

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: **Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Наташе Солдат**

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду бр. 1739/2 од 19.11.2020. године именовани смо за чланове комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Наташе Солдат, дипл.инж.маш., под насловом:

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

После прегледа достављене Дисертације, других пратећих материјала и разговора са Кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат Наташа Солдат, дипл. инж. маш., уписала је прву годину докторских студија на Машинском факултету Универзитета у Београду школске 2010/2011. године. На молбу кандидата, Одлуком бр. 9/11378 од 04.10.2016, 2341/1 од 06.10.2017. и 9/13826 од 28.09.2018. године одобрен је статус мировања у школској 2015/2016, 2017/2018, односно 2018/2019. години. На захтев кандидата, декан Машинског факултета у Београду је донео Решење бр. 9/13878 од 28.09.2018. и 9/248 од 25.09.2020. године о продужењу рока за завршетак докторских студија за два семестра у школској 2019/2020, односно 2020/2021. години. На основу положених испита на докторским студијама, научних и стручних активности кандидат је стекла право на пријављивање теме докторске дисертације.

Кандидат је поднела захтев за одобрење теме докторске дисертације на Катедри за опште машинске конструкције Машинског факултета Универзитета у Београду. За ментора кандидат је предложила др Радивоја Митровића, редовног професора

Машинског факултета у Београду, а за коментора др Ивану Атанасовску, вишег научног сарадника Иновационог центра Машинског факултета у Београду. На основу захтева кандидата Наташе Солдат, дипл.маш.инж. број 590/1 од 31.03.2015. године за одобрење теме докторске дисертације, сагласности Катедре за опште машинске конструкције број 590/2 од 14.04.2015. године да се кандидату одобри пријава теме докторске дисертације и именује Комисија за оцену испуњености услова кандидата и научне заснованости теме докторске дисертације, Наставно-научно веће Машинског факултета Универзитета у Београду донело је Одлуку број 590/3 од 16.04.2015. којом се прихвата тема докторске дисертације под називом „Утицај оштећења стаза котрљања на радне карактеристике кугличних котрљајних лежаја“, именује се ментор др Радивоје Митровић, редовни професор Машинског факултета у Београду, коментор др Ивана Атанасовска, виши научни сарадник Иновационог центра Машинског факултета у Београду и именује се Комисија за оцену испуњености услова кандидата и научне заснованости теме докторске дисертације у саставу:

- др Радивоје Митровић, редовни професор Машинског факултета Универзитета у Београду,
- др Ивана Атанасовска, виши научни сарадник, Иновациони центар Машинског факултета Универзитета у Београду,
- др Божидар Росић, редовни професор Машинског факултета Универзитета у Београду,
- др Татјана Лазовић, ванредни професор Машинског факултета Универзитета у Београду,
- др Радослав Томовић, доцент Машинског факултета Универзитета Црне Горе.

На основу извештаја Комисије број 590/4 од 28.04.2015. године и одлуке Наставно-научног већа Машинског факултета у Београду број 590/5 од 30.04.2015. године да се прихвата предлог о испуњености услова о научној заснованости теме докторске дисертације, Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду на седници одржаној 08.06.2015. дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата Наташе Солдат, дипл. инж. маш., бр. 61206-2092/2-15, под називом „Утицај оштећења стаза котрљања на радне карактеристике кугличних котрљајних лежаја“.

На основу обавештења ментора др Радивоја Митровића и коментора др Иване Атанасовске, да је да је кандидат Наташа Солдат завршила докторску дисертацију под називом „Утицај оштећења стаза котрљања на радне карактеристике кугличних котрљајних лежаја“, као и предлога Катедре за опште машинске конструкције, Наставно-научно веће Машинског факултета Универзитета у Београду донело је Одлуку број 1739/2 од 19.11.2020. године о именовању Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације у саставу:

- др Радивоје Митровић (ментор), редовни професор Машинског факултета Универзитета у Београду,
- др Ивана Атанасовска (ментор), научни саветник, Математички институт САНУ,
- др Божидар Росић, редовни професор, Машински факултет Универзитета у Београду,
- др Жарко Мишковић, доцент, Машински факултет Универзитета у Београду,
- др Радослав Томовић, ванредни професор, Машински факултет Универзитета Црне Горе.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација „Утицај оштећења стаза котрљања на радне карактеристике кугличних котрљајних лежаја” припада области техничких наука (машинство) и ужој научној области Опште машинске конструкције. Израдом докторске дисертације руководио је ментор др Радивоје Митровић, редовни професор на Катедри за опште машинске конструкције Машинског факултета Универзитета у Београду и коментор др Ивана Атанасовска, научни саветник Математичког института САНУ.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Наташа Солдат, дипл. инж. машинства, рођена је 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 наставила је на Машинском факултету у Београду као студент докторских студија на Катедри за Опште машинске конструкције од школске 2010/11. године.

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. Учесник је међународног билатералног пројекта са Црном Гором (2016-2018). Аутор је и коаутор преко 17 научних и стручних радова, од којих 2 на SCI листи. Учествује у наставном процесу Катедре за Опште машинске конструкције Машинског факултета у Београду на Основним академским студијама на предметима Машински елементи 1 и 2 и Конструисање М.

Аутор и коаутор је следећих радова:

1. Радови у међународном часопису (M23):

- 1.1 **Soldat N.**, Mitrović R., Atanasovska I., Tomović R.: *A methodology for analyzing radial ball bearing vibrations*, Transactions of FAMENA, ISSN 1333-1124, doi:10.21278/TOF.44102, Published by: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Croatia, Volumen 44, No.1, 2020., pp.13-28. (IF:0.580 за 2019), Engineering, Mchanical, 123/130

https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=343991

2. Радови у истакнутом међународном часопису (M22):

- 2.1 Mitrović R., Atanasovska I., **Soldat N.**, Momčilović D.: *Effects of operation temperature on thermal expansion and main parameters of radial ball bearings*, Thermal Science, ISSN 2334-7163 (online edition), ISSN 0354-9836 (printed edition), UDC 621, doi: 10.2298/TSCI141223091M, Published by Vinča Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Vol.19, No.5, 2015., pp.1835-1844. (IF:1.222 за 2014), Thermodynamics, 25/55

<http://thermalscience.vinca.rs/pdfs/papers-2015/TSCI141223091M.pdf>

3. Радови саопштени на скуповима међународног значаја, штампани у целини (M33):

- 3.1 Atanasovska I., Mitrović R., Soldat N., Momčilović D.: *Finite element model for stress state analysis of deep groove ball bearings with defects*, Proceedings of the 5rd

International Scientific Conference "Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications" – COMETA2020, November 26-28, 2020, East Sarajevo – Jahorina, B&H, RS, Publisher: University of East Sarajevo, Faculty of Mechanical Engineering East Sarajevo, ISBN 978-99976-719-8-1 , COBISS.RS-ID 130023425, pp. 285-292.

<http://cometa.ues.rs.ba/Zbornik%20COMETA2020.pdf>

- 3.2 Mitrović R., Atanasovska I., **Soldat N.**, Mišković Ž.: *New trends in machine design within industry 4.0 framework*, Book series: Lecture Notes in Mechanical Engineering, Publisher: Springer Nature Switzerland, 2020, Editors: Lihui Wang, Dimitris Mourtzis, Giovanni Moroni, Vidosav D. Majstorovic, Emanuele Carpanzano, Luigi Maria Galantucci (Proceedings of 5th International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing – AMP 2020), ISSN 2195-4356 , ISBN 978-3-030-46211-6, doi: 10.1007/978-3-030-46212-3_16, pp.227-238.
https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-46212-3_16
- 3.3 Atanasovska I., Momčilović D., Mitrović R., **Soldat N.**, Nešić N.: *Nonlinear dynamics as a tool in selection of working conditions for radial ball bearing*, IUTAM Bookseries 37 - IUTAM Symposium on Exploiting Nonlinear Dynamics for Engineering Systems, Publisher: Springer Nature Switzerland, 2020, Editors: Ivana Kovacic, Stefano Lenci, ISSN 1875-3507, ISBN 978-3-030-23691-5, doi: 10.1007/978-3-030-23692-2_5, pp.49-58.
https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-23692-2_5
- 3.4 Mitrović R., Atanasovska I., **Soldat N.**: *Numerical analysis of dynamic behavior of ball bearing depending on external radial force*, Proceedings of the 3rd International Scientific Conference "Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications" – COMETA2016, December 7–9, 2016, East Sarajevo–Jahorina, B&H, RS, ISBN 978-99976-623-7-8, COBISS. RS-ID 6240280, pp. 23-28.
- 3.5 Atanasovska I., Mitrović R., **Soldat N.**: *Influence of load distribution in ball bearings with defects on the dynamic behavior of gear transmissions systems*, Proceedings of International Conference on GEARS 2015, 5–7 October, 2015, Garching (near Munich), Germany, ISSN 0083-5560, ISBN 978-3-18-092255-3, pp. 1065-1068.
- 3.6 Atanasovska I., Mitrović R., **Soldat N.**: *Developing the finite element model for dynamic analysis of radial ball bearing*, 5th International Congress of Serbian Society of Mechanics, 15–17.06. 2015, Arandjelovac, Serbia, ISBN: 978-86-7892-715-7, COBISS.SR-ID 296997639, Publisher: Serbian Society of Mechanics and Faculty of Technical Sciences Novi Sad, Serbia, pp.1-6.(Full paper on CD)
- 3.7 Mitrović R., **Soldat N.**, Atanasovska I.: *Dynamic behaviour of radial ball bearing due to the periodic variable stiffness*, Preliminary note, Journal Machine Design, Published by University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Vol.7 (Dedicated to the 2nd International Scientific Conference „Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications” COMETA2014, 2nd-5th December 2014., East Sarajevo-Jahorina, BiH), 2015, No.1, ISSN 1821-1259, pp. 1-4.
https://www.researchgate.net/publication/289991512_DYNAMIC_BEHAVIOUR_OF_RADIAL_BALL_BEARING_DUE_TO_THE_PERIODIC_VARIABLE_STIFFNESS

- 3.8 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, pp.201-206, ISBN 978-86-7892-615-0, Balatonfured, Hungary, 2014.
- 3.9 Atanasovska I., Mitrović R., Momčilović D., **Soldat N.**: *The new methodology for assessment of involute gears stability*, 11th International Symposium on Stability, Vibration, and Control of Machines and Structures, SVCS2014, July 3–5, 2014, Belgrade, Serbia ISBN 978-80-8075-655-0, EAN 9788080756550, Published by Springer, 2014, Book of abstract – pp.19, rad na CD – u, pp. 285-295.
- 3.10 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 Informatio Technology, DEMI 2013, University of Banja Luka - Faculty of Mechanical Engineering, Proceedings, ISBN 978-99938-39-45-3, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, 2013.
- 3.11 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, pp.278-281, ISBN 978-86-7083-762-1, Belgrade, Serbia, 2012.
4. Радови саопштени на скуповима међународног значаја, штампани у изводу (M34):
- 4.1 Mitrović R., Atanasovska I., **Soldat N.**: *Experimental measurments 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.
5. Радови у врхунском часопису националног значаја (M51):
- 5.1 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.
6. Радови уистакнутом националном часопису (M52):
- 6.1 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, pp.85-90, ISSN 1821-1259, Novi Sad, Serbia, 2014.
7. Радови у националном часопису (M50):
- 7.1 **Солдат Н.**, Степанов Н.: *Дијагностицирање стања термоенергетског постројења применом методе без разарања материјала*, Техника, Машинство 61 (3), ISSN 0040-2176, UDC 621.311.22.23.004.58, 2012, стр. 394-400. (M53)
8. Саопштење са скупа националног значаја штампано у целини (M63):
- 8.1 **Солдат Н.**: *Основне карактеристике показатеља поузданости и њен утицај на реализацију процеса производње*, 2 Научно – стручни скуп Предузетништво,

инжењерств и менаџмент (Зборник радова), Висока техничка школа струковних студија у Зрењанину, Зрењанин, 2011.

- 8.2 **Солдат Н.:** *Енергетска ефикасност биогаса као новог вида енергије*, 1 Научно – стручни скуп Предузетништво, инжењерств и менаџмент (Зборник радова), Висока техничка школа струковних студија у Зрењанину, Зрењанин, 2010.

У досадашњем раду је успешно овладала специфичним софтверима за 3D моделирање и симулацију Методом коначних елемената (Autodesk Inventor, Ansys), а дужи низ година се користи и стандардним апликацијама из софтверског пакета MS Office (Word, Access, Excel). Поседује знање енглеског језика на напредном конверзацијском нивоу.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Наташе Солдат, дипл.инж.маш., под називом „Утицај оштећења стаза котрљања на радне карактеристике кугличних котрљајних лежаја” изложена је на ~127 страна, са 133 слике (дијаграми, графикони, фотографије). Докторску дисертацију, поред садржаја, номенклатуре, списка слика, списка табела, литературе и прилога, чине следећих осам поглавља:

1. Уводна разматрања,
2. Теоријске основе котрљајних лежаја,
3. Преглед и анализа стања у предметној научној области,
4. Анализа утицаја оштећења на радне карактеристике и динамичко понашање котрљајних лежаја,
5. Примена методе коначних елемената (МКЕ) за одређивање радних карактеристика кугличних котрљајних лежаја,
6. Експериментална испитивања,
7. Методологија за анализу вибрација кугличног котрљајног лежаја,
8. Закључна разматрања.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу докторске дисертације представљена су уводна разматрања о теми дисертације. Дефинисани су предмет и научни циљеви истраживања, постављене су основне научне хипотезе и истакнут очекивани научни допринос истраживања, уз могућност практичне примене очекиваних резултата. Осим тога, указано је на значај тачне процене радног века котрљајног лежаја, у циљу избегавања непланираних застоја система, а тиме и великих енергетских и финансијских губитака. У наставку је дат преглед дисертације по поглављима, са кратким освртом на садржај сваког појединачног поглавља.

У другом поглављу – *Теоријске основе котрљајних лежаја*, дат је кратак хронолошки преглед развоја лежаја. Извршена је класификација лежаја према правцу деловања силе, облику котрљајних тела и др. и описана геометрија котрљајног лежаја. У наставку поглавља, дати су обрасци за израчунавање контактних напона и деформација, на основу *Hertz*-ове теорије контактних напрезања и расподеле оптерећења на котрљајна тела, као важних параметара понашања котрљајних лежаја. Детаљно су описане карактеристике

вибрација лежаја - амплитуда и фреквенција, као главни показатељи њиховог динамичког понашања.

У трећем поглављу – *Преглед и анализа стања у предметној научној области* извршена је детаљна анализа стања истраживања у области динамичког понашања котрљајних лежаја, кроз анализу и синтезу литературе која се односи на проучавање утицаја најважнијих конструкционих параметара на динамичко понашање и генерисање структурних вибрација котрљајних лежаја, као што су број котрљајних тела, радијални зазор, контактни напони и деформације, геометријске несавршености, неравномерност расподеле оптерећења. Поред тога, посебно су предочени литературни наводи у којима се анализирају утицаји различитих видова оштећења лежаја на њихово динамичко понашање. Кроз приказ коришћене литературе, у овом поглављу је истакнута важност примене адекватних нумеричких и експерименталних метода за анализу динамичког понашања и генерисања структурних вибрација лежаја.

У четвртном поглављу – *Анализа утицаја оштећења на радне карактеристике и динамичко понашање котрљајних лежаја*, наведени су узроци појаве оштећења лежаја (неадекватно подмазивање, преоптерећење, неодговарајућа радна средина, прегревање и др), која могу утицати на повећање нивоа вибрација и смањење носивости и осталих радних карактеристика лежаја. Такође, на основу доступне литературе, дефинисан је фактор оштећења као однос апсолутне вредности максималне амплитуде вибрација котрљајног лежаја са оштећењем и апсолутне вредности амплитуде вибрација неоштећеног лежаја.

У петом поглављу – *Примена Методе Коначних Елемената (МКЕ) за одређивање радних карактеристика кугличних котрљајних лежаја*, приказан је поступак нумеричког решавања математичког модела котрљајног лежаја Методом коначних елемената. У оквиру нумеричког моделирања котрљајног једноредног кугличног лежаја, развијен је универзални модел и примењен на лежај типа 6206. Као улазни параметри за нумерички прорачун дефинисане су карактеристике материјала и контактних елемената. За валидацију добијених нумеричких резултата раванског модела искоришћени су резултати експерименталних испитивања из литературе.

Након тога, поступак нумеричких симулација је поновљен и за два просторна модела – један модел лежаја са оштећењем у облику жлеба и други са оштећењем у облику конуса на стази котрљања прстена лежаја.

На основу нумеричке симулације, добијена је зависност напонског стања од оптерећења лежаја, за различите облике и димензије оштећења на стази котрљања унутрашњег прстена, која је такође приказана у овом поглављу. У овом поглављу је приказан преглед резултата добијених Методом Коначних Елемената, односно померање у правцу у-осе (за задато спољашње оптерећење) и преглед еквивалентних напона $\sigma_{VonMises}$.

У шестом поглављу – *Експериментална испитивања*, приказан је поступак експерименталног испитивања извршеног на пробном столу за анализу динамичког понашања котрљајног лежаја. Такође, детаљно је описана лабораторијска инсталација и мерна опрема. Испитивани су куглични котрљајни лежаји са радијални додиром – са оштећењима у облику конуса различитих димензија на стази котрљања унутрашњег прстена. Након тога, приказани су резултати обављених експерименталних испитивања.

Описани су трендови промене посматраних величина и дата објашњења за одговарајуће промене карактеристика котрљајних лежаја. На основу експерименталних резултата, добијен је фактор оштећења за различите интензитете оптерећења.

У овом поглављу извршено је и поређење експерименталних резултата испитивања на пробном столу за динамичко испитивање котрљајних лежаја и резултата добијених нумеричким прорачуном. Компаративна анализа наведених резултата је показала висок степен поклапања у погледу карактера промене напонског и деформационог стања.

У седмом поглављу – *Методологија за анализу вибрација кугличног котрљајног лежаја*, дефинисан је математички модел динамичког понашања котрљајног лежаја без оштећења и са оштећењем на стази котрљања. Циљ развоја оваквог модела је успостављање корелације између улазних и излазних параметара радне способности котрљајних лежаја. Уведен је и нови коефицијент нелинеарности услед оштећења q који је дефинисан на основу итеративног поступка. Уведени коефицијент зависи од димензија оштећења, локалне контактне деформације и расподеле спољашњег оптерећења на котрљајним телима.

У осмом поглављу докторске дисертације – *Закључна разматрања*, представљени су закључци истраживања са критичким освртом на остварене резултате спроведених експерименталних испитивања и нумеричких симулација. Истакнут је научни допринос дисертације, као и значај добијених резултата са могућностима њихове практичне примене. Предложени су и могући правци даљих истраживања у предметној области.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација „Утицај оштећења стаза котрљања на радне карактеристике кугличних котрљајних лежаја“ кандидата Наташе Солдат, дипл.инж.маш. представља савремен и оригиналан научни рад. У докторској дисертацији је приказан преглед стања истраживања утицаја различитих видова оштећења лежаја на радне карактеристике и динамичко понашање котрљајних лежаја – као једне од његових најважнијих радних карактеристика. Увођењем новог фактора оштећења, дефинисаног као однос апсолутне вредности максималне амплитуде вибрација котрљајног лежаја са оштећењем и апсолутне вредности амплитуде вибрација лежаја без оштећења, као поузданог параметра за предвиђање и процену стања било ког типа котрљајних лежаја, дат је оригинални допринос пољу истраживања која се односе на проблематику оштећења кугличних котрљајних лежаја и њиховог утицаја на радне карактеристике.

Уведени фактор се може примењивати у инжењерској пракси за програмирање и развој комерцијално прихватљивог система за континуирани надзор котрљајних лежаја и доношење одлука о њиховом одржавању, као саставног дела потпуне дигитализације производних система.

Такође, експериментално верификован нумерички модел кугличног котрљајног лежаја представља значајан резултат ове докторске дисертације јер његова примена омогућава и олакшава наставак рада у области анализе оштећења котрљајних лежаја.

3.2. Осврт на референтну коришћену литературу

Прегледом коришћене литературе може се закључити да је кандидат располагао значајним референцама које се баве оштећењем кугличних котрљајних лежаја, на основу

којих је дефинисао циљеве истраживања саме дисертације. Велики број литературних извора објављен у најскорије време говори о актуелности истраживања динамичког понашања котрљајних лежаја. Кандидат је, кроз објављивање резултата свог рада у међународним и домаћим часописима и конференцијама, упознао стручну и научну јавност са резултатима својих истраживања.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У докторској дисертацији су коришћене савремене научно - истраживачке методе и технике истраживања:

- *метода анализе и синтезе*, која је омогућила систематизацију постојећих сазнања о објекту истраживања из стручне литературе (резултати, практична, научна, техничка и друга достигнућа),
- *аналитичка метода*, за извођење израза за добијање зависности оштећења стаза котрљања лежаја (која се на њима јављају током експлоатације) и основних радних перформанси лежаја,
- *нумеричка анализа применом Методе Коначних Елемената*, коришћена за прорачун деформација и напонског стања делова лежаја, и то: котрљајних лежаја без оштећења и са оштећењима на стазама котрљања,
- *експериментална метода*, за практично испитивање утицаја димензија оштећења на стазама котрљања на вибрације лежаја,
- *метода компарације*, за поређење резултата добијених применом нумеричких метода за решавање напонског и деформационог стања делова лежаја са резултатима добијеним у лабораторијским условима.

У оквиру докторске дисертације, за потребе нумеричких симулација коришћен је софтверски пакет Ansys APDL, а за обраду аналитичко-нумеричких и експерименталних резултата програмски пакет MATLAB.

3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати докторске дисертације, поред великог значаја у научно-истраживачкој области, поседују и могућност широке инжењерске примене – при којој ће се, на основу развијених алгоритама и процедура, сличне методологије примењивати на осталим машинским системима. У том смислу, дефинисање новог индикатора оштећења стаза котрљања лежаја је од велике практичне користи.

Главни резултат ове дисертације је нова методологија за одређивање вибрација кугличних котрљајних лежаја, којом се предлаже нови поједностављени поступак, заснован на савременим аналитичко-нумеричким методама, за израчунавање фактора оштећења K_v који може послужити за програмирање система за стални надзор котрљајних лежаја. Такође, резултат дисертације је и увођење новог коефицијента нелинеарности услед оштећења q који зависи од димензија оштећења, локалне контактне деформације и расподеле спољашњег оптерећења на котрљајним телима.

Развој експериментално верификованог аналитичко-нумеричког модела за анализу утицаја оштећења на динамичко понашање котрљајних лежаја у значајној мери доприноси дијагностификовању смањене носивости лежаја и правремене замене или прилагођавања радних услова да би се избегао превремени отказ.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је током израде докторске дисертације показао да је у стању да самостално решава проблеме и успешно влада савременим научним сазнањима и методама, што представља основу за даљи научноистраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Научни допринос кандидата је успостављање методологије за анализу вибрација кугличног котрљајног лежаја, у оквиру које је дефинисан математички модел динамичког понашања котрљајног лежаја, што је приказано у поглављу 7 дисертације – *Методологија за анализу вибрација кугличног котрљајног лежаја* на странама 106 – 109, и објављен у раду: **Soldat N.**, Mitrović R., Atanasovska I., Tomović R.: *A methodology for analyzing radial ball bearing vibrations*, Transactions of FAMENA, ISSN 1333-1124, doi:10.21278/TOF.44102, Published by: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Croatia, Volumen 44, No.1, 2020., pp.13-28, категорије **M23**, са **IF: 0.580** тј. 123/130 у области Engineering, Mechanical, и доступан на е-адреси: https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=343991

Поред тога, у дисертацији су остварени и остали очекивани доприноси, пре свега:

У оквиру развијене методологије уведени су и дефинисани: фактор оштећења K_v , који може послужити за програмирање система за надзор котрљајних лежаја, и коефицијент нелинеарности услед оштећења q који зависи од димензија оштећења, локалне контактне деформације и расподеле спољашњег оптерећења на котрљајним телима лежаја (странице дисертације 30 и 109 – 111), што је делимично публиковано у раду: Mitrović R., Atanasovska I., **Soldat N.**, Mišković Ž.: *New trends in machine design within industry 4.0 framework*, Book series: Lecture Notes in Mechanical Engineering, Publisher: Springer Nature Switzerland, 2020, Editors: Lihui Wang, Dimitris Mourtzis, Giovanni Moroni, Vidosav D. Majstorovic, Emanuele Carpanzano, Luigi Maria Galantucci (Proceedings of 5th International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing – AMP 2020), ISSN 2195-4356, ISBN 978-3-030-46211-6, doi: 10.1007/978-3-030-46212-3_16, pp.227-238 и предато за публикавање (налази се у другом кругу рецензије у часопису ASME Journal of Mechanical Design - M22). Ови фактори представљају добру основу за развој једног општијег модела за прорачун граничних вредности оштећења стаза котрљања које доводе до смањења ефикасности машинског система у који је лежај уграђен, чиме би се избегла појава превременог отказа лежаја, односно, продужење његовог радног века кориговањем радног оптерећења.

Такође, треба истаћи и друге резултате научноистраживачког рада који су остварени у оквиру дисертације, а пре свега:

- Развијен је и резултатима сопствених експерименталних испитивања верификован тродимензионални нумерички модел кугличног котрљајног лежаја са оштећењем на стази котрљања унутрашњег прстена. Применом овог нумеричког модела спроведена је анализа напонског и деформационог стања и расподеле оптерећења на котрљајна тела.
- Постављен је математички модел зависности радних карактеристика лежаја од димензија и облика оштећења стаза котрљања.

- Развијен је аналитички модел за анализу динамичког понашања котрљајног лежаја у виду једначине кретања котрљајног лежаја у функцији времена. Решавање једначина аналитичког модела извршено је нумеричким поступком. Најважнија излазна карактеристика оваквог модела је спектар вибрација посматраног склопа. Приказани аналитички модел за симулацију и анализу динамичког понашања котрљајног лежаја омогућава успостављање зависности између конструкционих и експлоатационих параметара лежаја са једне стране и параметара који дефинишу исправан рад котрљајног лежаја са друге.
- Приказан је поступак одређивања критичне величине оштећења стаза котрљања која доводи до смањења ефикасности система у који је котрљајни лежај уграђен. Доказано је да је поређењем параметара рада исправног котрљајног лежаја са параметрима граничне вредности оштећења стаза котрљања могуће извршити процену радног века котрљајног лежаја и на тај начин избећи изненадне застоје целог машинског система, праћене великим енергетским и материјалним губицима.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

На основу прегледа постојећих решења и релевантне литературе из научне области докторске дисертације, констатујемо да су приказани резултати истраживања предметне дисертације значајни, како са аспекта теоријског истраживања, тако и са становишта практичне примене. Развијен и експериментално верификован аналитичко-нумерички модел омогућава успостављање зависности различитих димензија и облика оштећења и радне исправности лежаја, од које зависи функционалност и ефикасност целокупног машинског система. Осим тога, дефинисање новог фактора оштећења стаза котрљања лежаја, као основе поуздане методе за праћење њиховог стања и радних карактеристика, поседује велики потенцијал за практичну примену.

4.3. Верификација научних доприноса

Научни допринос докторске дисертације кандидата Наташе Солдат, наведен у тачки 4.1 верификован је следећим радом, где је кандидат први аутор и једини аутор без доктората:

1. **Soldat N.**, Mitrović R., Atanasovska I., Tomović R.: *A methodology for analyzing radial ball bearing vibrations*, Transactions of FAMENA, ISSN 1333-1124, doi:10.21278/TOF.44102, Published by: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Croatia, Volumen 44, No.1, 2020., pp.13-28. Категорија **M23**, (IF: **0.580**), Engineering, Mechanical (123/130)
https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=343991

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу детаљног прегледа докторске дисертације, Комисија за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације констатује да се докторска дисертација под називом: „Утицај оштећења стаза котрљања на радне карактеристике кугличних котрљајних лежаја“ кандидата Наташе Солдат, дипл. маш. инж., прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду. На основу резултата и закључака приказаних у докторској дисертацији,

Комисија констатује да је Наташа Солдат, успешно завршила докторску дисертацију у складу са предвиђеним предметом и постављеним циљевима истраживања, а да докторска дисертација под називом: „Утицај оштећења стаза котрљања на радне карактеристике кугличних котрљајних лежаја“ представља оригиналан научни рад са научним доприносом у области машинства.

У Београду, 04.12.2020. године

Чланови Комисије:

др Радивоје Митровић, редовни професор
Универзитет у Београду – Машински факултет

др Ивана Атанасовска, научни саветник
Математички институт САНУ

др Божидар Росић, редовни професор
Машински факултет Универзитета у Београду

др Жарко Мишковић, доцент
Машински факултет Универзитета у Београду

др Радослав Томовић, ванредни професор
Машински факултет Универзитета Црне Горе