хидроенергетика.

1.4. Биографски подаци о кандидату

Име и презиме: Веско Ђелић
Датум рођења: 15.10.1960
Место рођења: Ђенерал Јанковић, Србија
Породично стање: Ожењен двоје деце

Школовање:

1967 -1971	Основна школа, од првог до четвртог разреда у Белом Пољу
1971 -1975	Основна школа, од петог до осмог разреда у Сурдулици
1975 -1979	Средња машинска техничка школа у Сурдулици
1979 -1984	Студије на Машинском факултету у Београду, одсек хидроенергетика
15.07.1984	Одбрањен дипломски рад на тему: <i>Прерачунавање енергетских и кавитационих карактеристика са модела на главно извођење цевних турбина</i>
1984 -1986	Постдипломске студије у Београду, одсек хидроенергетика,
01.07.1991	Одбрањен магистарски рад на тему: <i>Истраживање тродимензионалног струјања у сифонима облика "С"</i>
1986 -1987	Редовни војни рок

Кретање у послу:

1984 -1988	Пројектант хидро енергетских објеката у Енергопројекту, Хидроинжењеринг, Београд са паузом због војног рока
1988 -	Истраживач за аксијалне турбине и од 1994. године шеф бироа и касније директор Развоја и истраживања свих типова водних турбина, Турбоинститут, Љубљана, Словенија

Активни је члан удружења машинских инжењера Сједињених Америчких Држава, ASME за испитивања турбина на моделу и прототипу и члан удружења машинских инжењера Словеније.

2. Опис дисертације

2.1. Структура и садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата мр. Веска Ђелића, дипл. инж. машинства под насловом: "АНАЛИЗА УТИЦАЈА ГЕОМЕТРИЈЕ ЛОПАТИЦА ОБРТНОГ КОЛА НА КАРАКТЕРИСТИКЕ КАПЛАНОВИХ ТУРБИНА" је изложена на 156 страница и садржи Увод, Преглед досадашњих истраживања који се састоји из 5 поглавља, Анализа и избор критеријума оцењивања карактеристика турбине који се састоји из 4 поглавља, Анализа утицаја промене геометријских параметара на карактеристике турбине који се састоји из 4 поглавља, Турбулентни модели погодни за анализу струјања кроз обртна кола који се састоји из 4 поглавља, Нумеричка анализа различитих турбулентних модела која се састоји из 8 поглавља, Експериментална и нумеричка анализа утицаја геометрије обртних кола турбине на карактеристике Капланове

турбине која се састоји из 7 поглавља, Закључке и Литературу. Текст је илустрован са 176 слика и дијаграма као и 10 табела. У попису коришћене литературе кандидат је навео 75 литературних навода.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном делу дисертације приказан је светски правац потреба за електричном енергијом и осталим изворима енергије. Глобални захтев за повећањем енергије уско је повезан са светским развојем привреде и повећањем броја становништва. Предстојећа повећања производних енергетских капацитета крећу се у правцу двоструких потреба за енергијом.

Хидроелектране се тренутно користе у 150 држава, у којим се налазе више од 11.000 централа са више од 27.000 агрегата, укупне инсталисане снаге 887 GW и годишње производње 3.500 TWh, 172 GW водне енергије у изградњи и 345 GW планираних (од тога 150 GW инсталисане снаге реверзибилних електрана и 100 GW планираних), тако да је водна енергија без сумње значајан фактор у ланцу снабдевања електричном енергијом и, такође, за сада једини капацитет међу обновљивим изворима, који може конкурисати произвођачима електричне енергије из фосилних горива.

Водна енергија је извор енергије као што су ветар, сунчана енергија, геотермална енергија, која се стално обнавља. Због својих особина обновљивости и доступности, водна енергија се користи већ вековима.

Природна катастрофа која је изазвала експлозију у нуклеарној електрани Фукушима у Јапану, додатно утиче на стратешке планове светских држава за повећањем удела производње енергије алтернативним изворима. У томе предњачи Немачка у тежњи да постепеним затварањем нуклеарних електрана пређе на нове обновљиве изворе енергије. У утакмици између ветра, сунца и воде као најодрживијих извора енергије, потребно је поменути главне разлоге због којих вода остварује удео од 90%.

Хидроелектране, као вишенамениски објекти осим производње енергије имају и друге намене. Њихове акумулације остварују водне резервоаре на вишим нивоима за снабдевање водом потрошача, док на нижим низводним позицијама омогућавају надзор над поплавама и омогућавају наводњавање површина за производњу хране, помажу одржавању површина, нивоа вода за аграр и за живот домаћих и дивљих животиња, узгој риба и креирају могућности за туризам рекреацију.

Водна енергија је ефикасна и користи се са изразито високом вредношћу односа произведене електричне енергије и расположивог потенцијала, односно са високим степеном искоришћења. Турбине имају висок степен корисности у оптимуму, већи од 95% и раде спрегнуто са Теслиним генераторима наизменичне струје који такође достижу висок степен корисности, већи од 97,5%. Може се рећи да је трансформација хидрауличке енергије у електричну најефикаснији процес њене производње. Поређења ради, у електранама са најбољим фосилним горивима достиже се степен корисности од око 50%.

Капланове турбине највећих димензија и снага не заостају за Францисовим турбинама. Највеће турбине тог типа имају пречник обртног кола већи од 10 m и највеће снаге и 220 MW. Захваљајући комбинаторској вези између лопатица спроводног апарата и обртног кола поседују високе енергетске перформансе у широком подручју рада, од 30% до 100% максималног протока.

Предмет рада дисертације односи се на проналажење и избор метода за постизање најбољих перформанси обртних кола Капланових турбина коришћењем дугогодишњег искуства стеченог радом на многобројним пројектима хидроелектрана широм света, коришћењем супер рачунара за нумеричке симулације турбулентног струјања и посебно, на основу експерименталних истраживања на опитним инсталацијама у лабораторији Турбоинститута, Љубљана. Циљ је развити нова обртна кола бољих карактеристика од постојећих, у краћем временском периоду и уз смањење трошкова.

У другом поглављу је дат преглед досадашњих истраживања од самих почетака до данас.

Аксијалне турбине, проналаском Капланових турбина и њеном могућношћу регулације протока у широком дијапазону, омогућиле су коришћење водотокова мањих падова. Развој турбина се у

почетном периоду остваривао у најразвијенијим земљама света са великим инвестирањем у лабораторије и опрему за њихово испитивање.

Први кораци у истраживању су били усмерени ка тражењу оптималних облика свих проточних делова Капланових турбина. За искоришћење мањих падова, истраживања су била усмерена ка тражењу таквих типова аксијалних турбина са већом специфичном брзином обртања, тако да је добијена Цевна турбина са свим варијантама цевне турбине за мање снаге као што су Цевна "C", PIT и Saxo турбина.

Каснија истраживања су ишла и у правцу развоја реверзибилних аксијалних турбина за хидроелектране које раде на плиму и осеку. Истраживачи су објављивали радове са најновијим достигнућима у часописима и на симпозијумима. Такође, истраживачи „доајени“ у области изучавања турбина успели су и да напишу књиге о водним турбинама, износећи битне резултате истраживања.

У овом поглављу је такође дат и преглед могућности употребе хидрауличких облика природе у развоју нових технологија. Проучавање структура и механизма из природе и њихова примена у дизајну и функционалности машина назива се технологија инспирисана биологијом или "biomimetics". То је заправо интердисциплинарни приступ који комбинује научни инжењеринг, математику, физику, итд. Потреба за применом овог приступа је посебно корисна када ефикасност облика из природе превазилази тренутни технолошки ниво.

Биолошки дизајн је настао еволуцијом, односно Дарвиновим процесом "природне селекције", јер се сматра да је код већине живих бића већ извршена оптимизација облика у сагласности са обављањем појединих функција. Различите морфолошке оптимизације већ извршене код живих бића су привукле пажњу инжењера за трансфер технологија, јер се на тај начин значајно смањује време развоја иновативних и технолошких решења.

Пројектовани системи су релативно велики, сачињени од чврстих материјала, користе моторе за кретање и ротације и све то се контролише рачунарским системима са сензорима који имају ограничене повратне информације, док су жива бића углавном мала, сачињена од таквих материјала, који покрете изводе уз помоћ мишића а контрола се изводи са сложеним неуронским мрежама. Осим тога, животиње су вишеструко функционалне (оне се крећу, хране и репродукују) и постоји компромис оптималних решења за специјалне функције уз адекватно обављање функција.

Познати италијански свестрани геније, Леонардо да Винчи, је први познати стручњак из подручја технологије инспирисане биологијом. Студирао је лет птица и цртао прве облике летећих објеката намењених за употребу људи.

Рибе и сисари који пливају су веома занимљиви објекти за изучавање "biomimetics" специјалиста. На пример, нос делфина је модел за крушколик облик прамца који омогућава бродовима да плове океанима са мање хидрауличног отпора и самим тим уз мању потрошњу горива. Исто тако су Airbus инжењери копирали грубу кожу ајкула да развију избраздан премаз фолију за крила њихових авиона. Резултат је смањење трења до 6% и значајне уштеде у потрошњи горива.

У трећем поглављу је приказана анализа и избор критеријума оцењивања карактеристика турбина. Од тренутка када су прве Капланове турбине угледале светло дана инжењери су побољшавали њихове карактеристике, тако да су у тридесетим годинама претходног века имале степен корисности од 85% до 90%. Обзиром да тренутни максимални ниво степена корисности износи у просеку 95%, просечно повећање степена корисности у прошлости је било на нивоу 0,1% годишње. Такав тренд више није могуће следити обзиром да су губици пада у појединим турбинским компонентама, укључујући и обртно коло, већ доведени на минимум. Изазов је добити врхунске карактеристике за улазне параметре хидро електрана који се у већини примера међусобом разликују. Потребно је имати искуство и знање за постављањем оптималних карактеристика у подручје рада са највећом вероватноћом.

За достизавање таквих карактеристика потребно је користити се алатима као што су савремене опитне станице за испитивање модела турбина произведених на CNC машинама и супер рачунарима за нумеричке симулације.

Јачањем капацитета рачунара и квалитета нумеричких метода решавања турбулентних модела, брзина прорачуна кроз турбину се смањује на прихватљиво време а поузданост резултата повећава. Тако можемо врло детаљно анализирати механизам процеса у

унутрашњости турбине и самим тим је омогућено оптимизирати сваку компоненту понаособ и, као последица тога, повећати укупни степен корисности турбине. Комбиновањем карактеристика добијених моделским испитивањима и нумеричким симулацијама добија се критеријум оцене карактеристике турбине.

У четвртом поглављу приказана је анализа утицаја геометријских параметара на карактеристике турбине. Различити типови турбина могу се класификовати на основу њихове специфичне брзине обртања. Постоје различите дефиниције специфичне брзине обртања у техничкој литератури. Код турбина се користи специфична брзина обртања везана за снагу турбине док се код пумпи користи специфична брзина обртања везана за проток. Некада се је као јединица за снагу користила коњска снага и у неким срединама инжењери још увек употребљавају специфичну брзину обртања израчунату на тај начин. Обзиром да је у САД-у још увек у употреби систем англосаксонских јединица, постоји и одговарајућа статистика са тим мерним јединицама. Примењени јединични системи не утичу на глобалну слику и закључке о основним значајима турбина везаним на специфичну брзину обртања.

Власници и пројектанти хидроелектрана постају све захтевнији у смислу специфичног оптерећења турбине за дате улазне параметре. То је могуће видети на основу анализе тренутних трендова и њиховим поређењем са трендовима приказаним у литератури из прошлости.

Оцена карактеристичних брзина обртања турбине, пречника и очекиване потопљености обртног кола за дате улазне параметре дефинишу се преко радне тачке турбине везане за максималну снагу код минимално могућег пада и уз максимални проток кроз турбину. То је такозвана номинална радна тачка.

Оптимални геометријски параметри обртних кола Капланових турбина по дефиницији се везују за специфичну брзину обртања одређену за максимални степен корисности, односно положај у шкољкастом дијаграму где се остварује оптимум мђусобних интеракција главних делова Капланове турбине: спирала са статорским лопатицама, спроводни апарат, обртно коло и сифон.

Утицај геометријских параметара на карактеристике турбине могуће је истражити ако се поседује властита база података о геометрији и резултати моделских испитивања у неколико задњих деценија. У овом раду су анализиране све Капланове и цевне турбине које су развијене у јакој међународној конкуренцији и испитане на модерним опитним инсталацијама у Лабораторији Турбоинститута. Обзиром да је могуће за мале падове користити и цевне турбине, извршена је и анализа тренда властитих референци и поредили га са трендом Капланових турбина.

У петом поглављу приказани су турбулентни модели погодни за анализу струјања кроз обртна кола. Прорачун струјања у хидрауличним машинама може се урадити на различитим нивоима. Историјски гледано, употреба различитих метода је зависила од могућности коришћења различитих рачунарских капацитета. Најједноставнији пример анализирања струјања је коришћење методе потенцијалног струјања, где се не узимају у обзир вртложност и вискозни ефекти у струјном пољу.

Следећи ниво је коришћење Ојлерових једначина, где можемо да моделирамо вихоре, али још нису укључени вискозни ефекти. Та чињеница је значајна посебно при коришћењу различитих нумеричких метода код решавања система диференцијалних једначина, где се користи дискретизација подручја анализе. Због неузимања у обзир вискозних ефеката, није потребно повећати густину мреже уз зидове те се могу извести нумеричке симулације на прорачунским мрежама мање густине, са знатно мањим бројем елемената него код модела, који користе вискозне ефекте. Последица овога је значајно краће време прорачуна.

Решавање комплетних Навије-Стоксових једначина може се поделити на два случаја: ламинарно и турбулентно струјање. Реални случајеви струјања у хидрауличним машинама су увек турбулентни. Решавање турбулентног струјања може се опет поделити на различите нивое.

Најједноставнија, али истовремено рачунски најзахтевнија, је метода DNS, при чему би применом најквалитетнијих супер рачунара рачунска времена у конкретним примерима била око пар година, те поменута метода није примерена за индустријске услове. У индустрији се највише користе турбулентни модели, који се заснивају на осредњеним Навије-Стоксовим

једначинама, уз коришћење турбулентне вискозности. Турбулентна вискозност се од вискозности разликује првенствено у чињеници, да је то особина струјања, а не течности.

Турбулентна вискозност се може израчунати употребом емпиријски добијених алгебарских једначина (zero-equation model), додавањем осредњеним Навије-Стоксовим једначинама једне диференцијалне једначине (једноједначински модел), или две додате диференцијалне једначине (двоједначински модели). Могу се користити и RSM (Reynolds Stress Model) модели, при чему се не користи турбулентна вискозност, него се израчунају сви члани Рејнолдсовог напонског тензора. Због већег броја додатих диференцијалних једначина, ове методе су рачунски захтевније. Постоје још и друге методе, као на пример LES и DES методе, који су због нестационарности и одређених захтева у односу на квалитет рачунских мрежа и величине временских корака, јако споре.

У шестом поглављу је приказана детаљна нумеричка анализа струјања у Каплановој турбини ХЕ Златоличје. Прорачуни су урађени програмским пакетом Ansys CFX.

Код аксијалних турбина су одступања између нумеричких и измерених резултата у принципу већа него код Францисових турбина. Сврха истраживања у овом раду је истраживање узрока за наведена одступања и могућност њихових смањивања. У ту сврху је истражено:

- утицај турбулентних модела на резултате,
- утицај граничних услова на H (пад турбине) или Q (проток кроз турбину),
- утицај густине и структуре мреже,
- утицај моделирања зазора,
- разлику између резултата стационарних и нестационарних прорачуна,
- утицај улазних услова.

У седмом поглављу приказани су резултати експерименталних и нумеричких истраживања утицаја геометрије обртних кола Капланове турбине на карактеристике турбине.

За проверу утицаја геометрије обртних кола на карактеристике Капланове турбине изабран је нови пројекат са специфичним бројем обртаја $n_{s\ opt} = 380$. То је велика Капланова турбина са шест лопатица, номиналне снаге 183,7 MW и максималне снаге 203,5 MW.

Почетне димензије главчине са капом и грло кућишта радног кола изабрани су на основу искуства и трендова основних димензија обртног кола. За лопатице обртног кола са ознаком "Z" коришћене су две типичне фамилије обртних кола које су биле независно оптимизирани, а потом су најбоља решења била поређена. Анализирано је око 15 различитих варијанти. Изабрани су они резултати који квалитативно указују на утицај геометрије и због додатне оцене за два изабрана турбулентна модела. Директно се пореде четири обртна кола са резултатима моделских испитивања, а три од њих са резултатима нумеричке симулације. За најбоље обртно коло приказан је утицај дужине капе обртног кола.

У наставку су приказани резултати примене облика улазне ивице лопатице из природе. Обављена су моделска испитивања на пропелерној турбини са седам лопатица, а за две различите густине грба сличне облицима прсних пераја кита грбавца. Приказани су и резултати нумеричке симулације облика носа делфина на најбољем обртном колу анализирани турбине.

У поглављу Закључци изведени су закључци предходних разматрања и дат предлог даљих истраживања.

На крају је наведена коришћена литература.

3. Оцена дисертације

3.1. Савременост, оригиналност и значај

Докторска дисертација "АНАЛИЗА УТИЦАЈА ГЕОМЕТРИЈЕ ЛОПАТИЦА ОБРТНОГ КОЛА НА КАРАКТЕРИСТИКЕ КАПЛАНОВИХ ТУРБИНА" представља савремен, оригиналан и значајан допринос разматраној проблематици. Значај ових истраживања огледа се кроз актуелност која третира оптимизирање обртних кола Капланових турбина одређивањем оптималних геометријских карактеристика, при чему се постиже степен корисности прототипа већи од 95%. Савременост теме потврђују велика улагања у истраживања избора најбољег турбулентног

модела за симулацију струјања употребом најачих суперрачунара и експерименталном верификацијом у једној од најбољих лабораторија на свету. Успостављена је синергија та два приступа истраживања. Оригиналност се такође огледа и у приступу примене појединих природних хидрауличких облика, који су истраживани на једној великој Каплановој турбини.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У докторској дисертацији је коришћена обимна савремена литература из области: теорије хидрауличких турбина, развоја и освајања аксијалних турбина, теоријске и примењене механике флуида, моделирања турбулентних струјања и нумеричког решавања парцијалних диференцијалних једначина којима се описују конкретни турбулентни модели. Кандидат је користио 74 литературних јединица, објављених у књигама, научним и стручним часописима и стандардима. Иако литературних јединица има много више, кандидат је зналачки изабрао најкорисније, које су му послужиле као подршка за приказ достигнућа у области хидрауличких турбина и уједно му дале полазне основе за сопствена истраживања која су обогатила ризницу постојећих сазнања.

3.3. Анализа примењених научних метода и њихова адекватност за спроведено истраживање

У првом делу истраживања, које се заснива на анализи утицаја геометријских параметара на карактеристике турбине из постојеће базе података о геометрији и резултатима моделских испитивања остварених у неколико задњих деценија, формиран су трендови најважнијих параметара Капланових турбина. Додатном анализом и поређењем моделских и испитивања на терену те анализом могућности употребе решавања савремених нумеричких симулација на суперрачунару изабран је критеријум за оцену карактеристика турбина. На једном конкретном пројекту, на коме је измерен велики број радних тачака, извршена је анализа и избор два најбоља турбулентна модела за нумерички прорачун струјања кроз проточни тракт Капланових турбина. Изабрани турбулентни модели су додатно проверени верификацијом моделским испитивањима на пројекту развоја новог модела (освојене геометрије кандидата) велике Капланове турбине максималне снаге веће од 200 MW.

3.4. Оцена применљивости и верификације остварених резултата

Остварени резултати овог истраживања се примењују у пракси, пошто је на основу извршених анализа досадашњих пројеката са Каплановим и цевним турбинама развијен програм за брзо обликовање геометрије нових лопатица обртног кола. Оптимизација неколико најбољих обртних кола се остварује нумеричком симулацијом изабраним турбулентним моделом. Избор турбулентног модела се дефинитивно потврђује моделским испитивањима на опитним инсталацијама у лабораторији Турбоинститута. На овај начин, применом освојених поступака, реализовано је више обртних кола Капланових и цевних турбина.

3.5. Оцена способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је током израде ове дисертације показао да је у стању да самостално решава инжењерске и научне проблеме и да успешно влада научним и истраживачким методама, што представља одличну основу за даља истраживања у науци и струци.

4. Остварен научни допринос

4.1. Приказ оствареног научног доприноса

Узимајући у обзир да је основни циљ дисертације био анализа утицаја геометрије лопатица обртног кола на карактеристике Капланових турбина, основни научни допринос се састоји у следећем:

- Извршена је подробна анализа властите базе података која је сачињена на основу вишедеценијских теоријских и експерименталних истраживања. На основу ове анализе и анализе већ постојећих истраживања других аутора, кандидат је дошао до значајних геометријских параметара везаних за геометрију обртних кола и пратећих трендова Капланових и цевних турбина везаних за специфичну брзину обртања. Ова истраживања су основа релативно брзо обликовање обртних кола Капланових и цевних турбина.
- Посебно су интересантна истраживања хидрауличких облика који се јављају у природи (нос делфина и прсно пераје са грбама код кита) и њихова примена на обликовању улазних ивица лопатица обртног кола.
- Извршена је анализа и примена турбулентних модела који се примењују за прорачун струјања кроз обртна кола аксијалних турбина.
- Бројним експериментима на турбинама у опитним инсталацијама добијени су резултати који су упоређивани са нумеричким резултатима турбулентних модела. Утврђено је да су два турбулентна модела погодна за употребу у пракси, и то SST CC KL и SSG RSM. Испитана је и могућност употребе нестационарних модела, који такође дају добре резултате.
- Значајна су истраживања утицаја густине и структуре мреже која се примењује код нумеричких решавања једначина турбулентних модела. Значај се састоји у чињеници да су струјања у обртним колима и у сифону турбина изразито сложена, те да би се добили што бољи резултати било је неопходно извршити и истраживања поменутих утицаја вршећи велики број нумеричких експеримената.
- Истраживање утицаја геометрије лопатица, зазора и капе главчине на већем броју моделских лопатица дала су нова сазнања како се променом нагиба угла тетиве радијуса улазне ивице, променом положаја улазне ивице и величине капе обртног кола може повећати хидраулички степен корисности турбине и добити жељене карактеристике Капланове турбине.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Сагледавањем постојећег стања, циљева истраживања и добијених резултата, може се констатовати да су разрешена битна питања и дилеме које су се јавиле у току истраживања. Резултати анализа и закључци у раду ће се користити код реализација нових и ревитализације постојећих хидроелектрана са турбинама Каплановог типа. Успешно хидраулично обликовање експерименталним експериментима обртног кола Капланове турбине није могуће само уз помоћ турбулентних модела, већ само итеративним поступком са експериментима.

4.3. Очекивана примена резултата у пракси

Примена добијених резултата у овој докторској дисертацији отвара нове развојне могућности имплементације обртних кола високе ефикасности. Пошто се последњих година у свету а и код нас врши ревитализација производних агрегата са повећањем снаге, ова испитивања у области освајања нових геометрија лопатица обртног кола високог степена корисности, када се код турбине може променити обртно коло уз задржавање осталих делова, извесно ће послужити у пројектима ревитализације хидроелектрана са Каплановим турбинама. Треба рећи да се ови резултати већ користе. Оно што је такође важно, поступак и приступ код ових истраживања може се применити на остале типове турбина, као што су Франсис и цевне.

4.4. Верификовани научни доприноси

Како истраживања кандидата трају већ више година, то је научни допринос докторске дисертације верификован радовима објављеним у часописима и саопштењима на конференцијама. Навешће се само најзначајнији радови везани за проблематику тезе:

1. Kercan V., Djelić V., Močnik Z., Šturm M., Hydro power plants on Drava river in Slovenia – Two approaches for refurbishment, *International Water Power & Dam Construction*, ISSN 0306-40X, vol. 45, br. 12, 1989.

2. Velenšek B., Djelić V., The Analysis of the three dimensional flow in an S-shaped Draft Tube, Proceedings of the 16th IAHR Symposium - Hydraulic Machinery and Cavitation, Sao Paulo, 1992.
3. Djelić V., Velenšek B., The Analysis of the Pressure Distribution and Recuperation in a S-shaped Draft Tube, Hydropower & Dams conference on Modelling, Testing & Monitoring for Hydro Powerplants, Budapest, 1994.
4. Djelić V., Peršin Z., Jošt, D. i dr, Influence of Partly Closed Draft Tube Stoplog on Bulb Turbine Characteristics, Proceedings of the 17th IAHR Symposium - Hydraulic Machinery and Cavitation, L-10, Beijing, 1994.
5. Kercan V., Bajd M., Djelić V., Lipej A., Jošt D., Model and prototype draft tube pressure pulsations, Proceeding of the 7th meeting of IAHR - Behavior of hydraulic machinery under steady oscillatory conditions, A-6, str. 1 – 11, Ljubljana, 1995.
6. Kercan V., Djelić V., Rus, T. idr, Experience with Kaplan Turbine Efficiency Measurements – Current-meters and/or Index Test Flow Measurement, IGHEM Seminar, Montreal, July 1996.
7. Djelić V., Kercan V., Jošt D. idr, Results of turbine model development for Drava river plants chain, Proceeding of the Conference Modelling, testing and monitoring for hydro powerplants, Lausanne, 1996.
8. Kercan, V., Bajd, M., Djelić, V., Lipej, A., Jošt, D., Model and prototype draft tube pressure pulsations, Proceedings of the 18th IAHR Symposium - Hydraulic Machinery and Cavitation, Valencia, 1996.
9. Kern I., Rus T., Hočevan M., Djelić V., Širok B., Study of topological structures of cavitation with dynamical analysis and computer aided visualisation, Behavior of hydraulic machinery under steady oscillatory conditions, Proceeding of the 9th meeting of IAHR, Brno, 1999.
10. Djelić V., Rus T., Absolute flow measurement on HPP Ožbalt using 320 current – meters simultaneously, Proceeding of the IGHEM 2000, Kempten, 2000.
11. Djelić V., Kercan V., Rus T. idr, Efficiency Scale-up in Refurbished low head Kaplan turbines, Proceeding of the 20th IAHR Symposium - Hydraulic Machinery and Systems, Charlotte, 2000.
12. Kern I., Djelić V., Rus T., Experience with model and field testing of cavitation of low head Kaplan turbines, Proceeding of the 20th IAHR Symposium - Hydraulic Machinery and Systems, Charlotte, 2000.
13. Kercan V., Djelić V., Ispitivanja modela u procesu obnove hidroelektrana pristupi i iskustva, HEPP 2001; 1. Međunarodni simpozij, Hidroelektrane – obnovljiva energija za danas i sutra, Šibenik, 2001, str. 58-64.
14. Djelić V., Kercan V., Rus T. idr, Efficiency scale – up in refurbished low head Kaplan turbines, Proceeding of the International conference of Classics and fashion fluid machinery, str. 53 – 67, Belgrade, 2002.
15. Kern I., Djelić V., Rus T., Experience with model and field testing of cavitation of low head Kaplan turbines, Proceeding of the International conference of Classics and fashion fluid machinery, str. 67 – 75, Belgrade, 2002.
16. Lipej A., Jošt D., Mežnar P., Djelić V., Numerical analysis of rotor-stator interaction in a reversible pump-turbine – pump mode, Proceeding of the 23th IAHR Symposium - Hydraulic Machinery and Systems, Yokohama, 2006.
17. Lipej A., Jošt D., Mežnar P., Djelić V., Numerical prediction of pressure pulsation amplitude for different operating regimes of Francis turbine draft tube, Proceeding of the 24th IAHR Symposium - Hydraulic Machinery and Systems, Foz da Igauasu, Brasil, 2008.
18. ЂЕЛИЋ, Веско, КЕРЦАН, Владимир, ВЕЛЕНШЕК, Борис: Утицај проточног тракта на карактеристике цевних турбина, Електропривреда 43, 3-4, YU ISSN 0013-5755, Београд, 1990, стр. 102-108

5. Закључак и предлог

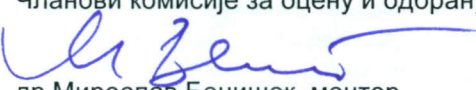
Докторска дисертација под насловом: "АНАЛИЗА УТИЦАЈА ГЕОМЕТРИЈЕ ЛОПАТИЦА ОБРТНОГ КОЛА НА КАРАКТЕРИСТИКЕ КАПЛАНОВИХ ТУРБИНА" кандидата мр Веска Ђелића, дипл. инж. машинства, представља савремен и оригиналан научни допринос кроз свеобухватно сагледавање проблематике оптимизације обртних кола Капланових турбина високе ефикасности.

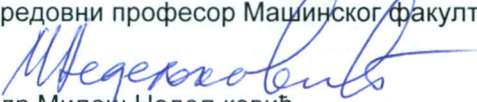
На основу онога што је приказано у докторској дисертацији и чињеници да је анализирана проблематика веома актуелна у научној јавности, са задовољством се констатује да је кандидат мр Веско Ђелић, дипл. инж. маш., успешно завршио докторску дисертацију у складу са предвиђеним предметом и постављеним циљевима докторске дисертације.

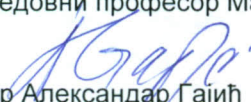
На основу прегледа докторске дисертације од стране Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације под називом: "АНАЛИЗА УТИЦАЈА ГЕОМЕТРИЈЕ ЛОПАТИЦА ОБРТНОГ КОЛА НА КАРАКТЕРИСТИКЕ КАПЛАНОВИХ ТУРБИНА" кандидата мр Веска Ђелића, дипл. инж. маш., Комисија за оцену и одбрану са задовољством констатује да је урађена докторска дисертација написана према свим стандардима у научно истраживачком раду, као и да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању, стандардима и Статутом Машинског факултета у Београду. Комисија предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да овај Извештај прихвати, дисертацију стави на увид јавности, и упути извештај на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, а да се након тога кандидат позове на јавну одбрану.

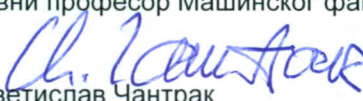
У Београду 19.04.2012. год.

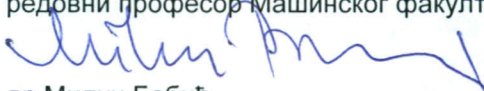
Чланови комисије за оцену и одбрану:


др Мирослав Бенишек, ментор
редовни професор Машинског факултета у Београду


др Милош Недељковић
редовни професор Машинског факултета у Београду


др Александар Гајић
редовни професор Машинског факултета у Београду


др Светислав Чантрак
редовни професор Машинског факултета у Београду


др Милун Бабић
редовни професор Факултета инжењерских наука у Крагујевцу



УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број:303/6
Датум:26.04.2012. године
Београд, Краљице Марије бр. 16

На основу члана 128. Закона о високом образовању и члана 12.2 Статута Машинског факултета, Наставно-научно веће на седници одржаној 26.04.2012. године, донело је

ОДЛУКУ

I Прихвата се извештај о позитивној оцени урађене докторске дисертације коју је поднео мр ВЕСКО ЂЕЛИЋ и одобрава јавна одбрана дисертације по добијању сагласности од Универзитета, под насловом: „АНАЛИЗА УТИЦАЈА ГЕОМЕТРИЈЕ ЛОПАТИЦА ОБРТНОГ КОЛА НА КАРАКТЕРИСТИКЕ КАПЛАНОВИХ ТУРБИНА“

II Универзитет је дана 17.11.2003. године, својим актом број 33/6 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата.

III Радови кандидата у часопису међународног значаја:

1. Kercan V., Djelić V., Močnik Z., Šturm M., Hydro power plants on Drava river in Slovenia – Two approaches for refurbishment, *International Water Power & Dam Construction*, ISSN 0306-40X, vol. 45, br. 12, 1989.

Одлуку доставити: кандидату, ментору, Катедри за хидрауличне машине и енергетске системе и архиви факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број: 3038/2
Датум: 15.12.2011. године
Београд: Краљице Марије 16

У вези захтева мр Веска Ђелића, дипл.инж.маш., уз сагласност ментора проф.др Мирослава Бенишека и Шефа Катедре за хидрауличке машине и енергетске системе, да му се продужи рок за израду докторске дисертације, Наставно-научно веће Машинског факултета сагласно чл. 128. Закона о високом образовању, на седници одржаној 15.12.2011. године донело је следећу

ОДЛУКУ

Одобрава се продужење рока за израду докторске дисертације **«АНАЛИЗА УТИЦАЈА ГЕОМЕТРИЈЕ ЛОПАТИЦА ОБРТНОГ КОЛА НА КАРАКТЕРИСТИКЕ КАПЛАНОВИХ ТУРБИНА»** кандидата **мр ВЕСКА ЂЕЛИЋА**, дипл.инж.маш. до 15.12.2012. године.

Одлуку доставити: ментору, Катедри, кандидату и архиви.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф. др Милорад Милованчевић