

Факултет МАШИНСКИ

432/4  
(Број захтева)

02.04.2015.  
(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 КОНЦЕНТРАЦИЈЕ ЕКСПЛОАТАЦИОНИХ ЧЕСТИЦА НЕЧИСТОЋА НА РАДНЕ  
КАРАКТЕРИСТИКЕ КОТРЉАЈНИХ ЛЕЖАЈА**

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ Опште машинске конструкције

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

1. Име, име једног родитеља и презиме кандидата: ЖАРКА (ЗОРАН) МИШКОВИЋА

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

3. Година дипломирања: 2008.

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: 2008.

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

на седници одржаној 02.04.2015  
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: 432/4  
Датум: 02.04.2015. године  
Београд, Краљице Марије 16

На захтев **Жарка Мишковића, дипл.инж.маш.**, бр. 343/1 од 02.03.2015. године, извештаја Комисије у саставу: проф.др Радивоје Митровић, ментор, проф.др Милета Ристивојевић, проф.др Татјана Лазовић, доц.др Зоран Стаменић и проф.др Синиша Кузмановић, Универзитет у Новом Саду, ФТН, број 432/3 од 30.03.2015. 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 02.04.2015. године, донело је следећу

### ОДЛУКУ

Прихвата се предлог о испуњености услова и о научној заснованости теме докторске дисертације **«УТИЦАЈ КОНЦЕНТРАЦИЈЕ ЕКСПЛОАТАЦИОНИХ ЧЕСТИЦА НЕЧИСТОЋА НА РАДНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ КОТРЉАЈНИХ ЛЕЖАЈА»** докторанта **ЖАРКА МИШКОВИЋА, дипл.инж.маш..**

За ментора докторанту Жарку Мишковићу, именује се **проф.др Радивоје Митровић.**

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

ДЕКАН  
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић

## ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

**Предмет:** Подобност теме и кандидата Жарка З. Мишковића, дипл.инж.маш., за израду докторске дисертације

Одлуком бр. 432/2 од 19.3.2015. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата **Жарка Мишковића, дипл.инж.маш.,** за израду докторске дисертације и научне заснованости теме **Утицај концентрације експлоатационих честица нечистоћа на радне карактеристике котрљајних лежаја.**

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

## РЕФЕРАТ

### 1. Подаци о кандидату

#### 1.1. Биографски подаци

Кандидат, Жарко З. Мишковић, дипл.инж.маш., је рођен 20.10.1980. године у Загребу (Хрватска). Основну школу, као и гимназију, је завршио у Београду (општина Нови Београд). Дипломирао је на Универзитету у Београду – Машинском факултету, 2008. године, са просечном оценом 8,62. Докторске студије је уписао у фебруару 2009. године, након чега се запослио као истраживач-приправник Иновационог центра Машинског факултета у Београду. Од 09.07.2010. године је запослен са пуним радним временом, на радном месту Асистента на Катедри за опште машинске конструкције Машинског факултета Универзитета у Београду.

Учешћем у акредитацији и одржавању акредитације лабораторије ЛИМЕС (Лабораторија за Испитивање Машинских Елемената и Система) Иновационог центра Машинског факултета Универзитета у Београду, кандидат је стекао значајна искуства у лабораторијским испитивањима котрљајних лежаја и техничкој регулативи и процедурама у предметној области. Од новембра 2012. године, кандидат обавља функцију Заменика Руководиоца квалитета наведене Лабораторије.

Кандидат поседује четворогодишње искуство у раду на сервохидрауличној машини за динамичко и статичко испитивање материјала, за коју је похађао и плаћени курс. Такође је успешно завршио и плаћени курс 'Технички захтеви обезбеђења квалитета у лабораторијама', у организацији ADQM (Машински факултет Универзитета у Београду, април 2010. године), као и курс 'Имплементација техничких захтева стандарда SRPS ISO/IEC 17025:2006 у лабораторијској пракси', у организацији Савеза хемијских инжењера Србије (Технолошко –

металуршки факултет Универзитета у Београду, октобар 2012. године) – за које поседује и одговарајуће сертификате.

Од 2009. године кандидат активно учествује у извођењу наставе на Машинском факултету Универзитета у Београду, кроз држање вежби из предмета Машински елементи 1, Машински елементи 2, Основе конструисања, Конструисање М и Технички прописи и стандарди. Тиме је стекао завидан ниво практичног педагошког искуства, значајног за даљи развој каријере. Кандидатов педагошки рад је до сада увек вреднован од стране студената оценом >4,60.

У досадашњем раду кандидат је успешно овладао специфичним софтверима за 3D моделирање и симулацију Методом коначних елемената (Autodesk Inventor), управљање пројектима (MS Project 2012), као и статистичку анализу података (DataFit 8.x). Сем наведеним, већ дужи низ година се успешно користи и стандардним апликацијама из софтверског пакета MS Office (Word, Access, Excel).

Кандидат течно говори, чита и пише на енглеском језику, а успешно се служи и руским језиком.

Од 2010. године, кандидат је члан стручног удружења АДЕКО – Асоцијације за Дизајн, Елементе и КОНструкције.

## 1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Током докторских студија на Машинском факултету у Београду, Жарко З. Мишковић је положио 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 10,00. Школске 2008/2009 године кандидату је одобрено мировање. Пошто је текућа школска година (2014/2015) шеста активна година докторских студија кандидата, његов 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 Вукман Човић        |                       | 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 Радивоје Митровић   |                       |         | 5         |        | 10 (десет)   |

|    |                                              |                            |    |    |    |    |            |
|----|----------------------------------------------|----------------------------|----|----|----|----|------------|
| 9  | Клизни и котрљајних парови                   | Проф. др Радивоје Митровић |    |    | 5  |    | 10 (десет) |
| 10 | Истраживање и публиковање 1 (Лабораторија 1) | Проф. др Радивоје Митровић | 10 |    |    |    | 10 (десет) |
| 11 | Истраживање и публиковање 2 (Лабораторија 2) | Проф. др Радивоје Митровић |    | 15 |    |    | 10 (десет) |
| 12 | Истраживање и публиковање 3 (Лабораторија 3) | Проф. др Радивоје Митровић |    |    | 20 |    | 10 (десет) |
| 13 | Истраживање и публиковање 4 (Лабораторија 4) | Проф. др Радивоје Митровић |    |    |    | 25 | 10 (десет) |

#### Списак публикованих радова и пројеката кандидата у периоду од 2009. до 2015. год.

##### Радови у научним часописима међународног значаја

1. Miltenović Đ., Tica M., Miltenović A., Banić M., Živković S., Mišković Ž.: *Pitting of Teeth Flanks of Crossed Helical Gears Made From Sintered Steel*, Transactions of FAMENA, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture – University of Zagreb, ISSN: 1333-1124, eISSN: 1849-1391, IF: 0.233 (M23), Zagreb, Croatia, 2014, pp. 77-88
2. Mitrović N., Milošević M., Momčilović N., Petrović A., Mišković Ž., Sedmak A., Popović P.: *Local Strain and Stress Analysis of Globe Valve Housing Subjected to External Axial Loading*, Key Engineering Materials, Trans Tech Publications, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.586.214, Vol. 586, ISSN 1662-9795, Zurich-Durnten, Switzerland, 2013, pp. 214-217
3. Mitrović R., Tasić M., Mišković Ž., Stamenić Z., Jovanović D.: *Data Acquisition and Automatisatation of a Conveyor Idler Test Stand*, Advanced Materials Research, Trans Tech Publications, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.633.277, Vol. 633, ISBN 1022-6680/978-3-03785-585-0, Zurich-Durnten, Switzerland, 2013, pp. 277-289
4. Tanasković J., Mišković Ž., Lučanin V., Mitrović R.: *Experimental Investigation of Characteristics of Passive Safety Elements*, Advanced Materials Research, Trans Tech Publications, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.633.277, Vol. 633, ISBN 1022-6680/978-3-03785-585-0, Zurich-Durnten, Switzerland, 2013, pp. 277-289, M24=3

##### Радови саопштени на међународним скуповима

1. Mišković Ž., Stamenić Z., Terzović J., Mitrović R.: *Mechanical Testing of Metal Building Construction in Earthquake Conditions*, 2nd International Scientific Conference COMETA 2014, University of East Sarajevo – Faculty of Mechanical Engineering, Proceedings, ISBN 978-99976-623-1-6, East Sarajevo – Jahorina, Bosnia and Herzegovina, 2014, pp. 491-496
2. Mitrović R., Mišković Ž., Ivanović G., Tasić M., Stamenić Z.: *Development of Experimental Methodology for Conveyor Idler's Sealing Group Testing*, 2nd International Scientific Conference COMETA 2014, University of East Sarajevo – Faculty of Mechanical Engineering, Proceedings, ISBN 978-99976-623-1-6, East Sarajevo – Jahorina, Bosnia and Herzegovina, 2014, pp. 497-504
3. Mitrović R., Mišković Ž., Stamenić Z.: *Review of Machine Elements and Systems Testing Capacities of Faculty of Mechanical Engineering at University of Belgrade*, 2nd International Scientific Conference COMETA 2014, University of East Sarajevo – Faculty of Mechanical Engineering, Proceedings, , ISBN 978-99976-623-1-6, East Sarajevo – Jahorina, Bosnia and Herzegovina, 2014, pp. 681-688

4. Mišković Ž., Mitrović R.: *Analysis of Current State of Higher Education in the Field of Technical Education and Machine Design at University of Belgrade – Faculty of Mechanical Engineering*, 2nd International Scientific Conference COMETA 2014, University of East Sarajevo – Faculty of Mechanical Engineering, Proceedings, ISBN 978-99976-623-1-6, East Sarajevo – Jahorina, Bosnia and Herzegovina, 2014, pp. 689-696
5. Mitrović R., Mišković Ž., Tasić M., Stamenić Z.: *Conveyor Idler's Turning Resistance Testing Methodology*, 8th International Symposium Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering – KOD 2014, Association for Design, Elements and Constructions – ADEKO, Proceedings, ISBN 978-86-7892-615-0, Balatonfüred, Hungary, 2014, pp. 139-144
6. Atanasovska I., Mitrović R., Stefanović S., Soldat N., Mišković Ž.: *Calculation of Radial Stiffness for Single-row Ball Bearing with Finite Element Analysis*, 8th International Symposium Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering – KOD 2014, Association for Design, Elements and Constructions – ADEKO, Proceedings, ISBN 978-86-7892-615-0, Balatonfüred, Hungary, 2014, pp. 201-206
7. Tanasković J., Milković D., Lučanin V., Mišković Ž.: *Experimental Research of Characteristics of Improved Type of Combined Tube Energy Absorber*, XVI Scientific-expert conference on railways RAILCON 2014, University of Nis – Faculty of Mechanical Engineering, Proceedings, ISBN 978-86-6055-060-8, Niš, 2014, pp. 01-04
8. Mitrović R., Soldat N., Mišković Ž., Matić N.: *Some Experiences In Laboratory Testing Of Bearings Of Transport Idlers On Belt Conveyor*, 11th Anniversary International Conference on Accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology, DEMI 2013, University of Banja Luka - Faculty of Mechanical Engineering, Proceedings, ISBN 978-99938-39-45-3, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, 2013.
9. Mitrović R., Mišković Ž., Tasić M., Stamenić Z., Soldat N., Matić N.: *Conveyor Idlers Testing Machine*, The 29th Danubia-Adria-Symposium on Advances of Experimental Mechanics, Serbian Society of Mechanics, University of Belgrade Faculty of Mechanical Engineering, Proceedings, ISBN 978-86-7083-762-1, Belgrade, 2012, pp. 278-281
10. Čolić K., Mišković Ž., Regodić M., Veg A., Sedmak A.: *Experimental Analysis of Artificial Hip Implant Made of Titanium Alloy*, The 29th Danubia-Adria-Symposium on Advances of Experimental Mechanics, Serbian Society of Mechanics, University of Belgrade Faculty of Mechanical Engineering, Proceedings, ISBN 978-86-7083-762-1, Belgrade, Serbia, 2012, pp. 162-165
11. Mitrović R., Stamenić Z., Mišković Ž., Tasić M.: *Laboratory Installation for Belt Conveyors Idlers Testing on Servohydraulic Testing Machine ZWICK HB-250*, The 7th International Scientific Conference - Research and Development of Mechanical Elements and Systems - IRMES 2011, Mechanical Engineering Faculty, University of Nis, Proceedings, ISBN 978-86-6055-012-7, Zlatibor, Serbia, 2011, pp. 371-376
12. Mitrović R., Stamenić Z., Mišković Ž., Tasić M., Jovanović D.: *Installation for carrier roller idlers of belt conveyors testing on the open pit mining*, The 7th International Scientific Conference - Research and Development of Mechanical Elements and Systems - IRMES 2011, Mechanical Engineering Faculty, University of Nis, Proceedings, ISBN 978-86-6055-012-7, Zlatibor, Serbia, 2011, pp. 383-388
13. Mitrović R., Mišković Ž., Maksimović V., Jovanović D., Ivanović G., Stamenić Z., Tasić M.: *Analysis and Characterization of Coal Mine Conveyor Idlers Contamination Particles*, Sixteenth Annual Conference YUCOMAT 2014., Materials Research Society of Serbia, Book of abstracts, Herceg Novi, Montenegro, 2014, pp. 96
14. Šarac D., Mitrović N., Tanasić I., Milošević M., Tihaček-Šojić Lj., Mišković Ž., Popović P.: *Experimental Analysis of PMMA Block Surface During Axial Loading of Inserted Straight and Angled Dental Implants Using Digital Image Correlation Method*, Sixteenth Annual Conference YUCOMAT 2014., Materials Research Society of Serbia, Book of abstracts, Herceg Novi, Montenegro, 2014, pp. 110

#### Радови у часописима националног значаја

1. 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 (2014), No. 3, ISSN 1821-1259, Novi Sad, Serbia, 2014, pp. 85-90
2. Mitrović R., Mišković Ž., Tasić M., Stamenić Z.: *Conveyor Idler's Turning Resistance Testing Methodology*, Machine Design, University of Novi Sad – Faculty of Technical Sciences, Vol. 6 (2014), No. 4, ISSN 1821-1259, Novi Sad, Serbia, 2014, pp. 107-112

#### Радови саопштени на скуповима националног значаја

1. Јовановић Д., Митровић Р., Ивановић Г., Мишковић Ж., Стаменић З.: *Унапређење пословања ПД Термоелектране и Копови Костолац сарадњом са Универзитетом у Београду*, XXI скуп међународног значаја Технологија, Култура, Развој – ТКР 2014, Удружење "Технологија и друштво", Zbornik radova, ISBN 978-86-915151-3-3, Тиват, Црна Гора, 2014, pp. 49-67
2. Mitrović N., Milošević M., Momčilović N., Maneski T., Mišković Ž.: *Experimental Strain And Displacement Analysis Of Globe Valve Housing Subjected To External Axial Loading*, PROCESING '12 – 25th International conference, Proceedings on CD, Belgrade, Serbia, 2012.

#### Техничка и развојна решења

1. Митровић Р., Тасић М., Ивановић Г., Мишковић Ж., Стаменић З.: *Пробни сто за испитивање радијално оптерећених транспортних ваљака*, ПД "Термоелектране и копови Костолац" д.о.о., Техничко решење - индустријски прототип, Одлука већа Машинског факултета Универзитета у Београду, Костолац, Србија, 2010.
2. Митровић Р., Тасић М., Ивановић Г., Мишковић Ж., Стаменић З.: *Пробни сто за испитивање ефикасности заптивне групе транспортних ваљака*, ПД "Термоелектране и копови Костолац" д.о.о., Техничко решење - индустријски прототип, Одлука већа Машинског факултета Универзитета у Београду, Костолац, Србија, 2010.
3. Митровић Ч., Воротовић Г., Петровић Н., Благојевић И., Стаменић З., Мишковић Ж., Каран С.: *Пробни сто за испитивање момента отпора транспортних ваљака*, ANSAL STEEL D.O.O., Техничко решење - Нови технолошки поступак, Одлука већа Машинског факултета Универзитета у Београду, Београд, Србија, 2014.
4. Митровић Н., Петровић А., Милошевић М., Манески Т., Поповић П., Мишковић Ж.: *Експериментално постројење и методологија ЗД оптичког мерења померања и деформација геометријски комплексних структура оптерећених спољашњим силама*, Техничко решење – битно побољшани производ или технологија, Одлука већа Машинског факултета Универзитета у Београду, Београд, Србија, 2013.

#### Изведени патенти

Мишковић Ж., Митровић Р., Тасић М., Стаменић З.: *Инсталација за испитивање транспортних ваљака*, Реализован патент (израђен и верификован функционалан прототип), Број патента: 1422, Завод за интелектуалну својину Републике Србије, Београд, Србија, 2014.

#### Национални пројекти технолошког развоја

1. TP14033 – *Истраживање метода и приступа повећању радног века и поузданости машинских система*, Руководилац: проф. др Радивоје Митровић, Министарство науке Републике Србије, 2008-2011.
2. 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, 2011-2016.

3. TP35030 – *Развој, пројектовање и имплементација савремених стратегија интегрисаног управљања оперативним радом и одржавањем возила и механизације у системима аутотранспорта, рударства и енергетике*, Руководилац: проф. др Градимир Ивановић, Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, 2011-2016.

#### Међународни пројекти

1. Tempus Project No. 530577-TEMPUS-RS-TEMPUS-JPCR – *Improvement of product development studies in Serbia and Bosnia and Herzegovina*, функција кандидата: контакт особа, Европска Комисија, 2012-2015.

#### 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 опште машинских конструкција – којој припада предложена тема докторске дисертације.

Досадашњи радови кандидата, објављени у часописима и публикацијама са међународних и домаћих конференција, као и реализовани пројекти (укључујући и један патент), 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 – објекат истраживања предложене дисертације, припадају групи машинских елемената са функцијом да пренесу оптерећења са покретних на непокретне делове машинских система, при томе обезбеђујући неопходне услове тачности и крутости између делова у релативном кретању. Према подацима Привредне коморе Сједињених Америчких Држава, још 2011. године је постојало преко 150000 различитих типова котрљајних лежаја, а узевши у обзир њихов непрекидни развој, данас их има и много више. Колико је овај машински елемент важан у данашњој инжењерској пракси говори и податак да се на основу релевантних статистичких показатеља може очекивати да ће се до 2018. године глобална потреба за котрљајним лежајима сваке године повећавати за 7,3% – до укупне годишње вредности „потрошње“ од 104,5 милијарди долара.

До данас су развијени бројни математички модели који описују сложене физичке и хемијске процесе који се одвијају у котрљајним лежајима током њихове експлоатације. Наведени модели су углавном базирани на следећим параметрима: расподели оптерећења на котрљајним телима и прстеновима лежаја, величини контактних напона и деформација, промени угла контакта, радијалног зазора или преклопа, температуре, нивоу вибрација и геометријским несавршеностима стаза котрљања и котрљајних тела. С обзиром на комплексност и разноврсност наведених параметара, практично је немогуће формирати јединствен свеобухватни математички модел за анализу понашања лежаја. Зато су формиран и стално се унапређују одговарајући математички подмодели: статички, динамички, триболошки, топлотни и математички модел за одређивање радног века лежаја. Статички модел котрљајног лежаја дефинише интензитет оптерећења појединих котрљајних тела

лежаја, карактеристике расподеле спољашњег оптерећења, крутост лежаја и угао контакта котрљајних тела са стазама котрљања. У динамичком моделу је развијен систем једначина кретања прстенова и котрљаних тела у функцији времена, са циљем одређивања спектра вибрација елемената котрљајног лежаја и њихових сопствених учестаности. Триболошки модел, којим се описује трење и хабање делова лежаја (стаза котрљања, котрљајних тела, кавеза...), обухвата статику, кинематику и динамику лежаја (укључујући хидродинамичко подмазивање). Топлотни модел дефинише законе генерисања и простирања топлоте кроз делове лежаја. Моделом за одређивање радног века котрљајног лежаја се прорачунава време до његовог отказа, на основу процене одговарајуће статичке и динамичке носивости.

Упркос вишедеценијском развоју наведених модела, инжењерска пракса показује да су они још увек далеко од савршених, односно, прорачунске вредности радних карактеристика котрљајних лежаја значајно одступају од реалних. Разлог овог одступања лежи у чињеници да су котрљајни лежаји изузетно комплексни машински елементи на чије перформансе и радни век утичу и фактори који су у до сада развијеним прорачунима обично занемаривани. На пример, у стандарду ISO 15243:2004 је дефинисано чак шест различитих примарних узрока отказа котрљајних лежаја: контактни замор материјала, хабање, корозија, електро-ерозија, пластичне деформације и прслине или лом, који никад не делују појединачно, већ увек у међусобном садејству. Према подацима светских произвођача, међу наведеним узроцима отказа котрљајних лежаја најчешће су присутни различити видови *хабања* – посебно *абразивно хабање* узроковано присуством честица нечистоћа у мазиву лежаја (узрок 20-50% отказа котрљајних лежаја – у зависности од њихове апликације и типа).

Абразивно хабање се у општем случају може дефинисати као "врста хабања која настаје при кретању тврдих честица или тврдих врхова неравнина по површини чврстих тела" (Речник триболошких термина, Крагујевац, 2011).

И поред тога што је бројним наводима у литератури истакнуто да абразивно хабање значајно (чак и пресудно) смањује радни век котрљајних лежаја, описани математички модели главни узрок абразивног хабања – концентрацију честица нечистоћа у котрљајном лежају – узимају у обзир тек посредно, квалитативном оценом радне средине. Разлог за то је стохастички карактер феномена абразивног хабања, који онемогућава прецизну квантификацију његовог утицаја на радне карактеристике котрљајних лежаја без примене одговарајућих статистичких метода. Пошто је у радним срединама са израженим присуством чврстих честица нечистоћа повећана могућност појаве абразивног хабања, предложена докторска дисертација ће бити фокусирана на котрљајне лежаје транспортних ваљака са површинских копова угља – где је евидентно присуство високе концентрације честица песка из ископина, као и угљене и површинске прашине.

Радијални зазор је једна од најзначајнијих геометријских карактеристика котрљајног лежаја. Дефинише се као величина могућег померања једног прстена котрљајног лежаја у односу на други – нормално на осу проврта лежаја. Може се поделити на: фабрикациони, монтажни и радни радијални зазор. *Фабрикациони зазор* је зазор неуграђеног и неоптерећеног лежаја, прописан одговарајућим стандардима. При уградњи лежаја, радијалне мере унутрашњег прстена се услед еластичних деформација повећавају, а спољашњег смањују, па је *монтажни радијални зазор лежаја* увек мањи од фабрикационог. Током експлоатације, *радни радијални зазор* се мења због еластичних деформација делова изложених оптерећењу, као и због различитих топлотних дилатација спољашњег и унутрашњег прстена. Такође, и описани феномен абразивног хабања повећава радни радијални зазор (механичким разарањем стаза котрљања котрљајних лежаја), индукујући неминовни пораст температура и вибрација.

Предмет истраживања предложене дисертације су управо ови параметри, односно, дефинисање и имплементација нових нумеричко-експерименталних поступака за карактеризацију утицаја концентрације честица нечистоћа у мазиву лежаја (непосредног узрочника абразивног хабања) на промену вибрација и температура прстенова котрљајних

лежаја у времену, уз допунску аналитичку карактеризацију утицаја наведених величина на радни радијални зазор.

Узевши у обзир наведене чињенице – комплексност котрљајних лежаја, неопходност њихове примене у свакодневној инжењерској пракси и континуално повећавање њихове потражње, намеће се закључак да сваки допринос разјашњавању неистражених феномена у предметној области, као и оптимизација или унапређење конструкционих решења постојећих типова котрљајних лежаја, потенцијално доводе до значајних енергетских и финансијских уштеда и на локалном и на глобалном нивоу.

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. Детаљну анализу тренутног стања истраживања у области транспортних ваљака и њихових критичних компоненти – котрљајних лежаја, са посебним освртом на експлоатационе услове лежаја транспортних ваљака са површинских копова угља;
2. Експериментално испитивање структуре и састава неметалних честица нечистоћа које узрокују отказе лежаја транспортних ваљака са површинских копова угља;
3. Развој нове универзалне експерименталне процедуре за убрзана испитивања котрљајних лежаја у условима високе концентрације абразивних честица страног порекла;
4. Имплементацију развијене експерименталне процедуре на котрљајне лежаје транспортних ваљака са површинских копова угља – у којој ће по први пут за вештачку контаминацију мазива лежаја бити искоришћене експлоатационе честице неметалних нечистоћа;
5. Дефинисање нове математичке корелације која повезује вибрације котрљајних лежаја, време проведено у експлоатацији и концентрацију абразивних честица страног порекла у њиховом мазиву;
6. Дефинисање нове математичке корелације која повезује температуре прстенова котрљајних лежаја, време проведено у експлоатацији и концентрацију абразивних честица страног порекла у њиховом мазиву;
7. Имплементацију нове корелације у постојећи општи израз за прорачун радног радијалног зазора котрљајних лежаја – допуна постојећег аналитичког модела.

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 обogaћена 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

Повећање радне способности машинских елемената и система је непрекидно у фокусу научних истраживања. Под радном способношћу се подразумева група услова који морају бити испуњени да би машински системи и њихови делови исправно и поуздано обављали предвиђене функције, односно, неопходно је да поседују довољну чврстоћу и крутост да у току радног века издрже сва оптерећења и друге утицаје, без штетних деформација, разарања, претераног хабања, загревања и опасних вибрација. Овим условима се последњих деценија прикључује и услов енергетске ефикасности – такав облик, димензије, материјал и технологија израде да је у експлоатацији омогућена минимална специфична потрошња енергије по јединици масе производа.

Остваривање овако комплексних и често конфликтних услова подразумева детаљно изучавање више различитих феномена: чврстоће, крутости, напона и деформација, трења, хабања и подмазивања, вибрација и пригушења. За то се користе поступци моделирања и оптимизације, контролисања и испитивања и мерења и анализе – а све у функцији развоја адекватних методологија за повећање радне способности, поузданости и енергетске ефикасности. Закључци и резултати оваквих истраживања су универзални али су посебно важни у енергетици, због круцијалног утицаја ове привредне гране на општи друштвени прогрес и економски развој.

Бројна истраживања [1,2,3] су показала да велики проценат енергетских губитака у термоелектранама потиче од транспортних система, нарочито од система тракастих транспортера и њихових кључних компоненти – транспортних (носећих) ваљака. Транспортни ваљци су машински склопови чија је функција да пренесу оптерећење услед масе транспортне траке и транспортованог терета на носећи рам. Најчешће се састоје од цеви, осовине, пара радијалних кугличних котрљајних лежаја и пара заптивних група. Котрљајни лежаји су критичне компоненте у склоповима транспортних ваљака, односно, најчешћи узрок њихових отказа [4, 5, 6].

Ако су котрљајни лежаји правилно монтирани и одржавани (подмазивани оптималном количином чистог мазива у предвиђеним временским интервалима), њихов радни век се прорачунава према основној једначини коју су представили Палмгрен и Лундберг у референци бр. [7]. Том једначином се предвиђа радни век који ће под одређеним оптерећењем издржати 90% котрљајних лежаја из исте серије у *идеалним радним условима*, односно, без присуства контаминаната. Утицај контаминације на радни век котрљајног лежаја се узима у обзир корекционим фактором  $e_c$  – представљеним у стандарду ISO 281:2007.

Наведени корекциони фактор се усваја на основу квалитативне оцене присуства честица нечистоћа у радној средини (екстремно чиста – високо чиста – стандардно чиста – минимално загађена – типично загађена – јако загађена – екстремно загађена). Чињеница да је утицај контаминације на радни век котрљајних лежаја препознат у међународном стандарду, потврђује претпоставку да последично абразивно хабање значајно утиче на радне карактеристике котрљајних лежаја. То је посебно изражено у случају лежаја транспортних ваљака тракастих транспортера за пренос угља од површинског копа до термоелектране, јер они најчешће функционишу у екстремно неповољним радним условима – са изражено високом концентрацијом честица угљене и површинске прашине, као и различитих типова песка из ископаних слојева земље.

Управо ова чињеница је најважнији разлог због кога су баш ови котрљајни лежаји изабрани за даљу анализу – ако развијене нумеричко-експерименталне процедуре за карактеризацију утицаја концентрације честица експлоатационих нечистоћа на радне карактеристике котрљајних лежаја буду применљиве за симулацију описаних екстремних радних услова, сигурно ће бити применљиве и на котрљајне лежаје који функционишу у повољнијим окружењима.

Абразивно хабање котрљајних лежаја изазвано експлоатационим честицама нечистоћа је још увек недовољно описан процес. Према [8, 9] постоји неколико могућих механизма хабања услед дејства контаминаната. Када чврсте честице нечистоћа продру у унутрашњост котрљајног лежаја, површинска оштећења његових унутрашњих површина су неизбежна [10, 11]. Та оштећења представљају изворе концентрација напона, значајно убрзавајући отказ лежаја [12]. Степен механичког дејства абразивних честица нечистоћа на контактне површине лежаја зависи од њиховог облика, величине, односа механичких карактеристика честице и хабаних површина (првенствено тврдоће [13]), оптерећења итд. Са аспекта величине абразивних честица, Мару и др. [14] и Никас и др. [15] су утврдили да је критична величина честица реда величине слоја мазива.

Међутим, други аутори [9] тврде да честице веће од дебљине слоја мазива по уласку у зону контакта котрљајних тела и прстенова лежаја бивају механички разорене, узрокујући нагле порасте напона и трајна микрооштећења на стазама котрљања – што последично доводи до смањења радног века и коначног отказа котрљајног лежаја услед замора [16]. Површинска оштећења котрљајних лежаја узрокована честицама нечистоћа у мазиву мењају геометрију лежаја, повећавајући пречник спољашње стазе котрљања и смањујући пречник стазе котрљања унутрашњег прстена, на тај начин индукујући промену радијалног зазора и неповољнију расподелу оптерећења. Промена радијалног зазора утиче на повећање нивоа вибрација лежаја [17], док неповољнија расподела оптерећења индукује повећано загревање лежаја у зони контакта између котрљајних тела и прстенова, посредно утичући и на повећање нивоа вибрација [18]. Такође, пошто расподела оптерећења директно зависи од предоптерећења и броја котрљајних тела лежаја [19, 20, 21, 22] – и ови параметри значајно утичу на његове температуре и ниво вибрација.

Општи напредак технике почетком 21. века условљава појаву нових методологија и уређаја за мониторинг стања и превенцију отказа машинских елемената, укључујући и предмет истраживања дисертације – котрљајне лежаје. Истраживања која су пре само двадесет година била технички неизводљива, данас се рутински обављају, према стандардизованим методологијама. Ово отвара простор за нова истраживања (као и верификацију резултата старих), коришћењем мерних уређаја најновије генерације. У складу са наведеним, данас се примењује више техника за дијагностику стања котрљајних лежаја, међу којима се истичу анализа мазива, анализа продуката хабања, анализа вибрација и акустичних емисија, као и примена термографије. Ипак, од свих наведених методологија најчешће се користи вибрациона дијагностика [23, 24] – зато што пружа најкомплексније информације о стању појединих елемената из склопова котрљајних лежаја.

У складу са претходно наведеним, до данас је изведен и велики број експерименталних истраживања са циљем успостављања прецизних корелација између нивоа вибрација котрљајних лежаја и концентрације абразивних честица у њиховом мазиву. Мару и др. [14, 25, 26, 27] су извели истраживање са циљем да утврде како контаминација мазива утиче на ниво вибрација лежаја са аспекта величине абразивних честица и нивоа њихове концентрације у мазиву.

Објект њиховог експеримента су били радијални куглични котрљајни лежаји типа 6205 (пречник проврта: 25 mm), подмазани вештачки контаминираним минералним уљем. Абразивне честице које су користили у експерименту су биле стандардне кварцне честице величине 37  $\mu\text{m}$ , 59  $\mu\text{m}$  и 111  $\mu\text{m}$ , у концентрацијама од 0,04 g/l до 0,7 g/l. Резултати експеримента су показали да је могуће идентификовати присуство контаминаната у мазиву лежаја анализом одређених фреквентних опсега њиховог вибрационог сигнала.

Кулчерис и др. [16] су извели експериментално испитивање вибрација котрљајних лежаја типа 1207, 2207 и YSA (пречник проврта: 35 mm), вештачки контаминираних честицама корунда (алумина,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , тврдоћа 2000HV), величине од 62-73  $\mu\text{m}$  и 105-177  $\mu\text{m}$ , у концентрацији од 0,75  $\text{cm}^3$  абразивних честица по 50 g чисте SKF LGMT3 масти. Циљ је био да се утврди веза између величине абразивних честица и нивоа хабања лежаја, коришћењем софтверских алата за анализу вибрационих сигнала. Резултати су показали да је хабање лежаја израженије са смањењем величине абразионих честица.

Слично експериментално истраживање је извела и Лазовић и др. [10, 11, 28], с тим што су као абразив коришћене честице стандардизоване дијамантске прашине, а анализиран је утицај контаминације на радијални зазор испитиваних котрљајних лежаја и његову масену похабаност.

Махаџан и Утпат су у [29] представили резултате испитивања трендова интензитета вибрација вештачки контаминираних котрљајних лежаја. Експериментална испитивања су том приликом изведена на радијалним кугличним котрљајним лежајима типа 6206-2RS

(пречник проврта: 30 mm), чија је маса вештачки контаминирана честицама Доломита величине 53  $\mu\text{m}$ , 75  $\mu\text{m}$  и 106  $\mu\text{m}$ , са три нивоа концентрације (5%, 15% и 25% абразивних честица по 5 g литијумске масти). Резултати истраживања су још једном потврдили да се са повећавањем нивоа концентрације абразивних честица приметно повећава и ниво вибрација лежаја. Такође је уочено и да се варирањем оптерећења и учестаности обртања испитиваних узорака мењају и вредности вибрацијских убрзања, као и да са повећањем величина абразивних честица долази до повећања вибрацијског убрзања до одређене вредности, након чега њихова вредност почиње да опада.

Из претходно описаних експерименталних истраживања других аутора је могуће закључити да су у зависности од специфичних циљева експеримента коришћене различите абразивне честице – које не одговарају експлоатационим честицама нечистоћа са површинских копова угља. Такође, ни испитивани узорци не одговарају котрљајним лежајима који се уграђују у транспортне ваљке. Ипак, генерални закључак је да дефинитивно постоји јака веза између нивоа вибрација лежаја и нивоа концентрације абразивних честица у њиховом мазиву, што оставља простор за даља истраживања у предметној области, укључујући и развој релевантних, статистички значајних, математичких модела одговарајућих корелација.

Поред вибрационе дијагностике, данас се за мониторинг и дијагностику стања котрљајних лежаја најчешће користи термографија [30]. Ову методу је могуће успешно користити и за проучавање неистражених аспеката термичког понашања котрљајних лежаја, дакле, за фундаментални научно-истраживачки рад. Тако су нпр. Сео и др. [31] успешно користили термографску инспекцију за снимање промена температурног поља спољашњих површина котрљајних лежаја типа 6004, 6204 и 6304, у условима различитих учестаности обртања ( $1000 \text{ min}^{-1}$ ,  $2000 \text{ min}^{-1}$  и  $3000 \text{ min}^{-1}$ ).

Пошто радијални зазор котрљајних лежаја директно зависи од температура његових унутрашњих и спољашњих прстенова, а, према претходно образложеном, и од степена његовог абразивног хабања, применом термографске инспекције је могуће повезати ове радне карактеристике и значајно унапредити постојећу једначину за прорачун радног радијалног зазора (коју је објавио Т. Харис у [32], а презентовао Ричи у [33]). До сада је било више покушаја сличних експерименталних истраживања, али је примена примитивнијих методологија испитивања условила изостанак релевантних научних резултата. На пример, коришћењем термопарова Калман и Хачкинс [34] су испитивали температуре на површини хибридних котрљајних лежаја вештачки контаминираних са две врсте честица: титанијум диоксидом ( $\text{TiO}_2$ ; релативно меким оксидом титана чије су честице величине до 4  $\mu\text{m}$ , углавном  $<1 \mu\text{m}$ ) и силиком ( $\text{SiO}_2$ ; а-кварц, тврђим материјалом са честицама величине 75-103  $\mu\text{m}$ ). Током испитивања, учестаност обртања испитиваних узорака је одржавана на вредности  $2060 \text{ min}^{-1}$ , а резултати су показали да су прираштаји температура вештачки контаминираних лежаја значајно већи од прираштаја температуре чистих лежаја изложених истом оптерећењу и истој учестаности обртања.

Анализа описаних истраживања показује да је предметна област на међународном нивоу веома актуелна и у истраживачком и у апликативном смислу.

У националним оквирима, предметна тематика се већ више деценија континуално проучава на Катедри за опште машинске конструкције Машинског факултета Универзитета у Београду – само неки од добијених релевантних резултата су приказани у [10, 11, 17, 20, 21, 22, 28, 30, 35, 36, 37, 38, 39]. Такође, предметна проблематика је била (и још увек је) у фокусу истраживања два национална пројекта технолошког развоја, финансирана од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије:

1. TP14033 – Истраживање метода и приступа повећању радног века и поузданости машинских система, 2008-2011, и
2. TP35029 – Развој методологија за повећање радне способности, поузданости и енергетске ефикасности машинских система у енергетици, 2011-2016.

Преглед референтне литературе:

- [1] Antoniak J.: Theoretical Basis and Industrial Applications of Energy – Saving And Increased Durability Belt Conveyor, *Acta Montanistica Slovaca*, Vol. 8, No. 2-3, 2003, pp. 150-157,
- [2] Antoniak J.: Resistances to the Motion in Mining Belt Conveyors, *Acta Montanistica Slovaca*, Vol. 6, No. 2, 2001, pp. 150-157
- [3] Gładysiewicz L., Król R., Bukowski J.: Tests of Belt Conveyor Resistance to Motion, Maintenance and Reliability, No. 3, 2011, pp. 17-25
- [4] Madden W.F.: An Investigation into Idler Seals and the Effect on Rim Drag, The Key Center For Bulk Solids And Particular Technologies, The University Of Newcastle, Newcastle, Nsw Australia, Beltcon 9, <http://www.saimh.co.za/beltcon/beltcon9/paper918.html>, 1997
- [5] Stewart-Lord M.: Rolling Bearing Characteristics Required for Maximising the Life of Conveyor Idler Rolls, BELTCON 6, <http://www.saimh.co.za/beltcon/beltcon6/paper66.html>, 1991.
- [6] Inpro/Seal Company Rock Island, IL, 2007.  
<http://www.mt-online.com/january2007/problem-solvers-conveyor-idler-bearing-isolator-increases-reliability-and-safety-while-reducing-downtime-and-power-consumption>
- [7] Palmgren A., Lundberg G.: Dynamic Capacity of Rolling Bearings, *Acta Polytechnica*, Vol. 1, No. 3, 1947, pp. 7.
- [8] Godet M.: The Third Body Approach: a Mechanical View of Wear, *Wear*, Vol. 100, No. 1-3, 1984, pp. 437- 452
- [9] Nikas G. K.: A State-Of-The-Art Review on the Effects Particulate Contamination and Related Topics in Machine-Element Contacts, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Vol. 224, No. 5, 2010, pp.453-479
- [10] Lazovic T., Mitrovic R., Ristivojevic M.: Influence of Abrasive Particles Geometry and Material Properties on the Type of Abrasive Wear, 8<sup>th</sup> International Tribology Conference - ITC '03, Belgrade, Serbia, 2003, pp. 83-86
- [11] Lazovic T., Mitrovic R., Marinkovic A.: Influence of Abrasive Wear on the Ball Bearing Service Life, 2<sup>nd</sup> European Conference on Tribology - ECOTRIB 2009, Engineering Faculty University of Pisa, Pisa, Italy, 2009, pp. 387-392
- [12] Singotiaa G., Jainb A. K.: Experimental Study of Various Solid Contamination in Ball Bearings, *International Journal of Emerging Trends in Engineering and Development* Issue 3, Vol.5, 2013, pp. 15-21
- [13] Dwyer-Joyce R.S.: Predicting the Abrasive Wear of Ball Bearings by Lubricant Debris, *Wear*, Vol. 233-235, 1999, pp. 692-701
- [14] Maru M. M., Castillo R. S., Padove L. R.: Solid Contamination in Ball Bearings Through Vibration and Wear Analyses, *Tribology International*, Vol. 40, No. 3, 2007, pp. 433-440
- [15] Nikas G. K., Sayles R. S. and Ioannides E.: Effects of Debris Particles in Sliding/Rolling Elastohydro Dynamic Contacts, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Vol. 212, No. 5, 1998, pp. 333-342
- [16] Koulocheris D., Stathis A., Costopoulos Th., Gyparakis G.: Comparative Study of the Impact of Corundum Particle Contaminants Size on Wear and Fatigue Life of Grease Lubricated Ball Bearings, *Modern Mechanical Engineering*, No. 3, 2013, pp. 161-170
- [17] Lazovic T., Mitrovic R., Ristivojevic M.: Influence of Internal Radial Clearance on the Ball Bearing Service Life, *Journal of the Balkan Tribological Association, Scientific Bulgarian Communications*, Vol. 16, No. 1, 2010, pp. 1-8
- [18] Tomovic R.: Calculation of the Necessary Level of External Radial Load for Inner Ring Support on Q Rolling Elements in a Radial Bearing with Internal Radial Clearance, *International Journal of Mechanical Sciences*, No. 60, 2012, pp.23-33
- [19] Tomovic R.: Calculation of the Boundary Values of Rolling Bearing Deflection in Relation to the Number of Active Rolling Elements, *Mechanism and Machine Theory*, No. 47, 2012, pp. 74-88

- [20] Митровић Р.: Истраживање утицаја конструктивних и триболошких параметара кугличног котрљајног лежаја на радну способност при великим учестаностима обртања, Докторска дисертација, Машински факултет Универзитета у Београду, Београд, Србија, 1992.
- [21] Митровић Р.: Анализа утицаја еластичних деформација и унутрашњег радијалног зазора котрљајног кугличног лежаја на расподелу оптерећења на котрљајна тела и носивост, Магистарска теза, Машински факултет Универзитета у Београду, Београд, Србија, 1987.
- [22] Лазовић, Т.: Анализа утицаја геометрије котрљајног лежаја на расподелу оптерећења на котрљајна тела и крутост, Магистарска теза, Машински факултет Универзитета у Београду, COBISS.SR-ID 512121251, Београд, Србија, 2000.
- [23] Manjunath A., Girish D.V.: Defect Detection in Deep Groove Polymer Ball Bearing using Vibration Analysis, International Journal of Recent advances in Mechanical Engineering (IJMECH), Vol.2, No.3, 2013, pp. 45-52
- [24] Plavsic N.; Lazovic T.; Stamenic Z.: Vibration Diagnostic of Rolling-Bearings, Proceedings of Conf. IRMES 2002, Jahorina, Republic of Serpska, Bosnia and Herzegovina, September 2002, pp. 577-582
- [25] M.M. Maru, R. Serrato-Castillo and L.R. Padovese: Influence of Oil Contamination on Vibration and Wear in Ball and Roller Bearings, Industrial Lubrication and Tribology, Vol. 59, No. 3, 2007, pp. 137–142
- [26] M.M. Maru, R. Serrato-Castillo and L.R. Padovese: Effect of the Presence of Solid Contamination and the Resulting Wear on the Mechanical Signature of Ball Bearings, 18th International Congress of Mechanical Engineering, O.Preto - November 6-11, 2005, pp. 1-6
- [27] M.M. Maru, R. Serrato-Castillo and L.R. Padovese: Detection of Solid Contamination in Rolling Bearing Operation through Mechanical Signature Analysis, Twelfth International Congress on Sound and Vibration, Lisbon, July 11-14, 2005, pp. 1-8
- [28] Лазовић Т.: Истраживање абразивног хабања котрљајних лежаја, Докторска дисертација, Машински факултет Универзитета у Београду, COBISS.SR-ID 512814243 и COBISS.SR-ID 34232079, Београд, Србија, 2007.
- [29] Mahajan O. L., Utpat A. A.: Study of Effect of Solid Contaminants in the Lubricant on Ball Bearings Vibration, International Journal of Instrumentation, Control and Automation, Vol. 1, 2012, pp. 112-115
- [30] Bakić G., Đukić M., Lazović T., Prokić Cvetković R., Popović O., Rajičić B.: New Methodology for Monitoring and Prevention of Rotating Parts Failures, FME Transactions, Vol. 35, 2007, pp. 195-200
- [31] Seo J., Yun H., Hong D., Kim W.: Quantitative Assessment of the Detection of Defects by Thermographic Inspection in Vibration Machinery Mode, Proceedings, 18th International Conference on Composite Materials, Jeju Island, South Korea, 2011, pp. 1-4
- [32] Harris, T.: Rolling Bearing Analysis, John Wiley & Sons Inc., New York, USA, 2001
- [33] Ricci, M.: Internal Loading Distribution in Statically Loaded Ball Bearings Subjected to a Combined Radial, Thrust, and Moment Load, including the Effects of Temperature and Fit, Proceedings, 11th Pan-American Congress of Applied Mechanics, Foz do Iguaçu, Brazil, 2010, pp. 1-6
- [34] Kahlman, L. and Hutchings, I.: Effect of Particulate Contamination in Grease-Lubricated Hybrid Rolling Bearings, Tribology Transactions, Vol. 42, No. 4, 1999, pp. 842-850
- [35] Крсмановић В., Митровић Р.: Клизни и котрљајни лежаји, IV издање, Машински факултет Универзитета у Београду, Београд, Србија, 2004.
- [36] Лазовић Т.: Абразивно хабање лежаја, Монографија, Машински факултет Универзитета у Београду, Београд, Србија, 2014.
- [37] Огњановић М.: Конструисање машина, Машински факултет Универзитета у Београду, Београд, Србија, 2000;
- [38] Огњановић М.: Машински елементи, Машински факултет Универзитета у Београду, Београд, Србија, издања 2006-2013.

[39] Ристивојевић М., Митровић Р.: Расподела оптерећења - зупчасти парови и котрљајни лежаји, Монографија, Машински факултет Универзитета у Београду, Београд, Србија, 2002.

### 3. Полазне хипотезе

Предметна истраживања у оквиру предложене теме дисертације су базирана на следећим претпоставкама:

- Карактер промене температура прстенова, вибрација и радног радијалног зазора котрљајних лежаја у времену директно зависи од нивоа концентрације абразивних честица у њиховом мазиву.
- Постоји бар једна математичка корелација чији је коефицијент детерминације  $R^2$  већи од 0,5 – а која једнозначно повезује вибрације котрљајних лежаја са временом и нивоом концентрације нечистоћа у њиховом мазиву.
- Постоји бар једна математичка корелација, чији је коефицијент детерминације  $R^2$  већи од 0,5 – а која једнозначно повезује температуре прстенова котрљајних лежаја са временом и нивоом концентрације нечистоћа у њиховом мазиву.

### 4. Научне методе истраживања

Узевши у обзир да још увек нема развијених аналитичких израза који повезују промену вибрација и температура прстенова котрљајних лежаја у времену са нивоом концентрације нечистоћа у њиховом мазиву, неопходно је одговарајуће изразе дефинисати на основу резултата експерименталних истраживања. Стога ће у истраживањима обухваћеним предложеном дисертацијом бити примењене следеће научне методе: експериментална, статистичка и аналитичка.

*Експериментална метода* истраживања ће се користити за практично испитивање утицаја различитих нивоа концентрације неметалних абразивних честица у мазиву котрљајних лежаја на његове основне радне параметре – вибрације и температуре спољашњег и унутрашњег прстена.

Пошто сама појава абразивног хабања има стохастички карактер, за проучавање свих повезаних феномена је неопходно применити одговарајућу *статистичку методу*, односно, одговарајућу методу из теорије вероватноће и статистике. С обзиром да је напредак софтвера омогућио брзу статистичку обраду дискретних експерименталних резултата, за истраживања обухваћена предложеном дисертацијом ће бити употребљен напредни софтверски пакет, који на бази методе најмањих квадрата, кроз итеративну примену предефинисаних математичких модела, омогућава дефинисање оптималне корелације између више независних променљивих.

*Аналитичка метода* истраживања се бити искоришћена у последњој фази предложене дисертације – за допуну и усавршавање постојећег израза за прорачун радног радијалног зазора котрљајних лежаја математичким моделима добијеним статистичком обрадом експерименталних резултата.

### 5. Очекивани научни допринос

Научни допринос предложене дисертације се заснива на унапређењу тренутног стања истраживања у предметној научној области, односно, *прецизнијем опису појаве абразивног хабања котрљајних лежаја*. Под тим се првенствено подразумева дефинисање радних карактеристика на које концентрација абразивних честица у мазиву котрљајних лежаја највише утиче и математичко описивање њихових међусобних релација.

Напредак у односу на актуелне математичке методе за описивање наведеног феномена ће бити остварен и кроз допуну и усавршавање постојећег израза за прорачун радног радијалног зазора котрљајних лежаја математичким моделима добијеним статистичком обрадом експерименталних резултата. Управо то је један од најоригиналнијих очекиваних научних доприноса кандидата – који ће бити утемељен на резултатима експерименталних истраживања и верификован од стране научне јавности кроз презентацију добијених резултата у међународним научним публикацијама.

Резултати истраживања предложених дисертацијом моћи ће да се користе и за даљи развој математичких модела корелација између концентрације неметалних честица нечистоћа у мазиву котрљајних лежаја и њихових радних карактеристика, као и за практичну примену – компаративну анализу квалитета котрљајних лежаја различитих произвођача са аспекта отпорности на абразивно хабање.

На основу истраживања предложених докторском дисертацијом се може вршити и прецизније предвиђање очекиваног радног века котрљајних лежаја – што је од изузетне важности у самом процесу конструисања (првенствено за димензионисање одговарајућих машинских елемената).

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

Према претходно наведеном, дакле, могући научни доприноси предложене теме докторске дисертације су:

- Систематизација постојећих знања у области абразивног хабања котрљајних лежаја;
- Анализа порекла, хемијског састава и величине експлоатационих честица нечистоћа са површинских копова угља;
- Нова математичка корелација између вибрација котрљајних лежаја, времена проведеног у експлоатацији и концентрације абразивних честица страног порекла у њиховом мазиву;
- Нова математичка корелација између температура прстенова котрљајних лежаја, времена проведеног у експлоатацији и концентрације абразивних честица страног порекла у њиховом мазиву;
- Усавршени математички модел за прорачун радног радијалног зазора котрљајних лежаја.

## **6. План истраживања и структура рада**

Полазећи од представљеног контекста, а у складу са добром инжењерском праксом, на изазове предметне проблематике ће бити одговорено теоретским и експерименталним истраживањима реализованим кроз следеће секвенцијалне фазе:

1. Прикупљање, анализа и синтеза доступних знања из предметне области;
2. Осмишљавање и спровођење одговарајућих експерименталних истраживања;
3. Статистичка анализа резултата експерименталних истраживања и развој нових математичких модела;
4. Верификација експерименталних резултата и нових математичких модела;
5. Имплементација нових математичких модела у постојеће аналитичке изразе за прорачун радних параметара котрљајних лежаја.

У оквиру прве фазе истраживања ће бити извршено прикупљање, анализа и систематизација релевантних информација о транспортним ваљцима и 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 пројеката TP35029 и TP14033;
- доступних прегледних и оригиналних истраживачких радова, монографија, докторских дисертација, магистарских теза, уџбеничке литературе, стручних експертиза, резултата националних и интернационалних пројеката;
- искуства истраживача презентованих у зборницима националних и међународних стручних конференција, семинара и скупова;
- релевантних података водећих светских компанија за производњу транспортних ваљака и котрљајних лежаја, представљених на Интернет презентацијама, у фабричким публикацијама и каталозима;
- садржаја домаћих и међународних стандарда;
- извештаја надлежних националних техничких комитета.

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

У оквиру припреме експеримента је неопходно дефинисати радне услове у којима котрљајни лежаји транспортних ваљака најчешће функционишу. Под тим се првенствено подразумевају њихова експлоатациона оптерећења и учестаности обртања. Такође је неопходно одредити и порекло, састав и величину неметалних честица нечистоћа које доводе до отказа лежаја транспортних ваљака. У том циљу су са површинског копа 'Дрмно' (компаније Термоелектране и Копови Костолац д.о.о.) већ набављени узорци отказалих транспортних ваљака, из чијих ће лежаја бити издвојене и анализирани абразивне честице, а затим и упоређене са доминантним нечистоћама из одговарајуће радне средине: угљеном и површинском прашином и песком из различитих слојева ископина. За анализу састава и величине честица нечистоћа ће бити искоришћени научно-истраживачки капацитети Института за нуклеарне науке 'ВИНЧА' – првенствено SEM (Scanning Electron Microscope). Циљ анализе је да се дефинише састав и структура абразивних честица које ће бити коришћене у наставку експеримента – за вештачку контаминацију мазива испитиваних котрљајних лежаја.

Припрема експеримента обухвата и набавку одговарајућег броја узорака котрљајних лежаја реномираног светског произвођача, чије ће карактеристике бити испитане у акредитованој лабораторији Машинског факултета Универзитета у Београду – Лабораторији за Испитивање Машинских Елемената и Система (ЛИМЕС). Наиме, пошто је у претходним поглављима већ истакнуто да абразивно хабање котрљајних лежаја највише утиче на повећање њиховог радијалног зазора, битно је да сви испитивани узорци имају једнаке почетне радијалне зазоре – што ће бити утврђено управо мерењем у наведеној лабораторији.

За успешну реализацију експеримента је важна и набавка одговарајућег мазива (литијумске масти), са познатим триболошким карактеристикама. Једнаке количине мазива (одређене осредњавањем експериментално измерених маса мазива у набављеним узорцима) ће затим бити вештачки контаминирани различитим количинама припремљених неметалних честица нечистоћа и искоришћене за подмазивање чистих узорака лежаја (чишћење лежаја ће бити изведено према уобичајеној процедури, прањем у медицинском бензину у ултразвучној кади).

Сам експеримент ће бити изведен на модификованом, наменски развијеном пробном столу Машинског факултета Универзитета у Београду, уз коришћење преносног уређаја за мерење вибрација (вибродиагностику) и напредне дигиталне термокамере. Циљ експеримента је да се у условима убрзаних испитивања, сниме промене у времену вибрација и температура прстенова котрљајних лежаја, вештачки контаминираних различитим количинама неметалних абразивних честица.

Експеримент ће том приликом бити временски ограничен, зато што се на расположивој опреми не могу остварити велике учестаности обртања и велико оптерећење, којима би се могао скратити радни век испитиваних лежаја, а тиме и време трајања испитивања.

По успешној реализацији експеримента, испитани узорци ће бити расклопљени и на одговарајући начин припремљени за испитивање на дигиталном оптичком 3D микроскопу, са циљем да се посматрањем стаза котрљања утврди врста и степен површинских оштећења узрокованих абразивним хабањем.

По завршетку експерименталне фазе истраживања, биће приступљено статистичкој обради добијених резултата (у оквиру треће фазе истраживања). За то ће бити коришћен софтверски пакет верификован од стране Националног института за стандардизацију и технологију Сједињених Америчких Држава. Очекивани исход су *нови математички модели који повезују радне карактеристике испитиваних котрљајних лежаја (вибрације и температуре његових прстенова) и одговарајуће радне услове (концентрацију нечистоћа у њиховом мазиву)*, добијени методом најмањих квадрата, кроз итеративну примену предефинисаних модела једначина из описаног софтверског пакета.

Четврта фаза истраживања се односи на верфикацију експерименталних резултата и развијених математичких модела, и биће реализована првенствено поређењем са резултатима експерименталних испитивања наведених у доступној стручној литератури (резултат прве фазе истраживања).

У последњој петој фази истраживања, развијени математички модели ће бити имплементирани у постојеће аналитичке изразе за прорачун испитиваних радних карактеристика котрљајних лежаја. До сада је утврђено да постоји бар једна аналитичка једначина коју је описаним истраживањем могуће унапредити – једначина за прорачун радног радијалног зазора, коју је још пре више од четири деценије презентовао Тедрик Харис, а која се још увек користи у мање-више неизмењеној форми.

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

1. Увод
2. Анализа тренутног стања науке у предметној области
  - 2.1 Преглед најчешћих узрока отказа котрљајних лежаја према стандарду ISO 15243:2004
  - 2.2 Преглед постојећих математичких модела абразивног хабања котрљајних лежаја
  - 2.3 Преглед постојећих експерименталних истраживања понашања котрљајних лежаја у условима абразивног хабања
3. Хипотезе планираног истраживања
4. Конципирање експерименталних метода за верификацију постављених научних хипотеза
5. Детаљан опис реализованих експерименталних испитивања и преглед добијених резултата
6. Статистичка анализа добијених експерименталних резултата и развој нових математичких (аналитичких) модела понашања котрљајних лежаја у условима абразивног хабања
7. Имплементација развијених математичких модела у постојеће математичке моделе абразивног хабања котрљајних лежаја
8. Верификација развијених математичких модела абразивног хабања котрљајних лежаја
9. Закључак

## 7. Закључак и предлог

Анализом података из пријаве кандидата **Жарка З. Мишковића**, дипл.инж.маш., Комисија закључује да је предложена тема докторске дисертације актуелна и пододна, 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

**Жарку З. Мишковићу, дипл.инж.маш.**

одобри изradу докторске дисертације под називом

### **„УТИЦАЈ КОНЦЕНТРАЦИЈЕ ЕКСПЛОАТАЦИОНИХ ЧЕСТИЦА НЕЧИСТОЋА НА РАДНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ 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.

У Београду, 30.03.2015. год.

#### **ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ**

---

Проф. др Радивоје Митровић,  
Универзитет у Београду, Машински факултет

---

Проф. др Милета Ристивојевић,  
Универзитет у Београду, Машински факултет

---

Ванр. Проф. др Татјана Лазовић  
Универзитет у Београду, Машински факултет

---

Доц. др Зоран Стаменић  
Универзитет у Београду, Машински факултет

---

Проф. др Синиша Кузмановић  
Универзитет у Новом Саду,  
Факултета техничких наука

## ПОДАЦИ О МЕНТОРУ

за кандидата Жарка Мишковића

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 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 \_\_\_\_\_

М.П.

\_\_\_\_\_