

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ		
<p>1. Датум и орган који је именовao комисију: Решењем бр. 012-199/55-2022 од 21.07.2022. године, на основу Одлуке Наставно-научног већа Факултета техничких наука, а у складу са Статутом Факултета техничких наука, Декан Факултета техничких наука именовao је Комисију за оцену и одбрану докторске дисертације</p>		
<p>2. Састав комисије у складу са <i>Правилима докторских студија Универзитета у Новом Саду</i>:</p>		
1. Антић др Ацо	редовни професор	Машине алатке, технолошки системи и аутоматизација поступака пројектовања, 2020
презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду		председник
установа у којој је запослен-а		функција у комисији
2. Живановић др Саша	редовни професор	Производно машинство, 2020
презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
Машински факултет, Универзитет у Београду		члан
установа у којој је запослен-а		функција у комисији
3. Милошевић др Мијодраг	ванредни професор	Технолошки процеси, техноeкономска оптимизација и виртуелно пројектовање, 2017
презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду		члан
установа у којој је запослен-а		функција у комисији
4. Бикић др Сениша	ванредни професор	Механика флуида, хидропнеуматска, гасна и нафтна техника, 2019
презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду		члан
установа у којој је запослен-а		функција у комисији
5. Илић др Војин	ванредни професор	Аутоматика и управљање системима, 2018
презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду		члан
установа у којој је запослен-а		функција у комисији
6. Живковић др Александар	ванредни професор	Машине алатке, технолошки системи и аутоматизација поступака пројектовања, 2018
презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду		ментор
установа у којој је запослен-а		функција у комисији

<p>II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ</p>
<ol style="list-style-type: none"> 1. Име, име једног родитеља, презиме: Милош, Синиша, Кнежев 2. Датум рођења, општина, држава: 07.07.1991., Зрењанин, Србија 3. Назив факултета, назив претходно завршеног нивоа студија и стечени стручни/академски назив: Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, Производно машинство, рачунаром подржане технологије, Мастер инжењер машинства 4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија: 2015. година Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука Машинско инжењерство
<p>III НАСЛОВ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:</p>
<p>МОДЕЛОВАЊЕ ТОПЛОТНО-МЕХАНИЧКОГ ПОНАШАЊА ВИСОКОБРЗИНСКОГ МОТОР-ВРЕТЕНА МАШИНА АЛАТКИ</p>
<p>IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:</p>
<p>Навести кратак садржај са назнаком броја страница, поглавља, слика, схема, графикона и сл.</p>
<p>Докторска дисертација кандидата <i>Мсц. Милаша Кнежева</i>, под насловом "Моделовање топлотно-механичког понашања високобрзинског мотор- вретена машина алатки" садржи 186 нумерисаних страница, са 231 графичких илустрација у виду скица и дијаграма, 59 табела са нумеричким подацима и 138 литературна наслова. Испред основног дела текста, у раду су дати: наслов рада, кључна документацијска информација, садржај рада, списак слика, списак табела и списак коришћених ознака.</p> <p>Истраживања реализована у оквиру докторске дисертације су приказана кроз девет поглавља. У наставку се даје садржај рада са назнаком броја страна сваког поглавља.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Увод (<i>6 страна</i>) • Приказ досадашњих истраживања понашања високобрзинских мотор-вретена (<i>32 стране</i>) • Карактеризација топлотних извора и понора мотор-вретена (<i>6 страна</i>) • Експериментално испитивање топлотно-механичког понашања мотор-вретена (<i>36 страна</i>) • Математички модел склопа високобрзинског мотор-вретена (<i>39 страна</i>) • Приказ резултата експерименталног испитивања (<i>17 страна</i>) • Анализа резултата математичког моделовања топлотно-механичког понашања мотор-вретена (<i>37 страна</i>) • Закључак (<i>6 страна</i>) • Литература (<i>7 страна</i>)
<p>V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:</p>
<p>Наслов докторске дисертације указује на садржај истраживања и истиче предмет истраживања.</p> <p>У <i>првом поглављу</i>, УВОД, полази се од значаја машина алатки у укупној металопрађивачкој индустрији, констатује се непрекидан развој техничких карактеристика истих. Указује се на чињеницу да је понашање машине алатке у експлоатацији условљено понашањем одговарајућих склопова. Такође, констатује се велики утицај склопа мотор-вретена на топлотно-механичко понашање. Поред тога, инстакнуто је да топлотне, статичке и динамичке особине машина алатки треба предвидети већ у фази пројектовања.</p> <p><i>Текст у оквиру овог поглавља је делом резултат сазнања из литературе, а делом сопствених погледа на разматрању проблематику.</i></p>

У оквиру *другог поглавља*, ПРИКАЗ ДОСАДАШЊИХ ИСТРАЖИВАЊА ПОНАШАЊА ВИСОКОБРЗИНСКИХ МОТОР-ВРЕТЕНА, детаљно се указује на склоп главног вретена, како са функционалног, тако и са конструкционог аспекта, те дефинишу основни захтеви који се пред исти постављају. На основу тога истраживање је усмерено у правцу топлотно-механичког понашања и у оквиру овог поглавља се приказују одређени математички моделе за анализу посматраног понашања. Указује се и на велики утицај конструкционих параметара на пораст температуре, а тиме и на преднапрезање лежишта, као и на крутост главног вретена. На основу анализе најновијих литературних извора, приказују се резултати досадашњих истраживања, где се запажа и увођење сила инерције и контактне проводљивости, као и примена Тимошенкове теорије греде. Осим линеарне теорије, указује се и на примену, γ у најновијим истраживањима, нелинеарне теорије, при чему се углавном разматра геометријска нелинеарност. На крају се, имајући у виду досадашња истраживања код нас и у свету и постигнуте резултате, дефинише предмет и циљ истраживања докторске дисертације.

Већи део овог поглавља је резултат систематске анализе истраживања која се реализују у свету. На основу извршене систем анализе досадашњих истраживања динамичког и топлотног понашања, кандидат је поставио оригиналну концепцију истраживања у оквиру докторске дисертације и дефинисао хипотезе.

У *трећем поглављу*, КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ТОПЛОТНИХ ИЗВОРА И ПОНОРА МОТОР-ВРЕТЕНА, је дат кратак приказ топлотних појава код машина алатки базирајући се на топлотне изворе и поноре. У овом поглављу је приказана веза између продуктивности, тачности и потрошње енергије, те се констатује да потрошња енергије расте пропорционално са продуктивношћу, а смањим тим долази и до веће количине генерисане топлоте која се развија на покретним елементима машине алатке. Такође, је приказан и утицај топлотних извора и понора на склоп главног вретена као и значај истраживања ових појава. На крају се анализирају видови преноса топлоте код мотор-вретена.

Први део овог поглавља је резултат анализе досадашњих истраживања. Други део представља дефинисање топлотних извора и понора код мотор-вретена на бази сопствених погледа на разматрану проблематику.

Четврто поглавље, ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСПИТИВАЊЕ ТОПЛОТНО-МЕХАНИЧКОГ ПОНАШАЊА МОТОР-ВРЕТЕНА, се односи на експериментална истраживања високобрзинског мотор-вретна улежиштеног једноредним кугличним лежиштима са косим додиром. Приказано је развијено конструкционо решење и експериментални штанд за идентификацију динамичког и топлотно-еластичног понашања мотор-вретена. Експериментални штанд је пројектован као модуларни систем стога, се може користити за експерименте на различитим мотор-вретенима. Испитавања су вршена на високобрзинском мотор-вретену GMN TSSV 100-90000 са максималним бројем обртаја $n=90000$ [o/min], снаге $P=3$ [kW], 2-полни АС индуктивни електро мотор, максимално $U=220$ [V] по фази на максималној фреквенцији, средњи пречник предњег лежаја 20 [mm]. Хлађење и подмазивање уље-ваздух (притисак довода ваздуха $0,5$ bar) се врши, убризгавање уља $Q_l=3,12 - 4,72$ [ml/min] за све лежаје истовремено. Кроз жљеб око статора протиче уље или вода са протоком чији опсег износи $Q_k=4 - 6$ [l/min]. За прикупљање и обраду података коришћена је савремена рачунарска опрема и одговарајући програмски систем. При идентификацији топлотно-еластичног понашања, и у случају експерименталног испитивања, посматране су деформације врха вретена само услед топлотног оптерећења, без дејства спољашњег оптерећења. Испитивање топлотног понашања је обухватило одређивање пораста температура на три карактеристична места на кућишту: у близини предњег улежиштења, у близини статора и у близини задњег улежиштења. Поред тога, применом термовизијске камере су идентификована температурна поља на мотор-вретену за различите експлоатационе услове. При испитивању динамичког понашања посматране су вибрације мотор-вретена помоћу давача убрзања с једне стране. С друге стране, извршено је испитивање сопствених фреквенција слободно ослоњеног мотор-вретена. Наведена испитивања су спроведена за различите бројеве обртаја и услове хлађења. Такође, у овом поглављу је приказан дефинисани план експеримента (централно композитни дизајн) са нивоима и распонима за три нумеричка (квантитативна) фактора: број обртаја, проток расхладног флуида и проток уљне магле и једним категоријским (квалитативним), врста хлађења, (уље и вода). При овом експерименту је направљено шест понављања у средишњој тачки, за сваки ниво категоријског фактора, односно, две реплике за сваки ниво категоријског фактора у сваком блоку. Након спроведених експеримената примењен је модел најмањих квадрата у сврху процене параметара полинома. При анализама је извршена линеарна и квадратна апроксимација

експерименталних резултата и установљена је боља адекватност квадратног модела (модел другог реда) са јако малом (несигнификантном) грешком, p вредност *lack of fit* је много већа од постављеног прага значајности $\alpha=0,05$. На крају овог поглавља се приказује упоредна анализа температура измерних експерименталним испитивањима и температура одређених регресионим, једначинама на бази постављеног плана експеримента. На бази плана експеримента одређене су регресионе једначине за предвиђање температура, при чему је утврђена адекватност постављеног модела која је износила око 99%. Температуре одређене регресионим релацијама се разликују од измерених за око 2% што представља задовољавајуће поклапање резултата.

Проблематика изложена у оквиру овог поглавља, представља оригинални допринос испитивању понашања мотор-вретена на специјално пројектованом и израђеном експерименталном штанду, за различите услове експлоатације. Такође је и постављен оригинални план експеримента применом централно композитног дизајна у оквиру методологије одзивних површина. Приказани план експеримента са дефинисаним регресионим једначинама представљају оригинални допринос аутора.

У петом поглављу, МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ СКЛОПА ВИСОКОБРЗИНСКОГ МОТОР-ВРЕТЕНА, је дефинисан математички топлотно-механички модел склора високобрзинског мотор-вретена, у складу са постављеним циљем истраживања. С обзиром на велики број параметара укључених у анализу понашања склопа високобрзинског мотор-вретена, који су међусобно повезани, модел главног вретена (вретено – лежаји - кућиште) је подељен на пет међусобно повезаних под-модела. Модел лежаја служи за одређивање сила контакта, контактних површина између котрљајних тела и стаза котрљања и крутости лежаја за сваку позицију котрљајног тела. Модел лежај-вретено служи за одређивање генерисане топлоте у лежајима на бази контактних сила у лежају и спољашњег оптерећења, и развијене топлоте у статору и ротору вретена Поред тога преко овог модела се одређује пренос топлоте, односно, дефинишу коефицијенти провођења и преношења топлоте са елемената мотор-вретена. На топлотном 2Д моделу базираном на методи коначних елемената одређује се нестационарна промена температурних поља. Овај поступак се итеративно наставља до стационарног температурног стања, јер промене температуре након тога, постају занемарљиве. Након овога, се поново одређују контактне силе, углови контакта, као и крутост за свако котрљајно тело као последица топлотног ширења. На бази температура елемената лежаја се одређују топлотна ширења елемената лежаја. У последњој фази се на основу резултата добијених у претходним фазама, анализира статичко и динамичко понашање високобрзинског мотор-вретена за различите брзине обртања и услове хлађења на бази методе коначних елемената. У оквиру математичког модела, дате су основне теоријске подлоге на бази којих су модели развијени.

Развијени математички модел високобрзинског мотор-вретена представља оригинални допринос кандидата.

У оквиру шестог поглавља, ПРИКАЗ РЕЗУЛТАТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОГ ИСПИТИВАЊА, су приказане анализе утицаја појединих параметара као што су: количина протока расхладног средства кроз кућиште, врста расхладног средства, количина протока уљне магле за хлађење и подмазивање лежаја на топлотно-механичко понашање мотор вретена. Посебно се приказују резултати топлотног понашања, топлотно-еластичног и динамичког понашања за различите бројеве обртаја и услове хлађења како статора тако и лежаја. Мерење температура, померања и вибрација извршено је за опсег бројева обртаја од 40000 [o/min] до 70000 [o/min]. При овоме је вариран проток флуида (вода и уље) од 4 [l/min] до 6 [l/min], као и проток уљне магле од: 187,2[ml/h]; 235,2 [ml/h] и 283,2[ml/h]. Приказано је више од 40 експерименталних резултата како би се верификовале регресионе једначине и утицајни параметри дефинисани планом експеримента, као и да би се верификовао математички модел.

Приказани резултати представљају оригинални допринос аутора. На основу приказаних табеларних резултата, графичких илустрација, може се констатовати да је дискусија резултата јасна и недвосмислена, те не доводи у сумњу приказане резултате и закључке до којих је аутор дошао при анализи експерименталних испитивања.

Седмо поглавље, АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА МАТЕМАТИЧКОГ МОДЕЛОВАЊА ТОПЛОТНО-МЕХАНИЧКОГ ПОНАШАЊА МОТОР-ВРЕТЕНА, садржи резултате добијене на бази математичког моделовања како у развијеном програмском решењу, тако и применом програмског система опште

намене који се базира на методи коначних елемената. Применом ових решења извршена је анализа топлотно-механичког понашања мотор-вретена. Верификација математичког модела лежаја је извршена поређењем са каталожним вредностима водећих произвођача лежаја за различита преднапрезања. При идентификацији топлотног понашања на основу резултата рачунарског моделирања, посматран је пораст температуре, а затим је на основу температурног поља одређен пораст преднапрезања лежишта услед топлотног оптерећења. При анализи еластичног понашања склопа, одређене су деформације и крутост врха вретена услед топлотних оптерећења, и услед дејстава спољашњих сила. Код анализе динамичког понашања одређене су сопствене фреквенције слободно ослобоног вретена и улежиштеног мотор-вретена, као модални параметри мотор-вретена. На крају се анализира утицај температура на статичке и динамичке карактеристике разматраног мотор-вретена. Поред тога, на крају овог поглавља је приказано поређење резултата експерименталних испитивања и математичког моделовања. Поређењем резултата топлотног понашања мотор вретена се може закључити да грешка износи од 1 до 28% у зависности од броја обртаја. Грешка између резултата математичког моделовања и експерименталног испитивања при еластичном понашању износи од 2 до 21% у правцу X осе и од 1 до 21% у правцу Y осе. Поређењем вредности сопствених фреквенција може се уочити да одступање између фреквенција одређених МКЕ моделовањем и експерименталним испитивањем, на првом моду износи 1,2%, који је уједно и најдоминантнији, док је на другом моду само 0,8%.

Приказани резултати представљају оригинални допринос аутора. На основу приказаних табеларних резултата и дијаграма, може се констатовати да је дискусија резултата јасна и прецизно изложена, те не доводи у сумњу приказане резултате и закључке до којих је аутор дошао при анализи резултата математичког моделовања. На основу приказаних резултата у овом поглављу, може се закључити да МКЕ моделовање даје задовољавајуће резултате топлотно-механичког понашања разматраног високобрзинског мотор-вретена.

У осмом поглављу, ЗАКЉУЧАК, су дати закључци, на основу резултата појединих сегмената и изведених истраживања у целини. Посебно су приказани закључци везани за топлотно, статичко и динамичко понашање мотор-вретена, како при експерименталном испитивању, тако и при математичком моделовању. Такође су приказани закључци везани за међусобни утицај разматраних параметара као што су: утицај температуре на преднапрезање и крутост лежаја, утицај температуре на крутост врха главног вретена, утицај температуре на сопствене фреквенције главног вретена, утицај броја обртаја на статичке, топлотне и динамичке карактеристике разматраног мотор-вретена. Након тога, дати су неки од праваца будућих истраживања.

У оквиру овог поглавља кандидат је јасно сумирао резултате до којих је дошао током истраживања, на основу парцијалних резултата појединих сегмената и изведених истраживања у целини. Приказани закључци и правци будућих истраживања су оригинални.

Девето поглавље, ЛИТЕРАТУРА, садржи преглед коришћених 138 литературних наслова, груписаних по редоследу цитирања. У самом раду су цитирани сви наведени литературни наслови.

VI СПИСАК НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КОЈИ СУ ОБЈАВЉЕНИ ИЛИ ПРИХВАЋЕНИ ЗА ОБЈАВЉИВАЊЕ НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ РАДА НА ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ:

Таксативно навести називе радова, где и када су објављени. Прво навести најмање један рад објављен или прихваћен за објављивање у складу са *Правилма докторских студија Универзитета у Новом Саду* који је повезан са садржајем докторске дисертације. У случају радова прихваћених за објављивање, таксативно навести називе радова, где и када ће бити објављени и приложити потврду уредника часописа о томе.

Радови објављени у међународном часопису (M21)

1. Košarac, A., Mladjenović, C., Zeljković, M., Tabaković, S., **Knežev, M.**: Neural-Network-Based Approaches for Optimization of Machining Parameters Using Small Dataset, *Materials*, 2022, 15(3), 700. <https://doi.org/10.3390/ma15030700>

Саопштење са међународног скупа штампано у целини (M33)

1. **Knežev, M.**, Živković, A., Mladenović, C.: Analysis static and dynamic behavior of hydrodynamic spindle, 12. International Scientific Conference - Flexible Technologies-MMA 2015, Novi Sad, Fakultet tehničkih

nauka, pp. 43-46, 2015, ISBN 978-86-7892-722-5.

2. Živković, A., Zeljković, M., **Knežev, M.**: Thermal model of high speed main spindle, 3th International Scientific conference, Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications - COMETA 2016, University of Sarajevo, Faculty of Mechanical Engineering, East Sarajevo – Jahorina 2016, pp. 215-220, ISBN 978-99976-623-7-8
3. Živković, A., Zeljković, M., **Knežev, M.**, Mijušković, M.: Analysis of static behaviour of the bearing assembly for agricultural mechanization, International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering – DEMI, University of Banja Luka, Faculty of Mechanical Engineering, 26-27th May 2017, pp. 101-108, ISBN 978-99938-39-73-8.
4. **Knežev, M.**, Živković, A., Zeljković, M., Mladenović, C.: Analysis and verification of complex surfacess machining by three axis milling machine center , 13. International Scientific Conference - Flexible Technologies-MMA 2018, Novi Sad, Fakultet tehničkih nauka, pp. 83-86, 2018, ISBN 978-86-6022-094-5
5. Mladenović, C., Košarac, A., Zeljković, M., **Knežev, M.**: Experimental definition of machining systems stability lobe diagram., 13. International Scientific Conference - Flexible Technologies-MMA 2018, Novi Sad, Fakultet tehničkih nauka, pp. 95-98, 2018, ISBN 978-86-6022-094-5
6. **Knežev, M.**, Živković, A., Zeljković, M., Mladenović, C.: Numerical and experimental modal analysis of high speed spindle, Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications - COMETA 2018, University of Sarajevo, Faculty of Mechanical Engineering, East Sarajevo – Jahorina 2018, pp. 83-88, ISBN 978-99976-719-4-3
7. Živković, A., **Knežev, M.**, Zeljković, M., Mijušković, M.: Static analysis of four-point contact ball bearings for agricultural mechanization, International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering – DEMI, University of Banja Luka, Faculty of Mechanical Engineering, 24-25th May 2019, pp. 43-50, ISBN 978-99938-39-85-9.
8. Živković, A., **Knežev, M.**, Zeljković, M., Navalušić, S., Dana Beju, L.: A study of thermo-elastic characteristics of the machine tool spindle, International Conference on Manufacturing Science and Education – MSE, „Lician Blaga“ University of Sibiu, Sibiu, Romania, MATEC Web of Conferences 290, 01009, doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929001009>
9. Živković, A., Bojanić Šejat, M., Rackov, M., Knežević, I., **Knežev, M.**: State and developing trend in four-point contact ball bearing, Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications - COMETA 2020, University of Sarajevo, Faculty of Mechanical Engineering, East Sarajevo – Jahorina 2020, pp. 347-357, ISBN 978-99976-719-8-1
10. **Knežev, M.**, Zeljković, M., Mladenović, C., Smajić, H., Stekolschik, A., Živković, A.: Effects of various fluid flow on temperature of an angular contact ball bearings in motorized spindle, International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering – DEMI, University of Banja Luka, Faculty of Mechanical Engineering, 28-29th May 2021, pp. 102-106, ISBN 978-99938-39-92-7.
11. Smajić H., **Knežev M.**, Stekolschik A., Zivkovic A.: High Speed Spindle Simulation Using Multibody Siemens NX MCD, Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering, KOD 2021, Mechanisms and Machine Science, vol 109. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-88465-9_61

Радови у часопису националног значаја (M52)

1. **Knežev, M.**, Živković, A., Mladenović, C.: Analysis static and dynamic behavior of hydrodynamic spindle, Journal of Production Engineering, Faculty of Technical Sciences, Department of Production Engineering , Volume: 19, No. 1, pp. 53-56, 2016, ISSN: 1821- 4932.
2. **Knežev, M.**, Živković, A., Mladenović, C.: Internal geometry optimization of angular contact ball bearings, Machine Design, Vol.9, No. 4, 2017, Serbia, pp. 139-144, ISSN 1821-1259.
3. Živković, A., **Knežev, M.**, Zeljković, M., Bojanić Šejat M., Mijušković, M., Navalušić, S.: Analysis static behaviour of ball bearings with two and four contact points, Machine Design, Vol.11, No. 4, 2019, Serbia, pp. 131-134, ISSN 1821-1259.

Радови у националном часопису (M53)

1. Živković, A., Zeljković, M., **Knežev, M.**: Thermal model of high speed main spindle, Acta Technica Corviniensis, Vol. 10, No. 2, (2017), pp. 103-106, ISSN 2067-3809.

VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА:

На основу свеобухватне и детаљне анализе досадашњих истраживања понашања главних вретена, у раду су постављене следеће хипотезе:

- радијална крутост врха вретена опада са порастом броја обртаја и расте са повећањем температура на елементима склопа главног вретена;
- повећањем преднапрезања, повећавају се сопствене фреквенције, а опадају амплитуде осциловања главног вретена;
- температуре елемената главног вретена утичу на промену сопствених фреквенција;
- хлађење кућишта мотор-вретена водом има мање топлотно загревање него када је хлађење истог уљем;
- проток средства за хлађење кућишта има утицај на топлотно-механичко понашање мотор-вретена;
- количина средства за хлађење и подмазивање лежаја има утицај на топлотно-механичке карактеристике вретена;
- развијени математички модели за анализу топлотно-механичког понашања мотор-вретена, могу се поуздано користити за предикцију понашања мотор-вретена вретена у експлоатацији;

Имајући у виду резултате изложене у раду, може се констатовати да је кандидат потврдио постављене хипотезе. Анализом резултата статичког понашања лежаја са којима је улежиштено разматрано мотор-вретено се може закључити да се аксијална и радијална крутост лежаја значајно повећава са повећањем преднапрезања. Повећањем преднапрезања лежаја са малог на средње смањују се померања врха вретена за 28%, док при повећању преднапрезања са малог на велико доводи до смањења померања врха вретена за 31%. Повећањем преднапрезања са малог на средње, доводи до повећања радијалне крутости лежаја за 34% што на крају повећава радијалну крутост врха вретена за 27%. Даљим повећањем преднапрезања, повећава се радијална крутост лежаја за 22%, при чему се крутост врха вретена повећава за 32%. У нестационарном стању, при повећању броја обртаја контактна оптерећења се повећавају у односу на стационарно стање. Повећава се контактна оптерећење и са спољашњом и са унутрашњом стазом котрљања. Поред тога, угао контакта расте са унутрашњом стазом, док са спољашњом стазом опада у односу на стационарно стање. Пошто долази до раста контактних оптерећења са обе стазе котрљања, контактна крутост спољашње и унутрашње стазе опадају порастом броја обртаја што доводи до неравномерне расподеле крутости у зависности од позиције котрљаних тела. Повећањем броја обртаја, повећава се интензитет сила инерције, што ће условити повећање разлике угла контакта са унутрашњом и спољашњом стазом котрљања, при чему долази до опадања крутости у свим правцима. Услед тога, долази и до смањења крутости врха главног вретена. Повећањем броја обртаја за 20% (40000 [o/min] на 50000 [o/min]) смањује радијалну крутост лежаја за 6% што доводи до смањења радијалне крутости врха вретена за 5%, док повећање броја обртаја за 42% смањује крутост лежаја за 47% што доводи до смањења радијалне крутости врха вретена за 20% при малом преднапрезању. При средњем преднапрезању повећањем броја обртаја за 42% изазива смањење радијалне крутости лежаја за 32,2% што на крају доводи до смањења радијалне крутости врха вретена за 18%. Код великог преднапрезања, повећање броја обртаја за 42% смањује радијалну крутост лежаја за 30% што доводи до смањења радијалне крутости врха вретена за 15%. При разматрању улежиштеног мотор-вретна посматран је утицај крутости лежаја на сопствене фреквенције. На основу приказаних резултата се може закључити да је утицај крутости предњег лежаја на динамичко понашање врха мотор-вретена дефинисано резонантном фреквенцијом и резонантном амплитудом. Према томе, порастом крутости расте резонантна фреквенција, али и опада амплитуда померања. Такође се на основу резултата може констатовати да је амплитуда померања врха вретена у дорезонантној области већа што је већа крутост лежишта, а при фреквенцијама већим од резонантне, амплитуда померања врха вретена је мања што је већа крутост предњег улежиштења. Повећањем крутости лежаја за 42% повећава се прва сопствена фреквенција за 12%, при чему се смањује амплитуда померања врха вретена за 43%. Даљим повећањем крутости лежаја за 38%, прва сопствена фреквенција расте за 9%, а амплитуда померања врха вретена се смањује за 39%. При томе се може запазити врло мали утицај односа крутости у предњем и задњем ослонцу на прве две сопствене фреквенције ($\approx 10\%$), а тек значајнији утицај на трећу (21%). Утицај броја обртаја на сопствене фреквенције мотор-вретена је разматран кроз смањење крутости за различите вредности преднапрезања.

Повећањем броја обртаја на 40000 [o/min] смањује се крутост главног вретена за 10% при чему прва сопствена фреквенција опада за око 4%, друга за 2% и трећа сопствена фреквенција опада за 3,7%. Даљим повећањем на максимални број обртаја (70000 [o/min]) смањује се радијална крутост за 24% при чему долази до смањења прве сопствене фреквенције за 3,8%, односно, за 2,7 друге и око 9% треће сопствене фреквенције.

Из рачунарске и експерименталне анализе се може закључити да су температуре на спољашњој површини спољашњег прстена веће за 3 до 5 [°C] од температуре на спољашњој површини кућишта на месту улежиштења. Такође се може уочити да је температура на статору већа за 11 [°C] (при n=40000 [o/min]) до 19 [°C] (при n=70000 [o/min]) од температура на кућишту у близини статора. При хлађењу кућишта уљем, развијена топлота у електромотору и лежајевима се приближно равномерно распоређује на кућиште и вретено ($\Delta T = 4$ [°C]), с тим да нешто већи део топлоте иде ка задњем улежиштењу преко вретена, док се преко кућишта мањи део топлоте преноси ка предњем улежиштењу. Међутим при хлађењу кућишта водом већа је разлика између температура кућишта и вретена ($\Delta T = 10$ [°C]). Повећање преднапрезања са малог на велико изазива повећање контактних оптерећења за 30% у лежају, што на крају доводи и до повећања количине развијене топлоте у истом за 45% и повећању температура на кућишту у близини предњег лежаја за око 64%. Повећање протока уља са 4 [l/min] на 6 [l/min] смањује температуре на елементима мотор-вретна за око 16%, при n=40000 [o/min] и 30 [%] при n=70000 [o/min] што доводи до смањења померања услед топлотних оптерећења на врху вретена за око 4 [%], односно, за 25 [%]. Слична ситуација је и при хлађењу кућишта водом. У стационарном топлотном стању при n=70000 [o/min] преднапрезање расте са 27 [N] на 46 [N], док при n=40000 [o/min] преднапрезање расте за око 11 [%] у односу на почетну вредност при хлађењу кућишта водом. При хлађењу кућишта уљем на n=70000 [o/min] преднапрезање у стационарном стању износи 71 [N], док при n=40000 [o/min] преднапрезање расте за око 44% у односу на почетну вредност. Крутост врха главног вретена прати тренд пораста преднапрезања и крутости лежаја. Максимални пораст крутости врха вретена је у почетним фазама рада. Како време пролази крутост врха вретена опада и коначно након достизања стационарног температурног стања, крутост врха вретена се практично враћа на своју почетну вредност. У случају узимања у обзир топлотних оптерећења и центрифугалне силе код разматраног главног вретена радијална крутост врха вретена расте за 17 %.

Повећањем броја обртаја на n=70000 [o/min] повећава се радијална крутост услед топлотног преднапрезања за 6% при чему долази до повећања прве и друге сопствене фреквенције за око 1,8 % и треће сопствене фреквенције за 7%. Када се истовремено разматра утицај броја обртаја, односно, центрифугалне силе и температуре на сопствене фреквенције, долази се до закључка да се сопствене фреквенције веома мало мењају повећањем броја обртаја и температуре за око 0,5 % до 0,8 % у односу на почетне вредности.

Експериментална испитивања су спроведена да би се одредило стварно понашање мотор-вретена са становишта топлотно-механичког понашања. Експериментални штанд је пројектован као модуларни систем стога, се може користити за експерименте на различитим мотор-вретенима. У фази пред-експерименталног планирања спроведена су пробна испитивања којом су тестирани експериментални штанд, мерни уређаји, избор нивоа и опсега фактора, на основу чега је донета одлука да се спроведе централно композитни дизајн у оквиру методологије одзивних површина. При експерименталном испитивању је извршено шест понављања у средишњој тачки за сваки ниво категоричког фактора, односно, две реплике за сваки ниво категоричког фактора у сваком блоку. За централну тачку су примењени стандардни услови рада. Статистички софтвер Минитаб 17 је коришћен за поставку и анализу експерименталних резултата. Коришћен је делимично рандомизиран централно композитни план. Рандомизирањем експеримента, грешке су независно распоређене случајне промене, а неки утицај непожељних фактора је сведен на минимум. Делимично рандомизиран је из разлога што категорички фактор (врста хлађења) није могао да се рандомизира тако да је посебно одрађен рандомизиран експеримент за „ хлађење уљем“ а посебно за „хлађење водом“. Овако дефинисан експеримент је подељен у два блока. Улога блокова је да смање или елиминишу варијабилност узроковану факторима сметњи који могу утицати на одговор, али се не тичу директно, као фактора дизајна. На бази плана експеримента одређене су регресионе једначине за предвиђање температура, при чему је утврђена адекватност постављеног модела која је износила око 99%. На основу свеобухватне анализе топлотног понашања посматране преко експерименталних испитивања се може констатовати да број обртаја и средство за хлађење имају доминантан утицај на температуре. Температуре одређене регресионим релацијама се разликују од измерених за око 2% што представља задовољавајуће поклапање.

Поређењем резултата топлотног понашања мотор вретена се може закључити да грешка износи од 1 до 28% у зависности од броја обртаја. Грешка између резултата математичког моделовања и експерименталног испитивања при еластичном понашању износи од 2 до 21% у правцу X осе и од 1 до 21% у правцу Y осе. Поређењем вредности сопствених фреквенција може се уочити да одступање између фреквенција одређених МКЕ моделовањем и експерименталним испитивањем, на првом моду износи 1,2%, који је уједно и најдоминантнији, док је на другом моду само 0,8%. На основу претходног се може закључити да МКЕ моделовање даје задовољавајуће резултате топлотно-механичког понашања високобрзинског мотор-вретена.

Резултати у дисертацији задовољавају опште и посебне критеријуме вредновања научног рада.

Кандидат је у решавању научног проблема користио познате и признате научне методе анализе и синтезе, математичког моделовања и експерименталног испитивања.

Детаљна анализа стања у области топлотног, статичког и динамичког понашања високобрзинског мотор-вретена, нуди нове перспективе за сагледавање и унапређивање ове још увек врло актуелне области, посебно понашања мотор-вретена у подручју високих бројева обртаја.

О непосредним доприносима ове дисертације шира научна јавност је упозната кроз шеснаест радова који су уско везани за ову проблематику, а објављени су у иностраним и домаћим часописима, или саопштени на скуповима међународног значаја.

VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА:

Експлицитно навести позитивну или негативну оцену начина приказа и тумачења резултата истраживања.

Резултати истраживања су јасно и прегледно приказани и исправно протумачени применом признатих научних метода, те не остављају сумњу у научни и стручни допринос наведене дисертације.

Текст докторске дисертације је проверен у софтверу за детекцију плагијаризма iThenticate, у Библиотеци ФТН-а, на основу чега је потврђено да текст не садржи елементе плагијаризма. Са Извештајем о подударности упознати су сви чланови Комисије.

Комисија констатује да је начин на који су резултати приказани и тумачени, у оквиру ове докторске дисертације, у потпуности одговарају постављеним циљевима истраживања.

IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Експлицитно навести да ли дисертација јесте или није написана у складу са наведеним образложењем, као и да ли она садржи или не садржи све битне елементе. Дати јасне, прецизне и концизне одговоре на 3. и 4. питање:

1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме?

Комисија констатује да је докторска дисертација урађена у складу са образложењем и циљевима истраживања које је кандидат дефинисао у оквиру пријаве теме.

Кандидат је у току израде дисертације, као и на основу резултата приказаних у раду, показао да влада методама рачунарске симулације и експерименталног истраживања. Такође се може констатовати да кандидат врло добро влада организацијом и извођењем експерименталних испитивања применом савремене мерне опреме, тумачењем и анализом добијених резултата, као и исправним доношењем закључака.

Подаци из литературе, којима се кандидат служио, су критички одабрани и уверљиви, а тумачење резултата јасно и коректно презентовано. Резултати сопствених истраживања су приказани у виду графичких илустрација и нумеричких интерпретација.

2. Да ли дисертација садржи све битне елементе?

Докторска дисертација садржи све битне елементе. У оквиру дисертације су дефинисани предмет и циљ истраживања, полазне претпоставке (хипотезе) и методе истраживања. Изнете полазне претпоставке су логичне, а спроведено истраживање и анализе добијених резултата самостални и оригинални. Добијени резултати имају и практичну инжењерску примену у пројектовању, предикцији и испитивању високобрзинских главних вретена, посебно, мотор-вретена.

3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци?

Дисертација садржи све битне елементе за сагледавање разматраних проблема који су обрађивани.

Добијени резултати представљају научни допринос у области развоја и предикције понашања елемената машине алатке и машинском инжењерству уопште.

Кандидат је поставио оргиналне математичке модел за предикцију топлотно-механичког понашања високобрзинског мотор-вретена машина алатки у експлоатацији. Извршио је свеобухватну верификацију математичких модела, уз нагласак на одступања до којих долази због занемаривања параметара који нису узети у обзир у овој дисертацији.

Развијени модели се могу успешно користити и за анализу, како топлотно-механичког понашања мотор-вретена, тако и за анализу понашања високобрзинских кугличних лежаја, са којима су ова вретена улежиштена.

4. Који су недостаци дисертације и какав је њихов утицај на резултат истраживања?

У дисертацији нису уочени недостаци који би утицали на резултат истраживања.

X ПРЕДЛОГ:

На основу наведеног, комисија предлаже:

- а) да се докторска дисертација прихвати, а кандидату одобри одбрана;
- б) да се докторска дисертација врати кандидату на дораду (да се допуни односно измени);
- в) да се докторска дисертација одбије.

Место и датум:

Нови Сад, 29.08.2022.

1. Др Ацо Антић, редовни професор
_____, председник
2. Др Саша Живановић, редовни професор
_____, члан
3. Др Мијодраг Милошевић, ванредни професор
_____, члан
4. Др Сениша Бикић, ванредни професор
_____, члан
5. Др Војин Илић, ванредни професор
_____, члан
6. Др Александар Живковић, ванредни професор
_____, ментор

НАПОМЕНА: Члан комисије који не жели да потпише извештај јер се не слаже са мишљењем већине чланова комисије, дужан је да унесе у извештај образложење односно разлоге због којих не жели да потпише извештај и да исти потпише.