

Факултет МАШИНСКИ

590/5
(Број захтева)

30.04.2015.
(Датум)

Образац 1.
УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

Већу научних области техничких наука

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

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

УТИЦАЈ ОШТЕЋЕЊА СТАЗА КОТРЉАЊА НА РАДНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ КУГЛИЧНИХ КОТРЉАЈНИХ ЛЕЖАЈА

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ Опште машинске конструкције

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

1. Име, име једног родитеља и презиме кандидата: НАТАША (ДРАГО) СОЛДАТ

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 30.04.2015
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: 590/5
Датум: 30.04.2015. године
Београд, Краљице Марије 16

На захтев **Наташе Солдат, дипл.инж.маш.**, бр. 590/1 од 31.03.2015. године, извештаја Комисије у саставу: проф.др Радивоје Митровић, ментор, др Ивана Атанасовска, виши научни сарадник И.Ц. М.Ф. Београд, коментор, проф.др Божидар Росић, проф.др Татјана Лазовић и доц.др Радослав Томовић, Машински факултет Универзитета Црне Горе, број 590/4 од 28.04.2015. 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 30.04.2015. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Прихвата се предлог о испуњености услова и о научној заснованости теме докторске дисертације **«УТИЦАЈ ОШТЕЋЕЊА СТАЗА КОТРЉАЊА НА РАДНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ КУГЛИЧНИХ КОТРЉАЈНИХ ЛЕЖАЈА»** докторанта **НАТАШЕ СОЛДАТ, дипл.инж.маш..**

За ментора докторанту Наташи Солдат, именује се **проф.др Радивоје Митровић, коментор др Ивана Атанасовска, виши научни сарадник И.Ц. М.Ф. Београд.**

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

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
Машински факултет

ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

Предмет: Подобност теме и кандидата Наташе Д. Солдат, дипл.инж.маш., за израду докторске дисертације

Одлуком бр. 590/3 од 16.04.2015. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата **Наташе Солдат, дипл.инж.маш.**, за израду докторске дисертације и научне заснованости теме **Утицај оштећења стаза котрљања на радне карактеристике кугличних котрљајних лежаја.**

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

РЕФЕРАТ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Кандидат, Наташа Д. Солдат, дипл.инж.маш., је рођена 13.03.1985. године у Приједору (Босна и Херцеговина). Основну школу и гимназију завршила је у Београду. Машински факултет Универзитета у Београду уписала је 2004. године, а дипломирала 2010. године на Одсеку за термотехнику. Своје научно и стручно усавршавање реализује на Машинском факултету у Београду као студент докторских студија.

Од фебруара 2011. запослена је као истраживач сарадник на Машинском факултету у Београду на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије „Развој методологија за повећање радне способности, поузданости и енергетске ефикасности машинских система у енергетици“ – ТР 35029 под руководством Проф. др Радивоја Митровића.

Учествује у наставном процесу Катедре за Опште машинске конструкције Машинског факултета у Београду на Основним академским студијама (*Машински елементи 1 и 2, Основе конструктисања*). На свим спроведеним анкетама студената добијала је изузетне оцене за педагошки и наставни рад.

У досадашњем раду успешно је овладала специфичним софтверима за 3D моделирање и симулацију Методом коначних елемената (Autodesk Inventor, Ansys), а дужи низ година користи и стандардне апликације из софтверског пакета MS Office (Word, Access, Excel).

Кандидат говори, чита и пише на енглеском језику.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Током докторских студија на Машинском факултету у Београду, Наташа Д. Солдат је положила све предмете: Виши курс математике, Нумеричке методе, ОМНИР и комуникација, Поузданост возила, Одабрана поглавља из механике, Одабрана поглавља из машинских елемената, Техничко законодавство – прописи и стандарди, Одабрана поглавља из конструисања и Клизни и котрљајни парови, са укупном просечном оценом 9,92. Школске 2013/2014 године кандидату је одобрено мировање. Пошто је текућа школска година (2014/2015) пета активна година докторских студија кандидата, њен статус је у потпуности усклађен са одговарајућим Законом.

Ред. бр. предмета	Назив предмета	Предметни наставник	Година студија (ЕСПБ)				Оцена испита
			1. година		2. година		
			I(11)	II (12)	III (13)	IV(14)	
1	Виши курс математике	Проф. др Стојан Раденовић	5				10 (десет)
2	Нумеричке методе	Проф. др Миодраг Спалевић	5				10 (десет)
3	ОМНИР и комуникација	Проф. др Милош Недељковић	5				10 (десет)
4	Поузданост возила	Проф. др Градимир Ивановић	5				10 (десет)
5	Одабрана поглавља из механике	Проф. др Зоран Митровић		5			10 (девет)
6	Одабрана поглавља из машинских елемената	Проф. др Милета Ристивојевић		5			10 (десет)
7	Техничко законодавство – прописи и стандарди	Проф. др Радивоје Митровић		5			10 (десет)
8	Одабрана поглавља из конструисања	Проф. др Милета Ристивојевић			5		9 (девет)
9	Клизни и котрљајних парови	Проф. др Радивоје Митровић			5		10 (десет)
10	Истраживање и публикавање 1 (Лабораторија 1)	Проф. др Радивоје Митровић	10				10 (десет)
11	Истраживање и публикавање 2 (Лабораторија 2)	Проф. др Радивоје Митровић		15			10 (десет)
12	Истраживање и публикавање 3 (Лабораторија 3)	Проф. др Радивоје Митровић			20		10 (десет)
13	Истраживање и публикавање 4 (Лабораторија 4)	Проф. др Радивоје Митровић				25	10 (десет)

Списак публикованих радова и пројеката кандидата у периоду од 2010. до 2015. год.

Радови саопштени на међународним скуповима:

1. **Soldat, N.**, Radišić, M.: *Basic aspects of defining mechanical-technological solutions for the production of biogas from liquid*, Proceedings of the 10th Anniversary International Conference on Accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology-DEMI 2011, University of Banja Luka Faculty of Mechanical Engineering 26th-28th May 2011, Banja Luka, 2011, pp. 449-452.
2. Radišić, M., **Soldat, N.**: *Some experiences in the production of biogas from liquid manure*, Proceedings of the 10th Anniversary International Conference on Accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology-DEMI 2011, University of Banja Luka Faculty of Mechanical Engineering 26th-28th May 2011, Banja Luka, 2011, pp. 549-554.
3. Mitrović, R., Mišković, Ž., Tasić, M., Stamenić, Z., **Soldat, N.**, Matić, N.: *Conveyor idlers testing machine*, Proceedings of the 29th Danubia-Adria Symposium-DAS-29, University of Belgrade, Serbia, 2012, pp. 278-281.
4. Mitrović, R., **Soldat, N.**, Atanasovska, I.: *Dynamic behaviour of radial ball bearing due to the periodic variable stiffness*, Proceedings of the 2nd International Scientific Conference COMETA 2014, 2nd-5th December 2014., Jahorina, B&H, Republic of Srpska, Vol.1, ISBN 978-99976-623-1-6, COBIS.RS-ID 4642584, Published by University of East Sarajevo, Faculty of Mechanical Engineering, pp.389-396.
5. Atanasovska, I., Mitrović, R., Stefanović, S., **Soldat, N.**, Mišković, Ž.: *Calculation of radial stiffness for single-row ball bearing with finite element analysis*, Proceedings of the 8th International Symposium KOD 2014-Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering, 12th-15th June 2014., Balatonfüred, Hungary, ISBN 978-86-7892-615-0, COBISS.SR-ID 286511111, Publisher: Faculty of Technical Sciences-Novi Sad, Serbia, pp. 201-206.
6. Atanasovska, I., Mitrović, R., Momčilović, D., **Soldat, N.**: *The new methodology for assessment of involute gears stability*, The International Symposium on Stability, Vibration and Control of Machines and Structures (SVCS 2014), 3rd-5th July 2014., Belgrade, Serbia, ISBN 978-80-8075-655-0, Published by Springer, pp. 285-295.
7. Mitrović, R., Atanasovska, I., **Soldat, N.**: *Experimental measurements of vibration at rolling ball bearings*, The International Symposium on Stability, Vibration and Control of Machines and Structures (SVCS 2014), 3rd-5th July 2014., Belgrade, Serbia, ISBN 978-80-8075-655-0, Published by Springer, pp.8-8.

Радови у часописима националног значаја:

8. **Soldat, N.**, Stepanov, N.: *Dijagnosticiranje stanja termoelektričnog postrojenja primenom metode bez razaranja materijala*, Tehnika, Mašinstvo 61 (3), 2011, str. 394-400.
9. **Soldat, N.**, Radišić, M.: *Basic aspects of defining mechanical-technological solutions for the production of biogas from liquid*, Journal of Mechanics Engineering and Automation, Vol. 2, No. 3, 2012, pp. 149 – 153.
10. Atanasovska I., Mitrović R., Stefanović S., **Soldat N.**, Mišković Ž.: *Calculation of Radial Stiffness for Single-row Ball Bearing with Finite Element Analysis*, Machine Design, University of Novi Sad – Faculty of Technical Sciences, Vol. 6, No. 3, ISSN 1821-1259, Novi Sad, Serbia, 2014. pp.85-90

Радови саопштени на скуповима националног значаја:

11. **Soldat, N.:** *Energetska efikasnost biogasa kao novog vida energije*, 1 Naučno – stručni skup Preduzetništvo, inženjerstv i menadžment (Zbornik radova), Visoka tehnička škola strukovnih studija u Zrenjaninu, Zrenjanin, 2010.
12. **Soldat, N.:** *Osnovne karakteristike pokazatelja pouzdanosti i njen uticaj na realizaciju procesa proizvodnje*, 2 Naučno – stručni skup Preduzetništvo, inženjerstv i menadžment (Zbornik radova), Visoka tehnička škola strukovnih studija u Zrenjaninu, Zrenjanin, 2011.

Национални пројекти технолошког развоја

1. TP35029 – *Развој методологија за повећање радне способности, поузданости и енергетске ефикасности машинских система у енергетици*, Руководилац: Проф. др Радивоје Митровић, Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, 2011-2015.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Током својих досадашњих стручних и научно–истраживачких активности кандидат је испољио висок ниво ентузијазма, заинтересованости и стручности за научну област општих машинских конструкција – којој припада предложена тема докторске дисертације.

Досадашњи радови кандидата, објављени у часописима и публикацијама са међународних и домаћих конференција су суштински повезани са научном облашћу којој припада предложена тема докторске дисертације, па такође квалификују кандидата за успешан теоријски и експериментални рад на предложеној теми.

Кроз положене предмете на докторским студијама, кандидат је на адекватан начин уведен у предметну проблематику, чиме су испуњени сви формални и суштински услови за наставак рада кандидата на докторској дисертацији са предложеним насловом.

На основу биографских података кандидата и прегледа његових научних и стручних активности, Комисија сматра да је кандидат у потпуности подобан за успешан рад на предложеној теми докторске дисертације.

2. Предмет и циљ истраживања

Котрљајни лежаји, као релативно јефтини и широко коришћени машински елементи у готово свим уређајима и машинама, у знатној мери утичу на функционалност, поузданост и континуиран рад машинских постројења у целини. Њихови могући откази често могу довести до хаварија машина и изненадних застоја целог машинског система, праћеног непланираним трошковима.

Одржавање техничких система, као део процеса производње заузима важно место у производном систему сваког предузећа. Добро спроведено одржавање директно утиче на смањење трошкова производње и пословања. Изненадни и непланирани застоји услед неисправности и неопходног ремонта, нарушавају технолошки процес производње и утичу на економику производње пропорционално времену застоја и средствима уложеним за отклањање кварова. У том смислу веома је важно свако побољшање праћења стања котрљајних лежаја у циљу смањења броја отказа система условљених отказима лежаја.

Повећање конкуренције на тржишту, подиже стандарде развоја производа у свим областима, па тако и у области развоја котрљајних лежаја. Произвођачи посвећују огромну пажњу побољшању постојећих и развоју нових унапређених технологија за производњу лежаја. Како проблем заштите и очувања животне средине добија све већи значај, посебан акценат се

ставља на уштеду енергије, дужи радни век, компактност конструкције и смањење нивоа вибрација и буке које генеришу котрљајни лежаји.

Зависно од радних услова, узроци који доводе до отказа котрљајних лежаја могу бити различити. Статистички подаци из литературе показују да је квалитет израде лежаја само један од узрочника смањења радног века, док се остали параметри као што су лоша монтажа, неадекватно подмазивање и нередовно и неправилно одржавање сматрају примарним узрочницима смањења преосталог радног века и појаве оштећења делова лежаја.

Динамичко понашање представља једну од најважнијих радних карактеристика котрљајних лежаја и веома добро осликава скоро све карактеристике конструкције, израде, монтаже и експлоатације котрљајних лежаја. Основни параметри који описују динамичко понашање лежаја су крутост лежаја и ниво структурних вибрација. Ови подаци могу бити и први индикатори смањења носивости лежаја услед различитих оштећења, што може указати на неопходност за предузимање активности одржавања, за приближавање потребе за оправком или заменом лежаја у наредном временском периоду. Због тога се проблематици истраживања динамичког понашања котрљајног лежаја придаје огроман значај.

Како од исправног и поузданог рада котрљајних лежаја зависи исправност техничких система, данас се у свету посебна пажња посвећује проучавању различитих узрока који доводе до оштећења котрљајних лежаја и усавршавању поступака за предвиђање њиховог отказа.

У циљу побољшања перформанси котрљајних лежаја, неопходан је развој аналитичког модела за анализу лежаја који ће што веродостојније описати механичко понашање током њихове експлоатације. Овакав модел омогућава успостављање математичких релација између конструкционих, технолошких и експлоатационих параметара и параметара рада лежаја, где се пре свега мисли на носивост лежаја и ниво вибрација.

Како котрљајни лежаји представљају сложен систем за моделирање са великим бројем улазних и излазних параметара практично је немогуће формирати један свеобухватни математички модел за анализу понашања лежаја. Због тога се при постављању математичког модела посебна пажња посвећује параметрима који утичу на понашање лежаја у експлоатацији: расподела оптерећења на котрљајним телима, величине контактних напона и деформација, промена угла контакта, зазора или преклопа, температуре, ниво вибрација и геометријска несавршеност стаза котрљања и др. Разматрање ових параметара захтева поделу свеобухватног математичког модела на подмоделе, у зависности од карактера физичких појава које они описују и понашања које се жели са њима испитати. Зато су формирани и стално се унапређују одговарајући математички подмодели: статички, динамички, триболошки, топлотни и математички модел за одређивање радног века лежаја.

Повећање радног века, крутости, брзоходности и тачности обртања, смањење нивоа буке и вибрација, као и откривање узрока отказа котрљајних лежаја, може се остварити детаљним истраживањем карактеристика и динамичког понашања идеалног котрљајног лежаја без грешака геометрије и оштећења и котрљајног лежаја са грешкама геометрије и различитим типовима оштећења.

Динамички модел који описује понашање котрљајног лежаја представља систем једначина кретања прстенова и котрљајних тела у функцији времена и различитих утицајних фактора: геометрије лежаја, масе, крутости, пригушења, разних оштећења и сл. Најважнија излазна карактеристика оваквог модела је спектар вибрација посматраног склопа.

Развијање аналитичког модела за анализу динамичког понашања котрљајног лежаја важно је за успостављање математичке зависности између различитих облика и димензија заморних оштећења, напонског стања у контактним зонама и нивоа вибрација лежаја. На тај начин, било би омогућено да се праћењем промене параметара вибрација лежаја изведе закључак о

појави критичне величине оштећења које доводе до повећања напонских стања у контактним зонама елемената лежаја изнад критичне чврстоће материјала.

Континуираним праћењем стања лежаја и дијагностиковањем оштећења и отказа у циљу његове превентивне замене, могуће је избећи непотребна заустављања погона и на тај начин вишеструко повећати радни век машинског система и елиминисати додатне трошкове.

Развијени аналитички модел за симулацију и анализу динамичког понашања котрљајног лежаја омогућиће успостављање зависности између конструкционих и експлоатационих параметара лежаја са једне стране и параметара који дефинишу радну исправност котрљајног лежаја са друге стране. Као основни параметри радне исправности пратиће се расподела оптерећења на котрљајна тела, величине контактних напона и деформација, као и нивои вибрација и ударних импулса. Овакав модел представља добру основу за развој једног општег модела за прорачун граничних вредности облика и димензија оштећења стаза котрљања које смањују стабилност машинског система у који је лежај уграђен, чиме би се избегла појава превременог отказа лежаја или би се продужио његов радни век кориговањем радног оптерећења.

Свеобухватни циљ истраживања је развијање аналитичког модела и процедуре, на основу којих се може извршити анализа утицаја различитих облика и димензија заморних оштећења стаза котрљања котрљајног лежаја на његову носивост и динамичко понашање. Реализацијом овако постављеног циља биће омогућено одређивање критичне геометрије оштећења стаза котрљања које доводе до смањења носивости лежаја и до изненадних застоја машинског система, који је праћен енергетским и материјалним губицима. Тиме се унапређује и поједностављује технологија одржавања машинских система, што смањује трошкове услед изненадних застоја и постиже оптимално искоришћење капацитета сваког лежаја. Стога је предмет дисертације значајан са аспекта економске и енергетске ефикасности.

Секундарни циљ истраживања је одређивање фактора утицаја облика и димензија заморних оштећења стаза котрљања лежаја, што представља квантитативну меру утицаја унапред дефинисаних параметара оштећења на поједине радне карактеристике лежаја.

У складу са представљеним предметом истраживања, општи научни циљеви предложене теме докторске дисертације су унапређење постојећих знања кроз теоријски и експериментални рад у лабораторијским условима, као и стварање новог генеричког знања у предметној области. Поред општих, могуће је дефинисати и више посебних научних циљева:

1. идентификација утицајних величина на радне карактеристике и динамичко понашање котрљајних лежаја,
2. квалитативна оцена утицаја оштећења на стазама котрљања на динамичко понашање котрљајних лежаја,
3. развијање нумеричких модела Методом коначних елемената (МКЕ) за праћење напонског и деформационог стања елемената лежаја у условима без и са оштећењима на стазама котрљања,
4. развијање аналитичког модела за истраживање утицаја облика и димензија оштећења на стазама котрљања на динамичко понашање лежаја,
5. експериментална верификација нумеричких и аналитичких модела динамичког понашања котрљајног лежаја са и без оштећења и могућа корекција или допуна модела,
6. квантификација утицаја оштећења различитих облика и величина на основне радне карактеристике котрљајних лежаја и развијање математичког модела зависности,
7. одређивање критичних димензија оштећења стаза котрљајног лежаја које доводе до смањења стабилности машинског система у који је лежај уграђен.

Сем наведених, могуће је дефинисати још један специфичан научни циљ – пошто ће резултати реализованих истраживања бити објављивани у значајним међународним публикацијама, циљ истраживања је и постављање солидне основе за даљу сарадњу међу истраживачима у предметној области, на националном и интернационалном нивоу. Такође, знањима стеченим током реализације предложене дисертације, биће обогаћена и настава која се одржава на Машинском факултету Универзитета у Београду, чиме се дугорочно повећава компетентност будућих инжењера машинства у Србији.

Осврт на релевантне библиографске изворе и остварене резултате на које се надовезују предвиђена истраживања у предложеној дисертацији

Напредак у процесу дијагностике стања радне исправности котрљајних лежаја је директно повезан са потпуним сагледавањем и разумевањем њихове носивости и динамичког понашања. Чињеница да и поред великог броја публикованих радова у области детекције и дијагностиковања стања котрљајних лежаја објављених последње деценије, велики број проблема у вези изненадног и непланираног отказа лежаја је још увек неразјашњен, наглашава потребу за даљим истраживањима.

С обзиром на непрестану актуелност истраживања у области динамичког понашања котрљајних лежаја као једног од најважнијих и најрелевантнијих показатеља општег стања радне исправности машинских система, последњих година у свету је публикован велики број радова, студија и монографија које се баве изучавањем ове проблематике.

Како динамичко понашање пружа најпотпунију и најдетаљнију дијагностику стања радне исправности котрљајног лежаја и представља једну од најважнијих радних карактеристика котрљајних лежаја са свим својим импликацијама на њихов радни век: поузданост, брзоходност, тачност обртања, ниво буке и вибрација, његово познавање је неопходан предуслов за исправну анализу стања радне исправности целокупног система [1].

За опис динамичког понашања котрљајних лежаја користе се линеарни и нелинеарни математички модели. Нелинеарни модели приказани у литератури [2, 3, 4, 5, 6] свде се на системе са мањим бројем степени слободе да би примена одговарајућих нумеричких метода за решавање нелинеарног проблема била могућа.

За потпуније разумевање проблематике динамичког понашања котрљајних лежаја неопходно је познавати основне елементе теорије котрљајних лежаја. У својој публикацији *Harris T.A и др.* [7] дали су широк теоријски преглед проблематике котрљајних лежаја. Публикација се састоји из два дела. У првом делу аутори дају основне подлоге у области примене, конструкције и особина котрљајних лежаја. Други део књиге бави се применом лежаја у екстремним радним условима, лежајима оптерећеним изразитим динамичким и сложеним оптерећењем.

Велики број аутора се бавио проблемима истраживања динамичког понашања котрљајних лежаја, у циљу смањења буке и вибрација, повећања радног века, повећања крутости, брзоходности и тачности обртања, развоја метода за дијагностику и надзор лежаја. При томе, веома је значајно идентификовати основне утицајне карактеристике котрљајних лежаја, од којих зависи исправан и поуздан рад система у које су лежаји уграђени.

• Радијални зазор

Радијални зазор је једна од најзначајнијих геометријских карактеристика котрљајног лежаја. Дефинише се као величина могућег померања једног прстена котрљајног лежаја у односу на други. Зазор, који се пројектује у лежају ради компензације деформација током уградње и експлоатације, један је од основних узрока појаве вибрација код лежаја и генерисања њиховог нелинеарног динамичког понашања. Током рада лежаја, услед замора површинских слојева материјала, долази до појаве оштећења различитих облика и димензија на стазама котрљања. Ова оштећења доводе до повећања унутрашњег радијалног зазора у лежају што утиче на

повећање нивоа вибрација лежаја. Зато је проучавању утицаја зазора на нелинеарно динамичко понашање котрљајног лежаја у последње време посвећено много пажње [8, 9]. У свом експерименталном раду *Gustafsson и др.* [10] су указали на значај зазора на генерисање вибрација котрљајних лежаја. *Yamamoto* [11] је приказао аналитички модел за истраживање вибрација ротора који је улежиштен котрљајним лежајима са радијалним зазором.

Changqing и Qingyu [8] представили су општи динамички модел за испитивање динамичких карактеристика система ротора, улежиштеног кугличним лежајима, под утицајем унутрашњег зазора и таласавости спољашње стазе котрљања. Математички модел је коришћен за испитивање утицаја зазора, таласавости, предоптерећења и радијалних сила на нелинеарну стабилност и вибрације система ротора при великим брзинама. Показано је да зазор, аксијално преднапрезање и радијална сила имају огроман утицај на стабилност система, а да је утицај таласавости спољашње стазе котрљања на брзину кавеза далеко значајнији од утицаја таласавости унутрашње стазе и куглица. Осим тога, максимална брзина кавеза опада са повећањем аксијалног преднапрезања и зазора.

Tiwari и др. [12, 13] су у својим радовима истраживали утицај унутрашњег зазора на нелинеарно понашање флексибилног и крутог ротора који су улежиштени котрљајним лежајима. *De Mul и др.* [14] су представили модел са 5 степени слободе за прорачун расподеле оптерећења котрљајних лежаја, при чему су узети у обзир зазор и центрифугалне силе.

Villa и др. [15] приказују нелинеарну динамичку анализу флексибилног ротора, који је неуравнотежен и улежиштен кугличним лежајима. Котрљајна тела лежаја су моделирана са два степена слободе, при чему се узима у обзир кинематика котрљајног тела, као и унутрашњи зазор и *Hertz-ова* нелинеарност у контакту котрљајних тела са стазама котрљања.

Проблематиком утицаја конструкције лежаја на динамичко понашање котрљајних лежаја баве се и домаћи аутори [1, 16]. *Митровић* [16] даје обрасце за прорачун промене радијалног зазора при уградњи лежаја и услед температурних дилатација, као и зависности величине унутрашњег радијалног зазора од положаја комплета куглица, контактних деформација делова лежаја и грешака геометрије стаза котрљања прстенова.

Томовић [1] у свом раду указује на утицај конструкције лежаја на основне параметре динамичког понашања - амплитуду и фреквенцију вибрација. Извршио је детаљну параметарску анализу утицаја унутрашњег радијалног зазора и укупног броја котрљајних тела на стање радне исправности и динамичко понашање лежаја, где је посебна пажња посвећена и утицају спољашњег оптерећења на генерисање вибрација.

• Таласавост стаза котрљања

Поред зазора, многа истраживања се баве утицајем одсупањима од идеалне геометрије стаза котрљања на динамичко понашање котрљајног лежаја и генерисање вибрација [7, 17, 18]. Ту спадају: грешке макрогеометрије стаза котрљања и котрљајних тела (одступања од кружности, несферичност, таласавост, разлика у пречницима и сл.) и микронеравнине услед храпавости стаза котрљања, прстенова и куглица, које изазивају пробијање слоја мазива при елестохидродинамичком подмазивању.

Wardle и Poon [17] истакли су утицај таласавости на генерисање буке и вибрација у лежајима. Истраживањем таласавости додирних површина на динамичко понашање лежаја баве се и аутори *Jang и Jeong* [18] и постављају модел са пет степени слободе за испитивање утицаја таласавости на вибрације лежаја, узимајући при томе у обзир и утицај центрифугалне силе и жirosкопског момента на котрљајна тела.

Исти аутори у раду [19] предлажу аналитички модел за одређивање вибрација услед таласавости котрљајних тела лежаја. Таласавост котрљајног тела је приказана као синусоидна функција. За прорачун еластичних деформација и нелинеарних сила контакта примењена је Hertz-ова теорија. Они разматрају и утицај центрифугалне силе и жирокопског момента на котрљајна тела.

Choudhury и Tandon [20] представљају теоријски модел за одређивање одзива вибрација, разматрајући утицај таласавости стаза котрљања.

Aktuuk [21] је истраживао утицај таласавости стаза котрљања лежаја на вибрације вратила. У ту сврху развио је динамички модел са три степена слободе за симулацију радијалних и аксијалних вибрација крутог вратила улежиштеног котрљајним лежајима.

Harsha и Kankar [22] развијају аналитички модел са два степена слободе за истраживање утицаја таласавости стаза котрљања на нелинеарни одзив вибрација кугличног лежаја. За дефинисање компоненти таласавости аутори су развили рачунарски програм, који таласавост приказује као синусоидну функцију.

• Расподела оптерећења на котрљајна тела и крутост котрљајних лежаја

У току рада котрљајних лежаја, услед дејства сила променљивог интензитета, правца и смера, у контакту котрљајних тела и стаза котрљања настају еластичне деформације. Због нелинеарне зависности између контактних деформација и контактних сила ове деформације утичу на појаву вибрација које нису чисто периодичне. Током рада лежаја мења се положај и број котрљајних тела у зони оптерећења, па према томе и правац и интензитет контактних сила којима котрљајна тела делују на стазе котрљања. Услед дејства ових сила на кавез, котрљајна тела се померају од идеалних положаја у кавезу, што такође има утицаја на целокупно динамичко понашање лежаја и склопа у који је уграђен [23]. Услед овога јавља се периодично променљива крутост лежаја, која се сматра једним од главних параметара за генерисање вибрација код котрљајних лежаја.

Како је познавање крутости и пригушења код лежаја од великог значаја за истраживање динамичког понашања котрљајног лежаја, велики број радова се бави овом проблематиком [24, 25, 26]. Закључак је да на крутост и пригушење код лежаја утичу: тип лежаја, аксијално и радијално оптерећење, радијални зазор, одступања од идеалне геометрије делова лежаја и у мањој мери брзина и врста мазива.

Guo и Parker [27] развијају модел за добијање вредности крутости за различите типове и параметре котрљајних лежаја. За решавање проблема механизма контакта између котрљајних тела и стаза котрљања коришћени су површински интеграл и МКЕ.

Митровић [28] истражује утицај расподеле оптерећења на радне карактеристике котрљајног лежаја: радијалну крутост, статичку носивост и радни век. Закључено је да крутост лежаја у стварности није константна величина, како то прописују стандарди DIN и ISO. Она зависи од карактера и интензитета спољашњег оптерећења, еластичних својстава материјала елемента лежаја, геометрије сперегнутих делова лежаја, укупног броја котрљајних тела у лежају, унутрашњег радијалног зазора, одступања облика радних површина лежаја и других фактора.

У оквиру истраживања карактеристика и понашања котрљајних лежаја, *Лазовић* [29] анализира утицај параметара унутрашње геометрије котрљајног лежаја на расподелу оптерећења на котрљајна тела. Разматран је утицај величине унутрашњег радијалног зазора код геометријски идеалног лежаја, карактера и величине одступања реалног облика стазе котрљања, као и положаја прстенова реалног лежаја у односу на правац деловања спољашњег оптерећења на расподелу оптерећења.

- **Оштећења на стазама котрљања котрљајних лежаја**

Проучавању утицаја различитих видова оштећења лежаја на радне карактеристике и динамичко понашање котрљајних лежаја у последње време је пружено много пажње. Оштећења проузрокују повећање унутрашњег радијалног зазора у лежају, што повећава ниво вибрација. Током рада лежаја, сваки пут када котрљајно тело пређе преко оштећеног места на стази котрљања формира се ударни импулс који изазива вибрације елемената лежаја које се даље преносе на целокупно постројење. Интензитет ових вибрација уско је повезан са димензијама оштећења, спољашњим оптерећењем, геометријом елемената лежаја и сл.

Да би се оштећења и откази лежаја свели на најмању могућу меру и тиме обезбедио неометан и континуиран рад целог постројења, мониторинг стања лежаја сматра се неопходним. Стално и квалитетно праћење стања опреме повећава сигурност и продуктивност, скраћује време застоја и осигурава континуиран рад у оптималним условима. Уштеде остварене на овај начин вишеструко су веће од трошкова мониторинга.

Иако су се проблематиком појаве оштећења на стазама котрљања лежаја истраживачи бавили и раније, развој рачунарске технике омогућио је да се број радова из ове области последњих година значајно увећа. Већи број радова односи се на развијање модела и њихову експерименталну верификацију.

Harris [7] наводи неке узроке појаве оштећења која се могу јавити у котрљајним лежајима: неадекватно подмазивање, нечистоће (прашина, влага и корозивна атмосфера), загревање лежаја, висока температура околине, лоша монтажа, преоптерећење, замор материјала.

Tandon и Choudhury [30] су развили аналитички модел за предвиђање вибрационог одзива проузрокованог локалним оштећењима у котрљајним лежајима. Неколико година касније, дали су преглед [31] метода вибрационе дијагностике за детекцију оштећења у котрљајним лежајима.

Sopanen и Mikola [32] предложили су динамички модел котрљајних лежаја са унутрашњим зазором и локализованим оштећењем. Овај модел узима у обзир еластохидродинамичко подмазивање и *Hertz-ову* теорију контактних деформација. Закључено је да оштећења на спољашњем прстену изазивају знатно веће амплитуде вибрација него оштећења на унутрашњем прстену. То је резултат веће контактне површине спољашњег прстена и котрљајног тела у току рада лежаја.

Утицајем оштећења на промену крутости и расподелу оптерећења баве се аутори *Petersen и др.* [33]. Они приказују модел за прорачун и анализу квазистатичке расподеле оптерећења и промене крутости радијално оптерећених дворедних котрљајних лежаја са оштећењима на стази котрљања различитих облика и димензија. Закључују да када једно од котрљајних тела пређе преко места оштећења, долази до промене расподеле оптерећења на котрљајна тела. Тада се повећава део оптерећења које носе котрљајна тела ван зоне оштећења. Анализа промене крутости лежаја показује да у случају када су котрљајна тела позиционирана на месту оштећења, крутост у правцу дејства оптерећења опада.

Исти аутори у раду [34] дају аналитичку формулацију за испитивање утицаја оштећења различитих величина на расподелу оптерећења и промену крутости. Оштећења су квадратног облика и лоцирана на спољашњем прстену у зони оптерећења. Лежај је оптерећен у аксијалном и радијалном правцу. Промена крутости је знатно већа код лежаја са оштећењем и рапидно расте на улазу и излазу котрљајног тела из зоне оштећења. Анализом промене крутости показано је да са порастом величине оштећења средња радијална крутост опада у правцима дејства спољашњег оптерећења, а расте у правцу у коме не постоји оптерећење.

Iliev и Lesev [35] баве се утврђивањем општих техника за симулацију одговарајућих оштећења, при чему се не моделира цео лежај. За потребе анализе користили су MKE у пакету ANSYS/Design Modeler software, који је погодан за добијање механичких

карактеристика оштећења различитих облика и величина. Добијене су вибрације за четири различите величине оштећења, а ширина добијеног вибрационог сигнала јасно показује разлику између оштећења различитих величина и може се усвојити као коефицијент утицаја величине оштећења на карактеристике вибрација. Резултати, добијени таквом анализом, могу се даље користити у дијагностиковању отказа лежаја.

На побољшању процеса дијагностиковања отказа котрљајних лежаја радио је и *Malhi A.M.* [36]. Он је у оквиру свог истраживања извршио анализу вибрација котрљајних тела која прелазе преко оштећења на спољашњем прстену котрљајног лежаја користећи MKE software ANSYS.

- **Модели динамичког понашања котрљајних лежаја**

У оквиру истраживања динамичког понашања лежаја, у својој докторској тези, *Wensing* [37] је развио тродимензионални модел динамичког понашања система ротор-котрљајни лежај. Ротор, кућиште и спољашњи прстен лежаја моделирани су применом MKE. Крутост и пригушење, при еластохидродинамичком подмазивању контактних површина између котрљајних тела и стаза котрљања, моделирани су поједностављеним осцилаторним моделом са пригушењем.

Nataraj и Harsha [38] разматрају математички модел нелинеарног контакта између кавеза и котрљајних тела, помоћу Hertz-ове теорије контакта. У свом раду [39] *Harsha* је дефинисао величину утицаја броја котрљајних тела која преносе оптерећење на динамичко понашање котрљајних лежаја и закључио да са повећањем броја котрљајних тела долази до повећања фреквенција осциловања.

Purohit [40] се бавио истраживањем утицаја предоптерећења и броја котрљајних тела на амплитуду и фреквенцију осциловања котрљајног лежаја. Закључио је да број котрљајних тела има пресудан утицај на фреквенцију осциловања лежаја и да је предоптерећење, такође важан параметар у динамичкој анализи котрљајног лежаја. Са повећањем броја котрљајних тела долази до повећања фреквенција осциловања лежаја.

Томовић [1] се бавио истраживањем динамичког понашања и стања радне исправности и радне способности котрљајних лежаја од којих у многоме зависи функционалност, поузданост и експлоатабилност целокупног машинског система у који је лежај уграђен. У својој докторској тези извео је нови модел за предвиђање динамичког понашања котрљајног лежаја. Основу новог модела чини једначина која описује трајекторију осциловања крутог ротора у котрљајном лежају. Према овој једначини фреквенција осциловања крутог ротора у идеалном котрљајном лежају са унутрашњим радијалним зазором је једнака пролазној учесталости котрљајног тела. Амплитуда ових осцилација директно је зависна од величине релативног померања прстенова лежаја услед унутрашњег радијалног зазора и контактних деформација услед спољашњег оптерећења, на додирним површинама котрљајних тела и прстенова лежаја.

Изнети преглед истраживања у подручју праћења понашања котрљајних лежаја у условима постојања грешака и оштећења, показује да су до сада урађена значајна истраживања на овом подручју. Међутим, ова истраживања обухватају неке претпоставке које указују на даљу потребу истраживања везаних за одређивање основних карактеристика лежаја и дефинисање њиховог утицаја на носивости и динамичко понашање котрљајних лежаја. Пре свега, ово се односи на коришћење *Hertz-ове* теорије контактних деформација која није универзално применљива на делове машинских склопова сложене геометрије, а коју и у новијим радовима срећемо као општеприхваћену тачну теорију. Прорачун контактних деформација и напона итеративним поступком у условима реалне геометрије и оптерећења једино је прихватљив принцип прорачуна у оквиру одређивања карактеристика котрљајних лежаја. Такође, у објављеним досадашњим истраживањима, не постоји квантитативна мера утицаја појединих радних карактеристика котрљајних лежаја на њихову

носивост и динамичку стабилност. Према томе, јавља се неопходност за развијањем аналитичких модела и алгоритама за одређивање утицаја одступања геометрије и оштећења делова лежаја на носивост и стабилност котрљајних лежаја.

Преглед референтне литературе:

- [1] Томовић, Р.: *Истраживање утицаја конструкционих параметара котрљајних лежајева на стање њихове радне исправности*, Докторска дисертација, Машински факултет, Ниш, 2009.
- [2] Nataraj, C, Harsha, S.P.: *The effect of bearing cage run-out on the nonlinear dynamics of a rotating shaft*, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. Vol. 13, ISSN: 1007-5704 Issue 4, 2008, pp. 822-838.
- [3] Villa. C. J., Sinou. J., Thouverez, F.: *Stability and vibration analysis of a complex flexible rotor bearing system*, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. Vol. 13, ISSN: 1007-5704. 2008. pp. 804-821.
- [4] Wang, L., Dezhi, Z., Gu, L: *Nonlinear Dynamics Behaviors of a Rotor Roller Bearing System with Radial Clearances and Waviness Considered*, Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 21, ISSN: 1000-9361, 2008, pp. 86-96.
- [5] Perret-Liaudet, J., Rigaud E.: *Experiments and numerical results on non-linear vibrations of an impacting Hertzian contact. Part 2: random excitation*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 265, 2003, pp. 309–327.
- [6] Rigaud E., Perret-Liaudet J.: *Experiments and numerical results on nonlinear vibrations of an impacting Hertzian contact. Part 1: harmonic excitation*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 265, 2003, pp. 289–307.
- [7] Harris, T.A., Kotzalas, M.N.: *Rolling Bearing Analysis*, Taylor&Francis Group, SAD, 2007.
- [8] Changqing, B., Qingyu, X.: *Dynamic model of ball bearings with internal clearance and waviness*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 294, 2006, pp. 23-48.
- [9] Harsha S. P., *Nonlinear dynamic response of a balanced rotor supported by rolling element bearings due to radial internal clearance effect*. Mechanism and Machine Theory, Vol. 41(6), 2006, pp. 688-706.
- [10] Gulafsson, O.G., Tallian, T., et al.: *Research report on study of the vibration characteristics of bearings*. Report: AL631023. Reg: 585 14:4223 SKF Ind., Inc., 1963.
- [11] Yamamoto, T.: *On the vibration of a shaft supported by bearing having radial clearance*. Transactions of the Japanese Society of Mechanical Engineering, Vol.21, 1955, pp. 182-192.
- [12] Tiwari, M., Gupta, K., Prakash, O.: *Effect of radial internal clearance of a ball bearing on the dynamics of a balanced horizontal rotor*, Journal of Sound and Vibration, Vol.238, 2000, pp. 723-756.
- [13] Tiwari, M., Gupta, K., Prakash, O.: *Dynamic response of an unbalanced rotor supported on ball bearings*, Journal of Sound and Vibration, Vol.238, 2000, pp. 757-779.
- [14] J.M. de Mul. J.M. Vree. D.A. Maas: *Equilibrium and associated load distribution in ball and roller bearings loaded in five degrees of freedom while neglecting friction—Part I: general theory and application to ball bearings*, ASME Journal of Tribology, Vol.111, 1989, pp. 142-148.
- [15] Villa. C. J., Sinou. J., Thouverez, F.: *Stability and vibration analysis of a complex flexible rotor bearing system*, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, Vol. 13, ISSN: 1007-5704, 2008, pp. 804-821.

- [16] Митровић Р., Лазовић Т., Ристивојевић М.: *Анализа унутрашњег радијалног зазора колрљајног лежаја у раду*, Зборник радова са Научно-истраживачког скупа "Истраживање и развој машинских елемената и система" ИРМЕС'98, Београд, 1998, стр. 265-270.
- [17] Wardle F.P., Poon S.Y.: *Rolling bearing noise, cause and cure*, Char. Mechanical Engineering, 1983, pp. 36-40.
- [18] Jang. G.H.. Jeong, S.W.: *Analysis of a ball bearing with waviness considering the centrifugal force and gyroscopic moment of the ball.*, ASME J. Tribol., 2003, Vol. 125, pp. 487-498.
- [19] Jang, G. H., Jeong, S.-W.: *Vibration analysis of a rotating system due to the effect of ball bearing waviness*, Journal of Sound and Vibration, ISSN: 0022-460X, 2004. Vol. 269, pp. 709-726.
- [20] Choudhury. A.. Tandon. N. A: *theoretical model to predict vibration response of rolling bearings to distributed defects under radial load*. ASME Journal of Vibration and Acoustics 120, 1998, pp. 214-220.
- [21] Aktfluk, N.: *The effect of waviness on vibrations associated with ball bearings*, ASME Journal of Trihology, Vol.121, 1999, pp. 667-676.
- [22] Harsha, S. P..Kankar. P.K.: *Stability analysis of a rotor bearing system due to surface waviness and number of balls*. International Journal of Mechanical Sciences, Vol.46, ISSN: 0020-7403, 2004. pp. 1057-1081.
- [23] Живковић, А., Зељковић М., Табаковић, С.: *Програмско решење за анализу понашања кугличних лежаја*, Техничко решење, Нови Сад, 2013.
- [24] Lim T.C. Singh R.: *Vibration transmission trough rolling element bearings, Part V: Effect of distributed contact load on roller bearing stijfness matrix*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 169(4), 1994, pp. 547-553.
- [25] Čermelj P., Boltežar M.: *An indirect approach to investigating the dynamics of a structure containing bali bearings*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 276 (1-2), 2004, pp. 401-417.
- [26] Fleming D.P., Poplavvski J.V.: *Transient Vibration Prediction for Rotors on Bali Bearings Usirjg Load-Dependent Nonlinear Bearing Stijfness*, International Journal of Rotating Machinery, Vol.. 10(6), 2004, pp. 489-494.
- [27] Guo Y., Parker R.: *Stijfness matrix calculation of rolling element bearings using a finite element/contact mechanics model*, Mechanism and Machine Theory, Vol. 51, Elsevier, 2012, pp. 32–45.
- [28] Митровић Р.: *Анализа утицаја еластичних деформација и унутрашњег радијалног зазора колрљајног кугличног лежаја на расподјелу оптерећења на котрљајна тијела и носивост*. Магистарска теза, Машински факултет у Београду, 1987.
- [29] Лазовић, Т.: *Истраживање абразивног хабања котрљајних лежаја*, Докторска теза, Машински факултет Универзитета у Београду, 2008.
- [30] N.Tandon,A.Choudhury: *A review of vibration and a cousticmeasurementmethods for the detection of defects in rolling element bearings*, Tribology International, Vol. 32, 1999, pp. 469–480.
- [31] Tandon N., Choudhury A.: *An Analytical Model For The Prediction Of The Vibration Response Of Rolling Element Bearings Due To A Localized Defect*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 205(3), 1997, pp. 275-292.
- [32] Sopanen J., Mikola A.: *Dynamic model of a deep-groove ball bearing including localized and distributed defects—part1: theory*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers K—Journal of Multi-body Dynamics, Vol. 217, 2003, pp. 201–211.

- [33] Petersen D., Howard C., Sawalhi N., Ahmadi A.M., Singh S.: Analysis of bearing stiffness variations, contact forces and vibrations in radially loaded double row rolling element bearings with raceway defects, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 50-51, Elsevier, 2015, pp. 139–160.
- [34] Petersenn D., Howard C., Prime Z.: Varying stiffness and load distributions in defective ball bearings: Analytical formulation and application to defect size estimation, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 337, Elsevier, 2015, pp. 284–300.
- [35] Iliev V.I., Lesev I. M.: *Analysis of vibrations caused by a defect in the outer ring of a ball bearing – influence of the defect's size*, University of chemical technology and Metallurgy.
- [36] Malhi A.C.: Finite element modeling of vibrations caused by a defect in the outer ring of a ball bearing, Project Report-Finite Element Method and Applications/MIE 605, 2002.
- [37] Wensing J. A.: *On the dynamics of ball bearings*, Ph. D. thesis, University of Twente, 1998
- [38] Nataraj, C., Harsha, S.P.: *The effect of bearing cage run-out on the nonlinear dynamics of a rotating shaft*, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 13, ISSN: 1007-5704 Issue 4, 2008, pp. 822-838.
- [39] Harsha, S. P.: *Nonlinear dynamic analysis of rolling element bearings due to cage run-out and number of balls*, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 289, ISSN: 0022-460X, 2006, pp. 360–381.
- [40] Purohit R., Purohit K.: *Dynamic analysis of ball bearings with effect of preload and number of balls*, *Int. J. of Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 11(1), 2006, pp. 77-91.

3. Полазне хипотезе

Полазећи од проблема, предмета, циљева и задатака истраживања, као и методолошког приступа истраживању, могуће је поставити хипотезу овог рада, као и неопходне помоћне хипотезе.

Основна хипотеза истраживања радних карактеристика и динамичког понашања котрљајног лежаја је да промена основних радних карактеристика и критично смањење носивости лежаја у односу на прорачунату носивост, које ће довести до брзе пропагације оштећења и отказа лежаја, зависе од различитих типова оштећења која се јављају на стазама котрљања током експлоатације.

Наведена хипотеза биће доказана постављањем следећих радних (допунских) хипотеза:

- Дефинисањем фактора утицаја оштећења котрљајног лежаја на основне радне карактеристике лежаја могуће је одредити критичну геометрију оштећења стаза котрљања, са аспекта смањења носивости лежаја испод прорачунате.
- Примена развијеног модела предвиђања отказа котрљајних лежаја значајно утиче на повећање радног века целокупног техничког система и оправдана је са економске тачке гледишта.
- Могуће је детаљном анализом различитих геометрија оштећења истражити утицајне параметре на вибрације котрљајних лежаја, чијим мерењем се може дијагностиковати стање котрљајних лежаја.

4. Научне методе истраживања

Тежиште истраживања је на анализи утицаја димензија и облика оштећења стаза котрљања на промену крутости и расподеле оптерећења у котрљајном лежају, а тиме и на носивост лежаја и машинског система у који је лежај уграђен.

Одређивање предмета и утврђивање циљева истраживања представљених главном и помоћним хипотезама условљавају коришћење следећих научно-истраживачких метода и техника истраживања:

- *метода прегледа*, којом ће се омогућити систематизација постојећих сазнања о проблему истраживања из постојеће литературе (резултати, практична, научна, техничка и друга достигнућа),
- *аналитичка метода*, која се користи за извођење израза за добијање зависности оштећења стаза котрљања лежаја која се на њима јављају током експлоатације и основних радних карактеристика лежаја,
- *нумеричка анализа применом Методе коначних елемената*, која се користи за прорачун деформација и напонског стања делова лежаја, и то: идеално тачних геометријских карактеристика и оних са оштећењима на стазама котрљања,
- *експериментална метода*, која се користи за практично испитивање утицаја различитих димензија и облика оштећења стаза котрљања на вибрације лежаја,
- *компаративна метода*, којом ће се омогућити поређење резултата добијених применом нумеричких метода за решавање напонског и деформационог стања делова лежаја и за решавање диференцијалних једначина динамичког понашања лежаја са резултатима добијеним у лабораторијским условима.

5. Очекивани научни допринос

Проблематика предвиђања динамичког понашања лежаја у експлоатацији у фази пројектовања још увек представља подручје интересовања великог броја истраживача, иако је примена савремених метода и опреме у последњој деценији довела до значајних резултата у овој области истраживања. У овом домену, један од планираних доприноса дисертације је свеобухватна теоријска анализа у циљу идентификације утицајних величина на радне карактеристике и динамичко понашање котрљајних лежаја. Изабране величине биће праћене у току истраживања обухваћеним дисертацијом.

Као један од основних очекиваних резултата овог истраживања добиће се експериментално верификован аналитички модел и процедура (алгоритам) за анализу носивости и динамичког понашања котрљајног лежаја. Овај алгоритам обухватаће примену различитих нумеричких метода.

За прорачун деформационог и напонског стања елемената лежаја биће коришћена Метода коначних елемената (МКЕ). Развијени нелинеарни контактни модели у МКЕ обухватаће истовремено симулирање вишеструког контакта елемената лежаја. Посебан допринос односиће се на избор претпоставки и упрошћења у току развијања нумеричких МКЕ модела, на избор начина симулирања спољашњих оптерећења и ограничења померања, као и на избор параметара контактних услова у МКЕ. У циљу анализе утицаја геометрије заморних оштећења на носивост и вибрације котрљајних лежаја, симулираће се на развијеним моделима оштећења различитих облика и димензија. Избор геометрије симулираних оштећења базираће се на свеобухватној анализи доступних података у литератури и искуствима из праксе.

Изузетан и оригиналан научни допринос који се очекује је дефинисање и увођење нових фактора утицаја облика и димензија заморних оштећења стаза котрљања на основне разматране радне карактеристике котрљајних лежаја. Ови фактори представљаће квантитативну меру утицаја унапред дефинисаних параметара оштећења на поједине радне карактеристике лежаја. Такође, даће меру корелације између промене нивоа вибрација, као параметра понашања лежаја који је најједноставније континуирано пратити, и радних карактеристика меродавних за праћење губитка радне способности лежаја (пре свега: расподеле оптерећења, величина контактних напона и деформација и носивости)

Методологија истраживања која ће бити спроведена у овој дисертацији биће корисна за будућа истраживања котрљајних лежаја. Такође, може бити од посебног значаја за истраживаче и стручњаке који ће за сопствене, односно за потребе својих предузећа, развијати сличне моделе испитивања у процесу експлоатације одређене машине. У том смислу, дефинисање новог фактора утицаја оштећења котрљајног лежаја је од велике користи у практичним апликацијама.

Предложени резултати истраживања у оквиру дисертације моћи ће да се користе и за даљи развој математичких модела корелација између различитих облика и димензија оштећења стаза котрљања лежаја и њихових радних карактеристика.

На основу предложених истраживања може се вршити и прецизније предвиђање очекиваног радног века котрљајних лежаја – што је од изузетне важности у самом процесу конструисања.

Конечно, резултати предложене докторске дисертације се могу искористити и за унапређење постојећих метода за мониторинг стања котрљајних лежаја – вибрациону дијагностику, дефинисањем нових референтних вредности вибрација са којима би се у будућности поредиле вредности измерене у експлоатационим условима.

6. План истраживања и структура рада

Решавање предметне проблематике дисертације реализоваће се теоријским и експерименталним истраживањима кроз следеће фазе:

1. Прикупљање, анализа и синтеза доступних знања из предметне области;
2. Осмишљавање и спровођење одговарајућих експерименталних истраживања и статистичка анализа резултата експерименталних истраживања
3. Развој нових нумеричких и математичких модела динамичког понашања лежаја;
4. Верификација експерименталних резултата и нумеричких модела;
5. Дефинисање нових математичких модела за одређивање утицаја геометрије оштећења на радне параметре котрљајних лежаја.

У оквиру прве фазе истраживања извршиће се прикупљање, анализа и систематизација релевантних информација о котрљајним лежајима.

Наведено је већ делимично реализовано на основу:

- богатог научног и стручног искуства чланова Катедре за опште машинске конструкције Машинског факултета Универзитета у Београду, као и искуства истраживача ангажованих на реализацији пројекту ТР 35029;
- доступних прегледних и оригиналних истраживачких радова, монографија, докторских дисертација, магистарских теза, уџбеничке литературе;
- релевантних података водећих светских компанија за производњу котрљајних лежаја, представљених на интернет презентацијама, у фабричким публикацијама и каталозима;
- извештаја техничких комитета и садржаја домаћих и међународних стандарда.

Реализација друге фазе, односно извођење експерименталних истраживања може се поделити на припрему експеримента и сам експеримент.

У оквиру припреме експеримента неопходно је дефинисати радне услове у којима котрљајни лежаји најчешће функционишу. Припрема експеримента подразумева организацију у времену и простору испитивања динамичког понашања котрљајних лежаја на одговарајућем уређају у лабораторијски условима, припрему уређаја, набавку и припрему одговарајућег броја узорака лежаја за испитивање, организацију одговарајућих мерења, припрему потребних мерних инструмената.

За експериментална истраживања у оквиру дисертације предвиђена је употреба одговарајућег,

наменски развијеног пробног стола уз коришћење преносног уређаја за мерење вибрација (вибрациону дијагностику). Циљ експеримента је да се сниме вибрације прстенова котрљајних лежаја, са вештачки унетим оштећењима на стази котрљања спољашњег прстена лежаја.

По завршетку експерименталне фазе истраживања, врши се статистичка обрада добијених резултата (у оквиру друге фазе истраживања). Резултати обављених мерења се упоређују са резултатима мерења извршених пре пуштања лежаја у рад.

У трећој фази истраживања врши се развијање нумеричког модела за анализу динамичког понашања котрљајног лежаја. За моделирање геометрије и радних услова код изабраног типа котрљајних лежаја изабран је софтерски пакет ANSYS и Penalty метода решавања контакта. Модел развијени у равни користе се за избор оптималних параметара за конвергенцију нелинеарног прорачуна вишеструког контакта. Очекивани исход је нови математички модел који повезује радне карактеристике испитиваних котрљајних лежаја и оштећења стаза котрљања лежаја различитих облика и димензија.

У оквиру четврте фазе истраживања, резултати добијени применом нумеричких метода за решавање напонског и деформационог стања делова лежаја и за решавање диференцијалних једначина динамичког понашања лежаја верификују се на основу сопствених мерења остварених на експерименталној инсталацији за испитивање динамичког понашања котрљајних лежаја и резултата експерименталних испитивања наведених у доступној стручној литератури. Добијени резултати расподеле спољашњег оптерећења на котрљајна тела и деформације контактних зона користиће се за одређивање улазних параметара у аналитичком прорачуну динамичког понашања котрљајног лежаја.

У последњој петој фази истраживања дефинишу се нови математички модели за одређивање утицаја геометрије оштећења на радне параметре котрљајних лежаја. На основу ових математичких модела изводе се изрази зависности динамичког понашања лежаја од облика и димензија оштећења и имплементација развијеног математичког модела у постојеће аналитичке изразе за прорачун испитиваних радних карактеристика котрљајних лежаја. Анализа добијених резултата и постављање универзалне методологије истраживања динамичког понашања котрљајних лежаја, омогућила би у даљим истраживањима варирање и осталих фактора утицаја.

На основу описаног плана истраживања, општа структура предложене дисертације се састоји из следећих целина:

1. Уводни део (теоријске основе, идентификација подручја истраживања, преглед досадашњих истраживања из предметне области),
2. Идентификација и теоријска анализа основних утицајних величина на радне карактеристике котрљајних лежаја
3. Развој аналитичког модела динамичког понашања лежаја са и без оштећења,
4. Развој нумеричких модела МКЕ за прорачун деформационог и напонског стања елемената котрљајног лежаја
5. Опис експеримента (уређај за испитивање, узорак, поступак испитивања, методе мерења, аквизиција података), приказ и анализа експерименталних резултата, као и њихово упоређивање са теоријским подацима и зависностима, дискусија изведених закључака,
6. Верификација нумеричког и аналитичког модела
7. Анализа утицаја оштећења котрљајних стаза на радне карактеристике и динамичко понашање котрљајних лежаја и дефинисање математичких модела зависности,
8. Закључци и препоруке (теоријски и практични значај добијених резултата, могућности њихове примене, нови проблеми и правци даљих истраживања),
9. Литература, Прилог и Биографија аутора.

7. Закључак и предлог

Анализом података из пријаве кандидата **Наташе Д. Солдат**, дипл.инж.маш., Комисија закључује да је предложена тема докторске дисертације актуелна и подобна, као и да кандидат испуњава све предвиђене услове за рад на предложеној теми.

Имајући у виду претходно наведено Комисија предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Београду да кандидату

Наташи Д. Солдат, дипл.инж.маш.

одобри израду докторске дисертације под називом

**„УТИЦАЈ ОШТЕЋЕЊА СТАЗА КОТРЉАЊА НА РАДНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ
КУГЛИЧНИХ КОТРЉАЈНИХ ЛЕЖАЈА“**

у научној области Опште машинске конструкције, за коју је Машински факултет Универзитета у Београду матичан.

За ментора докторске дисертације, предлаже се Проф. др Радивоје Митровић, редовни професор Катедре за опште машинске конструкције Машинског факултета Универзитета у Београду, а за коментора др Ивана Атанасовска, виши научни сарадник Иновационог центра Машинског факултета Универзитета у Београду.

У Београду, 24.04.2015. год.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

Проф. др Радивоје Митровић
Машински факултет Универзитета у Београду

др Ивана Атанасовска, виши научни сарадник
Иновациони центар Машинског факултета
Универзитета у Београду

Проф. др Божидар Росић
Машински факултет Универзитета у Београду

Ванр. проф. др Татјана Лазовић
Машински факултет Универзитета у Београду

Доц. др Радослав Томовић
Машински факултет Универзитета Црне Горе

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ

за кандидата Наташа Солдат

Име и презиме ментора: Радивоје Митровић

Звање: Редовни професор

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. Lazović T., Mitrović R., Ristivojević M.: „Influence of internal radial clearance on the ball bearing service life”, Journal of the Balkan Tribological Association, Scientific Bulgarian Communications, ISSN 1310-4772, Vol. 16, No. 1, pp 1-8, SCI-M23, IF: 0,158, Sofia, Bulgaria, 2010.
2. Momčilović D., Odanović Z., Mitrović R., Atanasovska I., Vuherer T.: „Failure analysis of hydraulic turbine shaft“, Engineering Failure Analysis, Elsevier - Pergamon, ISSN 1350-6307, Vol. 20, pp 54-66, SCI-M21, IF: 1,130, Oxford, United Kingdom, 2012.
3. Tasić M., Mitrović R., Popović P., Tasić M.M.: „Influence of running conditions on resonant oscillations in fresh-air ventilator blades used in thermal power plants“, Thermal Science, Institut za nuklearne nauke “Vinča”, ISSN 0354-9836, UDC 621, DOI: 10.2298/TSCI0901139T, COBISS.SR-ID 516845973, Vol. 13, No. 1, pp 139-146, SCI-M23, IF: 0,706, Belgrade, Serbia, 2009.
4. Atanasovska I., Mitrović R., Momčilović D., Subić A.: „Analysis of the nominal load effects on gear load capacity using the finite element method”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Professional Engineering Publishing Ltd., ISSN 0954-4062, DOI: 10.1243/09544062 JMES2508, Vol. 224, No. 11, pp 2539-2548, SCI-M23, IF: 0,473, Suffolk, United Kingdom, 2010.
5. Popović P., Ivanović G., Mitrović R., Subić A.: „Design for reliability of a vehicle transmission system“, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Professional Engineering Publishing Ltd., ISSN 0954-4070, Vol. 226, No. D2, pp 194-209, SCI-M23, IF: 0,645, Suffolk, United Kingdom, 2012.
6. Miltenović A., Nikolić V., Mitrović R.: „Efficiency of crossed helical gears with wheels made of sintered steel Fe1.5Cr0.2Mo by applying the sinter-hardening treatment“, Transactions of Famena, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb, ISSN 1333-1124, Vol. 36, No. 2, pp 31-40, SCI-M23, IF: 0,233, Zagreb, Croatia, 2012.

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 28.04.2015.

М.П.

ПОДАЦИ О КОМЕНТОРУ

за кандидата Наташа Солдат

Име и презиме коментора: Ивана Атанасовска

Звање: Виши научни сарадник

Списак радова који квалификују коментора за вођење докторске дисертације:

1. Atanasovska I.: „The mathematical phenomenological mapping in nonlinear dynamics of spur gear pair and radial ball bearing due to the variable stiffness”, International Journal of Non-linear Mechanics, Elements of mathematical phenomenology and phenomenological mapping in non-linear dynamics, Edited by Katica R. (Stevanovic) Hedrih, Ivan Kosenko, Pavel Krasilnikov and Pol D. Spanos, ISSN 0020-7462, DOI:10.1016/j.ijnonlinmec.2014.11.015, Published by Elsevier, Vol. 73, pp 114-120, SCI-M22, IF: 1.463, 2015.
2. Momčilović D., Odanović Z., Mitrović R., Atanasovska I., Vuherer T.: „Failure analysis of hydraulic turbine shaft“, Engineering Failure Analysis, Elsevier - Pergamon, ISSN 1350-6307, DOI:10.1016/j.engfailanal.2011.10.006 Vol. 20, pp 54-66, SCI-M21, IF: 1,130, Oxford, United Kingdom, 2012.
3. Burzić M., Prokić-Cvetković R., Grujić B., Atanasovska I., Adamović Ž. : „Safe operation of welded structure with cracks at elevated temperature“, Journal of Mechanical Engineering, published by University of Ljubljana, Slovenia, ISSN 0039-2480, UDC 62-112.81:624.014, Vol. 54, No. 11, pp 807-816, SCI-M23, IF: 0.235, 2008.
4. Atanasovska I., Mitrović R., Momčilović D., Subić A.: „Analysis of the nominal load effects on gear load capacity using the finite element method”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Professional Engineering Publishing Ltd., ISSN 0954-4062, DOI: 10.1243/09544062 JMES2508, Vol. 224, No. 11, pp 2539-2548, SCI-M23, IF: 0,473, Suffolk, United Kingdom, 2010. 0.451
5. Bošnjak S., Petković Z., Atanasovska I., Milojević G., Mihajlović V.: „BUCKET CHAIN EXCAVATOR: FAILURE ANALYSIS AND REDESIGN OF THE COUNTERWEIGHT BOOM SUPPORTING TRUSS COLUMNS“, Engineering Failure Analysis, Published by Elsevier, ISSN 1350-6307 , DOI:10.1016/j.engfailanal. 2013.04.012, Vol. 32, pp 322-333, SCI-M21, IF: 1.086, 2013.
6. Patil S., Atanasovska I., Karuppanan S.: „Contact stress evaluation of involute gear pairs, including the effects of friction and helix angle“, Journal of Tribology. Transactions of the ASME/American Society of Mechanical Engineers, Published by ASME (Accepted manuscript), ISSN 0742-4787, DOI: 10.1115/1.4030242, SCI-M22, IF: 0.897, 2015.

7. Patil S.S., Karuppanan S., Atanasovska I., Wahab A.A.: „Contact stress analysis of helical gear pairs, including frictional coefficients“, International Journal of Mechanical Sciences, Published by Elsevier, ISSN 0020-7403, DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2014.05.013, Vol. 85, pp 205-211, SCI-M21, IF: 2.061, 2014.
8. Mitrović R., Momčilović D., Erić O., Atanasovska I., Hut N.: „Study on impact properties of creep-resistant steel simulated heat affected zone“, Thermal Science, Published by Vinča Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, ISSN 0354-9836, UDC 621, DOI: 10.2298/TSCI111006142M, Vol. 16, No.2, pp 513-525, SCI-M22, IF: 0.962, 2012.

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 коментор 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 28.04.2015.

М.П.
