

Факултет Машински

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

104/4

(Број захтева)

Веће научних области техничких наука

(Назив већа научне области коме се захтев
упућује)

08.02.2024.

(Датум)

ЗАХТЕВ**за давање сагласности на одлуку о прихватању теме докторске дисертације и
о одређивању ментора**

Молимо да, сходно члану 47. ст. 5. тач. 3. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитета", број 186/15-пречишћени текст и 189/16), дате сагласност на одлуку о прихватању теме докторске дисертације:

„ПРЕДИКЦИЈА И ДЕТЕКЦИЈА ПОДРХТАВАЊА У ОБРАДНОМ СИСТЕМУ“

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ

Производно машинство

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

1. Име, име једног од родитеља и презиме кандидата:
НИКОЛА (МИЛАН) ВОРКАПИЋ
2. Претходно образовање (назив и седиште факултета, студијски програм):
Машински факултет Београд
3. Година завршетка претходног нивоа студија: 2017.
4. Година уписа на докторске студије: 2017.
5. Назив студијског програма докторских студија: Машинско инжењерство

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ:

Име и презиме ментора:

Саша Живановић

Звање:

редовни професор

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. Stojadinović Slavenko, Živanović Saša, Slavković Nikola, Durakbasa Numan M. (2021). Digital measurement twin for CMM inspection based on step-NC, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 34(12), 1327-1347. Taylor & Francis Ltd, Abingdon, ISSN: 0951-192X, 10.1080/0951192X.2021.1972460.
2. Vasilčić Goran, Živanović Saša (2020). Configuring and analysis of complex multi-axis reconfigurable machine for wire cutting process, Mechanism and Machine Theory, 149 Pergamon-Elsevier Science Ltd, Oxford, ISSN: 0094-114X, 10.1016/j.mechmachtheory.2020.103833.
3. Slavković Nikola, Živanović Saša, Milutinović Dragan (2019). An indirect method of industrial robot programming for machining tasks based on STEP-NC, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 32(1), 43-57. Taylor & Francis Ltd, Abingdon, ISSN: 0951-192X, 10.1080/0951192X.2018.1543952.
4. Živanović Saša, Slavković Nikola, Milutinović Dragan (2018). An approach for applying STEP-NC in robot machining, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 49, 361-373. Pergamon-Elsevier Science Ltd, Oxford, ISSN: 0736-5845, 10.1016/j.rcim.2017.08.009.
5. Milutinović Dragan, Glavonjić Miloš, Kvirgić Vladimir, Živanović Saša (2005). A new 3-DOF spatial parallel mechanism for milling machines with long X travel, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 54(1), 345-348. Elsevier, Amsterdam, ISSN: 0007-8506, 10.1016/S0007-8506(07)60119-X.
6. Živanović Saša, Dimić Zoran, Rakić Aleksandar, Slavković Nikola, Kokotović Branko, Manasijević Srećko (2022). Programming methodology for multi-axis CNC woodworking machining center for advanced manufacturing based on STEP-NC, Wood Material Science & Engineering. Taylor & Francis Ltd, Abingdon, ISSN: 1748-0272, 10.1080/17480272.2022.2057816.
7. Živanović Saša, Tabaković Slobodan, Željko Milan, Dimić Zoran (2021). Modelling and analysis of machine tool with parallel-serial kinematics based on O-X glide mechanism, Journal of The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 43(10). Springer Heidelberg, Heidelberg, ISSN: 1678-5878, 10.1007/s40430-021-03171-6.
8. Rakić Aleksandar, Živanović Saša, Dimić Zoran, Knežević Mladen (2021). Digital Twin Control of Multi-Axis Wood CNC Machining Center Based on LinuxCNC, Bioresources, 16(1), 1115-1130. North Carolina State Univ Dept Wood & Paper Sci, Raleigh, ISSN: 1930-2126, 10.15376/biores.16.1.1115-1130.
9. Slavković Nikola, Živanović Saša, Kokotović Branko, Dimić Zoran, Milutinović Milan (2020). Simulation of compensated tool path through virtual robot machining model, Journal of The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 42(7). Springer Heidelberg, Heidelberg, ISSN: 1678-5878, 10.1007/s40430-020-02461-9.
10. Toquica Juan S., Živanović Saša, Bonnard Renan, Rodriguez Efrain, Alvares Alberto J., Ferreira Joao C. E. (2019). STEP-NC-based machining architecture applied to industrial robots, Journal of The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 41(8). Springer Heidelberg, Heidelberg, ISSN: 1678-5878, 10.1007/s40430-019-1811-y.
11. Toquica Juan S., Živanović Saša, Alvares Alberto J., Bonnard Renan (2018). A STEP-NC compliant robotic machining platform for advanced manufacturing, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 95(9-12), 3839-3854. Springer London Ltd, London, ISSN: 0268-3768, 10.1007/s00170-017-1466-8.
12. Milutinović Dragan, Glavonjić Miloš, Slavković Nikola, Dimić Zoran, Živanović Saša, Kokotović Branko, Tanović Ljubodrag (2011). Reconfigurable robotic machining system controlled and programmed in a machine tool manner, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 53(9-12), 1217-1229. Springer London Ltd, London, ISSN: 0268-3768, 10.1007/s00170-010-2888-8.
13. Glavonjić Miloš, Milutinović Dragan, Živanović Saša, Dimić Zoran, Kvirgić Vladimir (2010). Desktop 3-axis parallel kinematic milling machine, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 46(1-4), 51-60. Springer London Ltd, Artington, ISSN: 0268-3768, 10.1007/s00170-009-2070-3.
14. Glavonjić Miloš, Milutinović Dragan, Živanović Saša (2009). Functional simulator of 3-axis parallel kinematic milling machine, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 42(7-8), 813-821. Springer London Ltd, Artington, ISSN: 0268-3768, 10.1007/s00170-008-1643-x.
15. Kvirgić Vladimir, Ribić Aleksandar I, Dimić Zoran, Živanović Saša, Dodevska Zorica A. (2022). Equivalent geometric errors of rotary axes and novel algorithm for geometric errors compensation in a nonorthogonal five-axis machine tool, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 37, 477-488. Elsevier, Amsterdam, ISSN: 1755-5817, 10.1016/j.cirpj.2022.03.001.
16. Vorkapić Nikola, Pjević Miloš, Popović Mihajlo, Slavković Nikola, Živanović Saša (2020). An additive manufacturing benchmark artifact and deviation measurement method, Journal of Mechanical Science and Technology, 34(7), 3015-3026. Korean Soc Mechanical Engineers, Seoul, ISSN: 1738-494X, 10.1007/s12206-020-0633-2.
17. Vasilčić Goran, Živanović Saša, Kokotović Branko, Dimić Zoran (2019). Configuring and analysis of a class of generalized reconfigurable 2-axis parallel kinematic machine, Journal of Mechanical Science and Technology, 33(7), 3407-3421. Korean Soc Mechanical Engineers, Seoul, ISSN: 1738-494X, 10.1007/s12206-019-0636-z.
18. Lukić Dejan, Živanović Saša, Vukman Jovan, Milosević Mijodrag, Borojević Stevo, Antić Aco (2018). The possibilities for application of STEP-NC in actual production conditions, Journal of Mechanical Science and Technology, 32(7), 3317-3328. Korean Soc Mechanical Engineers, Seoul, ISSN: 1738-494X, 10.1007/s12206-018-0634-6.
19. Živanović Saša, Puzović Radovan (2016). Wire edm machining simulations based on step-nc program, Tehnički vjesnik, 23(6), 1831-1838. Univ Osijek, Tech Fac, Slavovski Brod, ISSN: 1330-3651, 10.17559/TV-20151122180547.
20. Dimić Zoran, Milutinović Dragan, Živanović Saša, Kvirgić Vladimir (2016). Virtual environment in control and programming system for reconfigurable machining robot, Tehnički vjesnik, 23(6), 1821-1829. Univ Osijek, Tech Fac, Slavovski Brod, ISSN: 1330-3651, 10.17559/TV-20150210133556.
21. Živanović Saša, Glavonjić Miloš, Milutinović Dragan (2015). Configuring A Mini-Laboratory and Desktop 3-Axis Parallel Kinematic Milling Machine, Strojniški Vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 61(1), 33-42. Assoc Mechanical Engineers Technicians Slovenia, Ljubljana, ISSN: 0039-2480, 10.5545/sv-jme.2013.1619.

Обавештавамо вас да је Наставно – научно веће на седници одржаној 08.02.2024. године размотрило предложену тему и закључило да је тема подобна за израду докторске дисертације јер садржи оригиналну идеју и да је од значаја за развој науке, примену њених резултата, односно развој научне мисли уопште.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Прилог:

1. Одлука Наставно-научног већа о прихватању теме и одређивању ментора
2. Извештај Комисије о оцени научне заснованости теме докторске дисертације

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
Број: 104/3
Датум: 08.02.2024. године
Београд, Краљице Марије 16

На основу члана 40. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 88/2017, 73/2018, 27/2018 – др. закон 67/2019, 6/2020 – др. закони, 11/2021 – аутентично тумачење, 67/2021, 67/2021 – др. закон и 76/2023), члана 64. Статута Машинског факултета – пречишћени текст (број 1136/4 од 28.06.2021. године), Одлуке о изменама и допунама Статута број 239/6 од 17.02.2023. године и члана 38. Правилника о докторским студијама на Универзитету у Београду - Машинском факултету, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 08.02.2024. године донело је:

О Д Л У К У
о прихватању Извештаја Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације

Прихвата се Извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата **НИКОЛЕ ВОРКАПИЋА**, магист. инж. маш. под насловом „**ПРЕДИКЦИЈА И ДЕТЕКЦИЈА ПОДРХТАВАЊА У ОБРАДНОМ СИСТЕМУ**“.

Извештај је поднела Комисија у саставу: др Живана Јаковљевић, ред. проф., др Никола Славковић, ванр. проф., др Бранко Кокотовић, доцент, др Слободан Табаковић, ред. проф. Универзитет у Новом Саду – Факултет техничких наука и др Зоран Димић, виши научни сарадник, Истраживачко развојни институт ЛОЛА.

За ментора докторске дисертације именује се др Саша Живановић, редовни професор Универзитета у Београду - Машинског факултета.

Одлуку доставити: Универзитету у Београду, кандидату, ментору и архиви Факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Владимир Поповић

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај о научној заснованости теме докторске дисертације кандидата **Николе Воркапића, маг.инж.маш.**

Одлуком Наставно-научног већа Универзитета у Београду - Машинског факултета бр. 104/1 од 18.01.2024. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације под називом „**Предикција и детекција подрхтавања у обрадном систему**“ кандидата **Николе Воркапића, маг.инж.маш**

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Никола (Милан) Воркапић, маг.инж.маш., рођен је 04. јануара 1992. године у Београду, Република Србија. Основну школу „Светислав Голубовић - Митраљета“ завршио је у Батајници као одличан ђак. Средњу техничку школу „Политехника-школа за нове технологије“ завршио је у Београду као ђак генерације.

На Универзитет у Београду - Машински факултет уписао се школске 2011/2012. године. Основне академске студије – Машинско инжењерство завршио је 2014. године, одбранивши завршни рад (BSc) са оценом 10 (десет) из предмета CAD/CAM системи и просечном оценом током основних академских студија 8,24 (осам и 24/100). Школске 2014/2015. године уписао је Мастер академске студије – Машинско инжењерство, Модул производно машинство, а завршио их је 2017. године са просечном оценом током мастер академских студија 9,30 (девет и 30/100), одбранивши са оценом 10 (десет) мастер рад (MSc) на тему „Анализа и синтеза трокомпонентног динамометра за мерење отпора резања при обради стругањем" из предмета Машине алатке М, под менторством доц. др Бранка Кокотовића.

Након дипломирања кандидат започиње радни однос у компанији Едепро д.о.о. као машински инжењер - пројектант. У школској 2017/2018. години уписао је Докторске академске студије – Машинско инжењерство на Универзитету у Београду - Машинском факултету (број индекса Д10/17). Током првог семестра Докторских академских студија

утврђени су његови правци научноистраживачког рада на Катедри за производно машинство, да би одлуком број 453/1 од 20.02.2018. године био озваничен и Програм усавршавања, који се реализује под руководством потенцијалног ментора проф. др Саше Живановића. Кандидат је положио све испите на Докторским академским студијама Универзитета у Београду - Машинског факултета у Београду и тренутно је студент VI семестра.

Од 12. октобра 2018. године запослен је на Универзитету у Београду - Машинском факултету у звању асистента на Катедри за производно машинство. Кандидат је од 1. децембра 2018. ангажован на пројекту Технолошког развоја под називом „Развој нове генерације домаћих обрадних система“, који је финансирало Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије (ев. бр. ТР-35022, руководилац пројекта проф. др Љубодраг Тановић), закључно са 31. децембром 2019. године. Након тога, кандидат је од 1. јануара 2020. ангажован на пројекту под називом „Интегрисана истраживања у области макро, микро и нано машинског инжењерства – Развој нове генерације домаћих обрадних система“, који је финансиран од стране надлежних министарстава Владе Републике Србије према уговору о реализацији и финансирању научноистраживачког рада НИО у 2020. години (ев. бр. 451-03-68/2020-14/200105, руководилац пројекта проф. др. Радивоје Митровић), у 2021. години (ев. бр. 451-03-9/2021-14/200105, руководилац пројекта проф. др. Владимир Поповић) у 2022. години (ев. бр. 451-03-68/2022-14/200105, руководилац пројекта проф. др. Владимир Поповић) и у 2023. години (ев. бр. 451-03-47/2023-01/200105, руководилац пројекта проф. др. Владимир Поповић). Поред тога, кандидат је од 9. септембра 2020. до 9. септембра 2022. године ангажован и на пројекту у оквиру програма *Доказ концепта* под називом „*Multifunctional rapid prototyping desktop machine - MULTIPRODESK* ” (ев. бр. 5893, руководилац пројекта др Зоран Димић, виши научни сарадник), према уговору о финансирању Фонда за иновациону делатност Републике Србије и ЛОЛА института, бр. 149. Кандидат је од 14. октобра 2022. до 14. октобра 2023. године ангажован и на пројекту у оквиру програма *Трансфер технологије* под називом „*Multifunctional rapid prototyping desktop machine - MULTIPRODESK* ” (ев. бр. ТТ1129, руководилац пројекта др Зоран Димић, виши научни сарадник), према уговору о финансирању Фонда за иновациону делатност Републике Србије и ЛОЛА института, бр. 26.

За постигнуте резултате, током похађања Основних и Мастер академских студија, добио је следеће похвале и захвалнице:

2016-2017. Похвала поводом Дана Машинског факултета у Београду за одличан успех постигнут на првој години Мастер академских студија (школска 2014/15. година).

Од пролећног семестра школске 2017/2018. године, кандидат је укључен у наставни процес Катедре за производно машинство Универзитета у Београду - Машинског факултета. Кандидат реализује лабораторијске вежбе, преглед самосталних задатака и преглед пројеката на следећим наставним предметима Катедре:

- Машине алатке (ОАС – Машинско инжењерство): 2018-...
- Технологија машинске обраде (ОАС – Машинско инжењерство): 2018-...
- Технологија машиноградње (ОАС – Информационе технологије у машинству): 2021-...
- Завршни предмет – Машине алатке (ОАС – Машинско инжењерство): 2021-...
- CAD/CAM системи (ОАС – Машинско инжењерство): 2018-2023.
- Машине алатке и работи нове генерације (МАС – Машинско инжењерство): 2018-...

- Машине алатке М (МАС – Машинско инжењерство): 2018-...
- Технологија машиноградње (Војна академија): 2021- 2023.

Познавање страних језика

- Енглески језик – говори, чита и пише.

Познавање рада на рачунару

Напредно коришћење програма: MS Office (Word, Excel, Visio, Power Point), Auto CAD, Autodesk Inventor, Pro/ENGINEER - PTC Creo, Solid works, Catia, AlphaCAM, Vericut, Cut3D, Deskproto, STEP-NC Machine, Matlab, LabView (Data Acquisition), Latex.

Истраживачке области

- Машине алатке, Виртуелне машине алатке и виртуелни обрадни системи, CAD/CAM системи, Машине алатке за брзу израду прототипова, Предикција сила резања, Подрхтавање у обрадном систему, Експериментална модална анализа.

Остало

- Поседује возачку дозволу Б категорије

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Кандидат Никола Воркапић, магистар машинског инжењерства, уписао је Докторске академске студије на Универзитету у Београду - Машинском факултету школске 2017/2018. године. У циљу реализације Програма усавршавања, положио је следеће обавезне и изборне предмете:

Први семестар Докторских академских студија

Назив предмета	Предметни наставник	ЕСПБ	Оцена
<i>Виши курс математике (о*)</i>	Проф. др Слободан Радојевић	5	10 (десет)
<i>Нумеричке методе (о*)</i>	Проф. др Миодраг Спалевић	5	10 (десет)
<i>ОМНИР (организација и методе научно - истраживачког рада) и комуникација (о*)</i>	Проф. др Милош Недељковић	5	9 (девет)
<i>Аквизиција и обрада експерименталних података (и*)</i>	Проф. др Живана Јаковљевић	5	10 (десет)
<i>Истраживање и публиковање - I</i>	Проф. др Саша Живановић	10	10 (десет)

Други семестар Докторских академских студија

Назив предмета	Предметни наставник	ЕСПБ	Оцена
<i>Одабрана поглавља из механике (о*)</i>	Проф. др Зоран Митровић	5	10 (девет)
<i>CAD/CAM системи и интеграција пројектовања производа и технологија (и*)</i>	Проф. др Саша Живановић	5	10 (десет)
<i>Теорија резања (и*)</i>	Проф. др Љубодраг Тановић	5	10 (десет)
<i>Истраживање и публиковање - II</i>	Проф. др Саша Живановић	15	10 (десет)

Трећи семестар Докторских академских студија

Назив предмета	Предметни наставник	ЕСПБ	Оцена
<i>Испитивање и оптимизација обрадног система (и*)</i>	Проф. др Саша Живановић	5	10 (десет)
<i>Теорија и симулација процеса обраде (и*)</i>	Проф. др Љубодраг Тановић	5	10 (десет)
<i>Истраживање и публиковање - III</i>	Проф. др Саша Живановић	20	10 (десет)

Четврти семестар Докторских академских студија

Назив предмета	Предметни наставник	ЕСПБ	Оцена
<i>Истраживање и публиковање - IV</i>	Проф. др Саша Живановић	8	10 (десет)
<i>Пројекат идеје докторске дисертације</i>	Проф. др Саша Живановић Проф. др Бранко Кокотовић Проф. др Никола Славковић	22	10 (десет)

Напомена: *о** - обавезни предмет; *и** - изборни предмет.

Никола Воркапић је на Докторским академским студијама – Машинско инжењерство на Универзитету у Београду - Машинском факултету положио 4 (четири) обавезна и 5 (пет) изборних предмета (сваки вреди по 5 ЕСПБ бодова), чиме је остварио укупно 45 ЕСПБ бодова. Резултати научноистраживачког рада Николе Воркапића на Универзитету у Београду - Машинском факултету, реализовани су кроз интензиван експериментални рад у Лабораторији за обрадне системе и Лабораторији за испитивање машинских система и структурну анализу (Истраживање и публиковање I-IV), верификовани су објављивањем радова као и учествовањем у извођењу наставе на предметима Катедре за производно машинство што указују на то да је кандидат веома успешно остварио још 53 ЕСПБ бода. Кандидат је успешно написао и одбранио Пројекат идеје докторске дисертације, што је Комисија у саставу проф. др Саша Живановић, проф. др Бранко Кокотовић и проф. др Никола Славковић потврдила оценом 10 (десет), чиме је кандидат стекао још 22 ЕСПБ бода. Дакле, кандидат је остварио укупно 120 ЕСПБ бодова чиме је у складу са чланом 21. Правилника о Докторским студијама на Универзитету у Београду - Машинском факултету стекао услов да упише трећу годину студија и самим тим у складу са чланом 33 наведеног Правилника испунио основни услов да пријави докторску дисертацију.

Кандидат већ има објављен научни рад у **врхунском међународном часопису**, са *SCI* листе (**M23**), као и објављен научни рад у **часопису међународног значаја верификованог посебном одлуком (M24)**. У наставку је дат списак објављених научних радова и других релевантних резултата и активности које опредељују афинитет кандидата за рад на предложеној теми.

Рад објављен у научном часопису међународног значаја

- [1] **Vorkapic N.**, Pjevic M., Živanovic S., Popovic M., Slavkovic N., An additive manufacturing benchmark artifact and deviation measurement method, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 34, No, 7., pp. 3015-3026, 2020. <http://doi.org/10.1007/s12206-020-0633-2>.
→ **M23**, IF(2020): 1.649

Радови у часописима међународног значаја верификованом посебном одлуком

- [2] Slavkovic, N., Zivanovic, S., **Vorkapić, N.**, Dimic, Z., Development of the Programming and Simulation System of 4-axis Robot with Hybrid Kinematic, FME Transactions, ISSN 1451-2092, Vol. 50, No. 3., pp. 403-411, 2022. doi:10.5937/fme2203403S. → **M24**, IF(2022): 1.6
- [3] **Vorkapić, N.**, Zivanovic, S., Dimic, Z., Kokotovic, B., Slavkovic, N., Virtual Horizontal Machining Center LOLA HBG 80 for Program Verification and Monitoring, FME Transactions, ISSN 1451-2092, Vol. 49, No. 3., pp. 696-703, 2021, doi:10.5937/fme2103696V. → **M24**
- [4] Zivanović S., Popovic M., **Vorkapić N.**, Pjevic M., Slavkovic N., An Overview of Rapid Prototyping Technologies using Subtractive, Additive and Formative Processes, FME Transactions, Vol. 48, No 1., pp. 246-253, 2020. doi:10.5937/fmet2001246Z. → **M24**
- [5] Kokotović, B., **Vorkapić, N.**, Feedrate Optimization for 2.5D Milling Operations, FME Transactions, Vol. 47, No 3., pp. 613-623, 2019. doi: 10.5937/fmet1903613K. → **M24**

Радови саопштени на скуповима међународног значаја, штампани у целини

- [6] **Vorkapić N.**, Kokotović B., Živanović S., Comparison of signal features from time and frequency domain for chatter detection, 39th International Conference on Production Engineering of Serbia, ISBN 978-86-6022-610-7, pp. 42-47, Novi Sad, 26-27 Oktobar, 2023. → **M33**
- [7] Živanovic, S., Vasilic, G., Dimic, Z., **Vorkapić, N.**, Kokotovic, B., Slavkovic, N., Programming methods and program verification for 3-axis reconfigurable hybrid kinematics machine, Proceedings of the 16th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering DEMI 2023, ISBN 978-99976-11-04-8, pp. 136-143, University of Banja Luka, Faculty of Mechanical Engineering, Banja Luka, B&H, 2023. → **M33**
- [8] Živanovic, S., Vasilic, G., Kokotovic, B., **Vorkapić, N.**, Dimic, Z., Slavkovic, N., Configuring and verification of a reconfigurable machine with hybrid kinematics MOMA V3, Proceedings of the 6th international scientific conference "Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications" COMETA2022, ISBN 978-99976-947-6-8, pp. 46- 55, University of East Sarajevo Faculty of Mechanical Engineering, East Sarajevo-Jahorina, RS, B&H, 2022. → **M33**
- [9] Slavkovic, N., Živanovic, S., Dimic, Z., **Vorkapić, N.**, Method for Configuring Virtual Robot as an Integral Part of the Control System, Proceedings of IX International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering IcETRAN 2022, pp. 639-644 (ROI1.2 pp.1-6), Novi Pazar, Serbia, 2022. → **M33**
- [10] Zivanovic, S., **Vorkapić, N.**, Mitrovic, S., Machine simulation of additive manufacturing tool path, Proceedings of the 10th International Scientific Conference IRMES 2022- Machine design in the context of Industry 4.0 – Intelligent products, pp. 211-217, Belgrade, Serbia, 2022. → **M33**
- [11] Zivanovic, S., Slavkovic, N., Tabakovic, S., **Vorkapić, N.**, Application of STEP-NC protocol for milling on machine tools that use Fanuc-Siemens-LinuxCNC control system, Proceedings of the 38th International Conference on Production Engineering -Serbia, ICPE-S 2021, ISBN

978-86-7776-252-0, pp. 102-107, Faculty of Technical Sciences Cacak, University of Kragujevac, Cacak, Serbia, 2021. → **M33**

- [12] Slavkovic, N., **Vorkapic, N.**, Živanovic, S., Dimic, Z., Kokotovic, B., Virtual Biscara robot integrated with open-architecture control system, 14th International Scientific Conference mma 2021 – Flexible Technologies, Proceedings, ISBN 978-86-6022-364-9, pp. 63-66, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Department for Production Engineering, Novi Sad, Serbia, 2021. → **M33**
- [13] Zivanovic, S., **Vorkapic, N.**, Dimic, Z., Slavkovic, N., Kokotovic, B., Development of educational mini CNC machines tools with open architecture control system, Proceedings of the 5th international scientific conference "Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications" COMETa2020, ISBN 978-99976-719-8-1, pp.68-77, University of East Sarajevo Faculty of Mechanical Engineering, East Sarajevo-Jahorina, RS, B&H, 2020. → **M33**
- [14] Zivanovic S. , Dimic Z. , **Vorkapic N.** , Mitrovic S., CONFIGURING OF 3 AXIS MINI CNC MACHINE TOOL WITH CONTROL SYSTEM BASED ON LINUXCNC, 14th International Conference on Accomplishment in Mechanical and Industrial Engineering- DEMI 2019, University of Banja Luka, Faculty of Mechanical Engineering, Banja Luka, 24.-25. maj 2019. → **M33**
- [15] **Vorkapic, N.**, Kokotovic, B., Synthesis and analysis of the tool dynamometer for turning operations, 13th International Scientific Conference mma 2018 – Flexible Technologies, Proceedings, ISBN 978-86-6022-094-5, pp. 99-102, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Department for Production Engineering, Novi Sad, Serbia, 2018. → **M33**
- [16] Kokotovic, B., **Vorkapić, N.**, Evaluation of infeed strategies for turning of large thread profiles, 13th International Scientific Conference mma 2018 – Flexible Technologies, Proceedings, ISBN 978-86-6022-094-5, pp. 25-28, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Department for Production Engineering, Novi Sad, Serbia, 2018. → **M33**

Саопштење са међународног скупа штампано у изводу

- [17] Zivanovic, S., **Vorkapic, N.**, Slavkovic, N., Dimic, Z., Vidakovic, J., Design of MULTIPRODESK: Multifunctional rapid prototyping desktop machine, International Conference of Experimental and Numerical Investigations and New Technologies, CNN TECH 2023 - The Book of Abstracts, ISBN 978-86-6060-155-3, pp.12, Zlatibor, Serbia, 04-07 July, 2023. → **M34**

Радови објављени у часописима националног значаја

- [18] Zivanovic, S., **Vorkapic, N.**, Mitrovic, S., Machine simulation of additive manufacturing tool path, ACTA TECHNICA CORVINIENSIS – Bulletin of Engineering Tome XV, Fascicule 4, pp. 39-40, Romania, 2022. → **M51**
- [19] Славковић, Н., Живановић, С., **Воркапић, Н.**, Конфигурисање виртуелног прототипа BiSCARA робота, ТЕХНИКА, Часопис савеза инжењера и техничара Србије, Вол. 70, Бр. 3, стр. 311-317, 2021. → **M51**
- [20] **Воркапић, Н.**, Живановић, С., Димић, З., Развој едукационе 3-осне CNC машине алатке за брзу израду прототипова са две транслаторне и једном обртном осом, ТЕХНИКА, Часопис савеза инжењера и техничара Србије, Вол. 69, Бр.6, стр.725-732, 2020. → **M51**

- [21] **Vorkapić N.**, Zivanović S., Slavkovic N., Dimic Z., Kokotovic B., Configuring of 3-axis vertical CNC Machine for Rapid Prototyping with two Translatory and one Rotary Axes, Advanced technologies and materials, Vol. 45, No. 1., Novi Sad, Serbia, 2020. → **M51**
- [22] Живановић, С., **Воркапић, Н.**, Димић, З., Конфигурисање система за програмирање и управљање 3-осним мини CNC машинама алатке на Raspberry Pi платформи, ТЕХНИКА, Часопис савеза инжењера и техничара Србије, Вол.68, Бр.6, стр. 823-831, 2019. → **M51**

Радови саопштени на скуповима националног значаја, штампани у целини

- [23] Живановић, С., Тановић, Љ., Пузовић, Р., Кокотовић, Б., Славковић, Н., Поповић, М., Младеновић, Г., Стојадиновић, С., Пјевић, М., **Воркапић, Н.**, Димић, З., Ракић, А., Манасијевић, С., Ревитализација хоризонталне бушилице глодалице ЛОЛА ХБГ 80 управљањем отворене архитектуре на LinuxCNC платформи, 43. ЈУПИТЕР конференција, 39. симпозијум НУ-Роботи-ФТС, Зборник радова, ИСБН 978-86-6060-137-9, стр. 3.1-3.12, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, Србија, 2022. → **M63**
- [24] Живановић, С., **Воркапић, Н.**, Славковић, Н., Конфигурисање виртуелних машина алатки у STEP-NC окружењу на примеру адитивних технологија, 43. ЈУПИТЕР конференција, 30. симпозијум CAD/CAM, Зборник радова, ИСБН 978-86-6060-137-9, стр. 2.20-2.26, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, Србија, 2022. → **M63**
- [25] **Воркапић, Н.**, Малетић, Ј., Нешовановић, Љ., Живановић, С., Пјевић, М., Експериментална идентификација специфичних сила резања са експериментима обимног глодања, 43. ЈУПИТЕР конференција, 39. симпозијум НУ-Роботи-ФТС, Зборник радова, ИСБН 978-86-6060-137-9, стр. 3.106-3.111, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, Србија, 2022. → **M63**
- [26] Тановић, Љ., Живановић, С., Пузовић, Р., Кокотовић, Б., Поповић, М., Славковић, Н., Младеновић, Г., Стојадиновић, С., Пјевић, М., **Воркапић, Н.**, Развој нове генерације домаћих обрадних система резултати истраживања за 2019. годину, 42. ЈУПИТЕР конференција, ИСБН 978-86-6060-054-9, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, Србија, 2020. → **M63**
- [27] Живановић, С., **Воркапић, Н.**, Славковић, Н., Кокотовић, Б., Анализа примене новог метода програмирања CNC стругова применом STEP-NC протокола, 42. ЈУПИТЕР конференција, ИСБН 978-86-6060-054-9, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, Србија, 2020. → **M63**
- [28] **Воркапић, Н.**, Живановић, С., Кокотовић, Б., Славковић, Н., Димић, З., Програмирање троосних глодалица са две транслаторне и једном обртном осом, 42. ЈУПИТЕР конференција, ИСБН 978-86-6060-054-9, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, Србија, 2020. → **M63**

Техничка и развојна решења – алгоритми, методе и софтвери

- 1) Живановић, С., Димић З., Кокотовић, Б., Василић, Г., **Воркапић, Н.**, Славковић, Н., Едукациона виртуелна петоосна машина алатка интегрисана са системом програмирања и управљања, Ново техничко решење у фази реализације (прототип-софтвер) - М85, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, Србија, 2020. → **M85**

- 2) Живановић С., Василић, Г., Димић З., Кокотовић Б., **Воркапић, Н.**, Славковић Н., Едукациона троосна реконфигурабилна машина са хибридном кинематиком МОМА V3, Ново техничко решење у фази реализације (није комерцијализовано) - М85, Универзитет у Београду - Машински факултет, 2023. → М85

Учешће у научно-истраживачким, стручним и образовно-развојним пројектима

- 1) „Развој нове генерације домаћих обрадних система“, Пројекат технолошког развоја који финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије: ТР-35004, руководилац пројекта проф. др Љубодраг Тановић, Београд, 2011–2019.
- 2) „Интегрисана истраживања у области макро, микро и нано машинског инжењерства – Развој нове генерације домаћих обрадних система“, који је финансиран од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије према уговору о реализацији и финансирању научноистраживачког рада НИО у 2020. години (ев. бр. 451-03-68/2020-14/200105, руководилац пројекта проф. др Радивоје Митровић), у 2021. години (ев. бр. 451-03-9/2021-14/200105, руководилац пројекта проф. др Владимир Поповић) и у 2022. години (ев. бр. 451-03-68/2022-14/200105, руководилац пројекта проф. др Владимир Поповић) и у 2023. години (ев. бр. 451-03-47/2023-01/200105, руководилац пројекта проф. др Владимир Поповић).
- 3) „Multifunctional rapid prototyping desktop machine - MULTIPRODESK“, Пројект који финансира Фонда за иновациону делатност у оквиру програма Доказ концепта бр. пројекта 5893, руководилац пројекта др Зоран Димић), 2021-2022.
- 4) „Multifunctional rapid prototyping desktop machine - MULTIPRODESK“, Пројект који финансира Фонда за иновациону делатност у оквиру програма Трансфер технологије бр. пројекта ТТ1129, руководилац пројекта др Зоран Димић), 2022-2023.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Кандидат Никола Воркапић, маст.инж.маш., својим досадашњим истраживачким активностима показао је посебну заинтересованост, квалитет и изражену способност за научноистраживачки рад.

Публиковани научни радови у међународном часопису, националним часописима међународног значаја верификованих посебном одлуком, као и у зборницима радова скупова међународног и националног значаја, као и верификована техничка решења, указују на изразит смисао кандидата да се бави комплексним мултидисциплинарним теоријским и експерименталним научним истраживањима.

Биографски подаци, објављени научни радови, експериментална истраживања кроз ангажовање на пројектима технолошког развоја (ев. бр. ТР-35022, ев. бр. 451-03-68/2020-14/200105, ев. бр. 451-03-9/2021-14/200105, ев. бр. 451-03-68/2022-14/200105 и ев. бр. 451-03-47/2023-14/200105) и пројектима Фонда за иновациону делатност (ев. бр. 5893 и ев. бр. ТТ1129), као и други набројани резултати Николе Воркапића, маст.инж.маш., суштински су повезани са научном облашћу којој припада предложена тема, што кандидата, према мишљењу Комисије, квалификује за самосталан, успешан и ефикасан теоријски и експериментални научноистраживачки рад на предложеној докторској дисертацији.

2. Предмет и циљ истраживања

Подрхтавање у обрадном систему за обраду резањем је један од феномена који је предмет научних истраживања већ више од седам деценија, док основне спознаје о њему датирају од самих почетака интензивне примене машинске обраде [1]. Актуелна истраживања у овој области су и даље интензивна из разлога што до сада развијени модели још увек не могу успешно имплементирати у процедурама предикције понашања обрадног система и процедурама за надзор и адаптивно управљање обрадним системом у реалном окружењу [1].

Рана истраживања у овој области [1] су успоставила механизме настанка подрхтавања: механизам регенеративног ефекта и механизам спрезања положаја (спрезање модова). Оба механизма се заснивају на интеракцији динамичког модела обрадног система и процеса резања, тј модела промене сила резања при динамичкој промени пресека нерезане струготине. То и јесте суштина подрхтавања: механичка структура обрадног система (машина, обрадак, алат и помоћни прибор) са наглом променом, квазиимпулсног карактера, почиње да вибрира са неком од својих сопствених фреквенција мењајући пресек дела материјала захваћеног резним делом алата са истом фреквенцијом. Силе резања при таквој динамичкој промени површине пресека нерезане струготине побуђују структуру управо њеном сопственом фреквенцијом, што доводи до раста амплитуда вибрација (релативног динамичког помераја између алата и обратка). Такве самопобудне вибрације, које називамо подрхтавање, праћене су низом штетних ефеката међу којима су најважнији: екстремно лош квалитет обрађене површине са дубоким браздама, убрзано хабање алата или његов лом, оштећења делова помоћног прибора и машине и интензивна бука [1].

Истраживања везана за подрхтавање у обрадном систему могу се сврстати у развој поузданих модела настанка подрхтавања као и специфичних процедура заснованих на таквим моделима и то:

- У симулационом окружењу: процедуре предикције настанка подрхтавања у различитим фазама појединих захвата пројектованог технолошког процеса и оптимизација у смислу кориговања пројектованих режима обраде са циљем елиминације разлика од настанка подрхтавања. Такве процедуре су важан градивни елемент у концепту укупне архитектуре виртуелног обрадног система.
- У технолошком окружењу: процедуре детекције настанка подрхтавања и процедуре потискивања подрхтавања кроз адаптивну промену параметара обраде или динамичких карактеристика елемената обрадног система. Посебан проблем је избор сензорског подсистема, издвајања и класификације параметара сигнала, било у временском, било у фреквентном домену. Овакве процедуре су важне подструктуре у концепту интелигентног обрадног система. У овом домену се, специфичним управљањем, решава проблем немоделоване динамике у моделима и процедурама примењеним у симулационом окружењу.
- Увођење повратне спреге између ова два домена је новијег датума и инспирисано је развојем концепта кибернетско-физичких система [2] (енгл. *Cyber Physical System - CPS*), а са циљем да се систематизовани подаци из реалног процеса, креирани кроз специфично процесирање сигнала из сензорског подсистема искористе за унапређење модела у симулационом окружењу.

Традиционални модели подрхтавања у обрадном систему, засновани на динамичком моделу обрадног система, тачније подструктуре највеће попустљивости и петљи са израчунавањем динамичке промене пресека струготине и сила резања обезбеђују креирање карата стабилности, које представљају основу за избор елемената режима обраде који гарантују стабилан процес. Накнадно су ови модели, који интегрише поменуте три целине, унапређени

моделом процесног пригушења, чиме је поузданост карата стабилности знатно повећана, нарочито у области мањих брзина резања [1].

Ограничена практична примена оваквих модела у предикцији понашања обрадног система је условљена са два битна фактора. Први је везан за потребу експерименталне идентификације динамичког модела подструктуре обрадног система, кроз процедуру експерименталне модалне анализе или, у новије време, операционе модалне анализе. Варијација алата и обрадака (критичних елемената механичке структуре обрадног система) у реалним производним условима чини овакав приступ крајње неадекватним [1]. Алтернативни приступ, који би почивао на примени методе коначних елемената у идентификацији динамичке структуре је ограничене поузданости, с обзиром на сложену природу веза у таквој структури. Други проблем је у потреби идентификације актуелне ширине или дубине резања у узастопним тачкама програмиране путање, нарочито при захватима контурне обраде и вишеосне обраде. Управо су то мотиви за истраживања која се планирају у оквиру предложене дисертације.

Предмет истраживања у оквиру дисертације са предложеном темом је развој аналитичких модела и њихове интеграције у симулационом окружењу, кроз одговарајуће процедуре, а са циљем предикције настанка подрхтавања, као и развој специфичних процедура обраде сензорских сигнала (у временском и фреквентном домену) из обрадног система и класификације параметара процесираних сигнала, са циљем детекције настанка развоја подрхтавања у реалном производном технолошком окружењу.

Научни циљ дисертације је развој методологије за креирање алгоритама који представљају основе система за предикцију и детекцију настанка подрхтавања у технолошком систему за обраду резањем. Методологија треба да обухвати обрадне системе са нумеричким управљањем (енгл. *Computer Numerical Control - CNC*).

Основни циљеви истраживања јесу:

1. Развој методе за предикцију подрхтавања у оквиру симулационог окружења, која је заснована на дефинисању симулационих модела обрадног процеса (динамичка промена пресека струготине и механистички модел сила резања) и динамичког модела обрадног система исказаног у модалном простору. Идентификација уобичајених фреквентних промена режима и услова обраде са пропагацијом извршења програма обраде базира се на реконструкцији мапа захвата у појединим тачкама програмиране путање, а на бази модела припремка, модела алата и процесирања и тренутних позиција и оријентација резног алата;
2. Компаративна анализа и избор оптималног алгорита процесирања сензорских сигнала из обрадног система и критеријума класификације параметара тако процесираних сигнала за потребе поуздане детекције настанка подрхтавања;
3. Верификација функционалности развијених модела и процедура за предикцију подрхтавања у симулационом окружењу за изабрани скуп захвата обраде резањем;
4. Верификација резултата остварених у симулационом окружењу кроз тест на реалном обрадном систему;
5. Формирање експерименталне инсталације за верификацију формулисаних алгоритама процесирања сигнала из обрадног система, као и изабраног/формулисаног критеријума класификације параметара сигнала у функцији поуздане детекције настанка подрхтавања, уз репрезентативне примере на реалном обрадном систему.

Подрхтавање као феномен у процесима обраде представља веома сложену појаву чија истраживања датирају још с почетка прошлог века. До данашњих дана публикован је значајан број научноистраживачких радова из области подрхтавања у обрадном систему који се баве моделима (аналитичким и симулационим), алгоритмима за предикцију ове појаве, различитим алгоритмима процесирања сензорских сигнала и алгоритмима класификације и њиховом практичном имплементацијом у реалном технолошком окружењу као дела система за надзор. Коначно, посебан истраживачки правац у овој широкој области су посебни хардверски модули и имплементација у управљачки систем машине алатке алгоритма за потискивање појаве подрхтавања када се она детектује у свом настанку. Садржај ових радова се анализира у наставку.

2.1. Преглед и анализа литературе

- [1] Y. Altintas, Manufacturing automation: Metal cutting mechanics, Machine tool vibrations, and CNC design, Second Edition, University of British Columbia, 2012.
- [2] C. Liu, X. Xu, Cyber-physical machine tool—the era of machine tool 4.0. *Procedia Cirp*, Vol. 63, pp. 70-75, 2017.
- [3] C. Howard, Modal Analysis using the Brüel and Kjaer Photon+ and Vibrant ME'Scope, University of Adelaide, 2021.
- [4] P. Avitabile, Experimental modal analysis, *Sound and vibration*, Vol. 35, No.1, pp. 20-31, 2021.
- [5] Y. Liu, T. X. Li, K. Liu, Y. M. Zhang, Chatter reliability prediction of turning process system with uncertainties, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 66, pp. 232-247, 2016.
- [6] Y. Altintas, M. Weck, Chatter stability of metal cutting and grinding, *CIRP annals*, Vol. 53, No. 2, pp. 619-642, 2004.
- [7] A. Otto, S. Rauh, M. Kolouch, G. Radons, Extension of Tlusty' s law for the identification of chatter stability lobes in multi-dimensional cutting processes, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 82, pp. 50-58, 2014.
- [8] F. A. Khasawneh, E. Munch, Chatter detection in turning using persistent homology. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 70, pp. 527-541, 2016.
- [9] M. H. Miguélez, L. Rubio, J. A. Loya, J. Fernández-Sáez, Improvement of chatter stability in boring operations with passive vibration absorbers. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 52, No. 10, pp. 1376-1384, 2010.
- [10] J. Pan, Z. Liu, X. Wang, C. Chen, X. Pan, Boring chatter identification by multi-sensor feature fusion and manifold learning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 109, pp. 1137-1151, 2020.
- [11] Z. Liu, H. Cao, X. Chen, Z. He, Z. Shen, Multi-fault classification based on wavelet SVM with PSO algorithm to analyze vibration signals from rolling element bearings. *Neurocomputing*, Vol. 99, pp. 399-410, 2013.
- [12] M. C. Yesilli, F. A. Khasawneh, A. Otto, On transfer learning for chatter detection in turning using wavelet packet transform and ensemble empirical mode decomposition. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 28, pp. 118-135, 2020.
- [13] Q. Zheng, G. Chen, A. Jiao, Chatter detection in milling process based on the combination of wavelet packet transform and PSO-SVM, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 120, No. 1-2, pp. 1237-1251, 2022.
- [14] X. Dong, G. Tu, X. Wang, S. Chen, Real-time chatter detection via iterative Vold-Kalman

filter and energy entropy, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 116, pp. 2003-2019, 2021.

- [15] R. Rafal, L. Pawel, K. Krzysztof, K. Bogdan, W. Jerzy, Chatter identification methods on the basis of time series measured during titanium superalloy milling, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 99, pp. 196-207, 2015.
- [16] B. Hauptfleischová, L. Novotný, J. Falta, M. Machálka, M. Sulitka, In-process chatter detection in milling: comparison of the robustness of selected entropy methods, Journal of Manufacturing and Materials Processing, Vol. 6, No. 5, pp. 125, 2022.
- [17] J. Ye, P. Feng, C. Xu, Y. Ma, S. Huang, A novel approach for chatter online monitoring using coefficient of variation in machining process, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 96, pp. 287-297, 2018.
- [18] C. Liu, L. Zhu, C. Ni, Chatter detection in milling process based on VMD and energy entropy, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 105, pp. 169-182, 2018.
- [19] M. Perrelli, F. Cosco, F. Gagliardi, D. Mundo, In-process chatter detection using signal analysis in frequency and time-frequency domain. Machines, Vol. 10, No. 1, pp. 24, 2021.
- [20] Z. Yao, D. Mei, Z. Chen, On-line chatter detection and identification based on wavelet and support vector machine, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 210, No. 5, pp. 713-719, 2010.
- [21] M. Xie, X. Yu, Z. Ren, Y. Li, Milling chatter recognition based on dynamic and wavelet packet decomposition. Mechanical Sciences, Vol. 13, No. 2, pp. 803-815, 2022.
- [22] P. Stavropoulos, T. Souflas, D. Manitaras, C. Papaioannou, H. Bikas, Optimization of Milling Processes: Chatter Detection via a Sensor-Integrated Vice, Machines, Vol. 11, No. 1, pp. 52, 2023.
- [23] Y. Wang, Q. Bo, H. Liu, L. Hu, H. Zhang, Mirror milling chatter identification using Q-factor and SVM, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 98, pp. 1163-1177, 2018.
- [24] Y. Chen, H. Li, X. Jing, L. Hou, X. Bu, Intelligent chatter detection using image features and support vector machine, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 102, pp. 1433-1442, 2019.

Прве технике за детекцију подрхтавања и дефинисање динамичког модела обрадног система везане су за појам карата стабилности, које се формирају експерименталним путем. У процесима обраде глодањем, карте стабилности се формирају обрадом стрме равни. Део за експерименталну верификацију се претходно припреми тако да се на њему формира стрма раван познатог угла нагиба. Након тога се формирају жлебови ширине пречника алата (глодало је у пуном захвату), са линеарно растућом дужином, док корак по зубу и број обрта остају константни. Идентичан експеримент се изводи на стругу, при чему се у том случају уздужно обрађује конусна површ, чиме се остварује линеарни раст дубине резања до тренутка када се у сигналу, на пример убрзања, препозна нагли раст амплитуде одзива структуре.

Развојем рачунара и технике, сензорских система и појавом система за аквизицију података, поједностављена је примена процедура експерименталне идентификације динамичких параметара механичких структура, позната под називом експериментална модална анализа (енгл. *Experimental Modal Analysis* - ЕМА) [1, 3, 4]. Резултати модалне анализе (сопствене фреквенције, коефицијенти пригушења и облици осциловања) изведени из фреквентне карактеристике за разматране степене слободе су параметри неопходни у развијеним процедурама за аналитичко формирање карата стабилности, а уз интегрисање модела тренутних сила резања и модела промене пресека нерезане струготине. Ова процедура јасно

је представљена у бројним литературним изворима [5-8]. Накнадно унапређење оваквих процедура остварено је кроз укључење феномена процесног пригушења (ефекат променљиве силе трења по леђној површини вибрирајућег алата, енгл. *Process damping*) у динамички модел процеса резања, чиме су креиране карте стабилности у зони мањих брзина резања постале значајно поузданије [5 - 9].

Праћење стања процеса обраде је захтевна процедура. Она захтева скупу опрему у коју спадају: рачунари, широк спектар сензорских система и вештине тумачења сигнала снимљених са сензора током процеса обраде. Развијени су бројни математички модели, а уз њих и програмски алгоритми и пакети за филтрирање сигнала и идентификацију подрхтавања. Бројни алгоритми за идентификацију сигнала развијени су у институтима и истраживачким центрима широм света. Најзаступљенији сензори који се у ове сврхе користе су динамометри за мерење силе резања и акцелерометри за мерење убрзања, односно брзине или релативног померања појединих елемената обрадног система током процеса обраде. За праћење стања процеса обраде користе се још и акустични сензори и микрофони за мерење нивоа и промене буке током обраде. Одређивање стандардне девијације, искривљености, куртозе, ентропије, средње вредности само су неке од статистичких величина које се одређују за поједине сегменте или за цео запис сигнала са сензора у временском домену [8-16], као потенцијалних индикатора на тренутак појаве подрхтавања. Дефинисање јасног тренутка при којем долази до подрхтавања везано је за дефинисање прага [17], који је врло често у функцији од претходно одређених статистичких величина. Понекад се за дефинисање прага узимају у обзир статистичке величине и из временског и из фреквентног домена. Фуријеова трансформација и Хуанг-Хилбертова трансформација су само неке од метода које се примењују за трансформацију сигнала из временског у фреквентни домен [1, 3-5]. Један од најбољих показатеља промене у запису сигнала (тренутак појаве подрхтавања), јесте амплитудни спектар. Највеће промене у амплитудном спектру се јављају на сопственим фреквенцијама елемената обрадног система, које су кључне за детекцију подрхтавања. С обзиром на то да је структура обрадног система таква да фреквенције које се могу идентификовати у измереном сигналу потичу не само од обрадног процеса, већ и од других елемената у обрадном систему као што су преносници и лежаји, често се поставља питање како раздвојити једне од других ради лакшег тумачења и идентификације подрхтавања. Један од алата су тзв. Вејвлети (енгл. *Wavelets*) [18-21]. Вејвлети се најчешће примењују за анализу сигнала у временско-фреквентном домену на тај начин што оригинални сигнал филтрира по нивоима са узимањем половине одбирака сигнала између два нивоа. Сваки следећи ниво има увек дупло мањи број одбирака. Сличан алат Вејвлетима је техника за емпиријско декомпоновање сигнала (енгл. *Empirical Mode Decomposition* - EMD) која се користи у оквиру Хуанг-Хилбертове трансформације.

Све претходно наведене методе за декомпоновање и сегментисање сигнала, као и одређивање статистичких величина у временском, фреквентном и временско-фреквентном домену, подстакле су развој алгоритама за класификацију и регресију као што су (енгл. *Support Vector Machines* - SVM), односно машине са носећим векторима [11-13, 22-24]. Основна идеја SVM-а је пронаћи хиперраван у простору података која најбоље раздваја инстанце различитих класа. Хиперраван је одабрана тако да максимизује размак између два скупа података. Носећи вектори су тачке у простору података које леже најближе хиперравни и играју кључну улогу у њеном одређивању. SVM има способност да ради добро са високодимензионалним подацима, а такође се може користити и са нелинеарним границама између класа коришћењем кернела за прорачунавање скаларног производа без трансформације улазних података из једног хиперпростора у други. Додатно побољшање ових алгоритама је уследило након примене вештачких неуронских мрежа (енгл. *Artificial Neural Networks* - ANN) и алгоритама за оптимизацију инспирисаних понашањем јата честица у природи, посебно птица и риба (енг. *Particle Swarm Optimization* - PSO). Принцип

рада PSO-а је симулација понашања јата честица које се крећу кроз простор претраге на бази претходно стеченог искуства и знања како би пронашле оптимално решење, где свака честица представља потенцијално решење проблема. У литературном извору [13] могу се пронаћи поједина решења за детекцију подрхтавања која упоредо користе WAVELET-SVM-PSO алгоритме и њихове комбинације.

Корак даље у области детекције подрхтавања је направљен развојем система, који поред свега претходно наведеног врши потискивање подрхтавања из процеса обраде у реалном времену. Првобитна решења су се односила на развој система који ће избацити одговарајући аларм на машини, упалити светло за сигнализацију или зауставити машину, док се данас интензивно ради на развоју система који у реалном времену врше оптимизацију, односно модулацију, параметара програма обраде, тако да се избегне подрхтавање. Овакви системи су изузетно скупи и тренутно престављају интелектуалну својину института и развојних центара, што их чини мање доступним потенцијалним корисницима. Управо је ово један од разлога за развој сопственог система за предикцију и детекцију подрхтавања, који се разматра у предложеној теми докторске дисертације.

3. Полазне хипотезе

Имајући у виду постојећа ограничења развијених модела подрхтавања, као и процедура за предикцију појаве и процедура детекције настанка подрхтавања у реалном технолошком окружењу, уз спознају о екстремно штетном утицају ове појаве на техно-економске ефекте обраде, предлог је да се истраживања у оквиру ове дисертације усмере на проверу следећих хипотеза:

Хипотеза 1:

За изабрани метод обраде могуће је развити алгоритме и одговарајуће програмске модуле симулационог окружења такве да се, на основу геометријског модела резног алата, изабраног модела за интерпретацију запремине материјала обратка и креираног програма обраде у виду G-кода, могу идентификовати параметри мапе захвата у тачкама програмиране путање, довољни да се рад оцени као стабилан или нестабилан, а уз коришћење експериментално идентификоване карте стабилности. Ради се дакле о функцији предикције подрхтавања.

Хипотеза 2:

Могуће је развити модел, унутар симулационог окружења, којим се на основу специфичних параметара мапе захвата одређује потенцијал за настанак подрхтавања при конкретним условима обраде у разматраној тачки програмиране путање. Полази се од опсервације да повећање одређених параметара мапе захвата доприноси нестабилном раду, а други скуп параметара својим растом остварује стабилишуће дејство. Тиме се ствара предуслов за предикцију подрхтавања дуж програмиране путање исказан релативно, без потребе за експерименталном идентификацијом динамике структуре обрадног система.

Хипотеза 3:

Алгоритми обраде сигнала у временском и фреквентном домену и технике машинског учења могу се употребити за предикцију и детекцију настанка подрхтавања у реалном технолошком окружењу уз могућност коришћења упоредних алгоритама.

4. Научне методе истраживања

Имајући у виду свеобухватност, комплексност и мултидисциплинарни карактер тематске области, у овој докторској дисертацији планира се коришћење следећих метода:

1. Методе статистичке анализе података – користиће се за анализу експерименталних резултата;
2. Методе машинског учења засноване на статистичкој теорији учења (пре свега машине са носећим векторима) – користиће се за класификацију статистичких података одређених над парцијалним деловима сигнала са сензора, снимљених током процеса обраде;
3. Методе за обраду сигнала снимљених у експерименталним условима – користиће се за претпроцесирање прикупљених сигнала из реалних обрадних система;
4. Методе за софтверску и хардверску имплементацију алгоритама – користиће се приликом експерименталне верификације;
5. CAD/CAM/CAE за конфигурисање виртуелног технолошког окружења.

5. Очекивани научни допринос

Научни допринос дисертације припада домену надзора и анализе обрадног система. На основу полазних хипотеза и уз примену наведених метода, очекивани научни резултати истраживања у оквиру ове дисертације подразумевају:

- Нову методологију и пратеће алгоритме за предикцију и детекцију подрхтавања током процеса обраде на бази сензорских информација који прате вредности појединих параметара током процеса обраде и за аутоматско генерисање карте стабилности за изабрани обрадни систем у симулационом окружењу.

Избором одговарајућег алгоритма, појединих конструкционих параметара обрадног система и параметара процеса обраде, биће омогућено аутоматско генерисање карте стабилности за изабрани обрадни систем у симулационом окружењу. Тиме се врши уштеда у времену и употреби скупе лабораторијске опреме. Развијени модели у оквиру ове дисертације, треба да омогуће адаптацију појединих параметара процеса обраде, у току припреме програма за обраду (off-line), или у току процеса обраде (real time), што ће бити правац будућих истраживања на ову тему.

6. План истраживања и структура рада

План истраживања, у оквиру предметне докторске дисертације, реализује се кроз следеће фазе:

1. Анализа стања у области истраживања подрхтавања. Анализа постојећих врста кибернетских система за идентификацију, детекцију и потискивање подрхтавања из обрадног процеса;
2. Преглед и критичка анализа литературних извора и претходних истраживања, релевантних за различите приступе за идентификацију, детекцију и потискивање подрхтавања из обрадног процеса, базираних на дизајну виртуелног обрадног система и система управљања;
3. Анализа техника за добијање карата стабилности обрадног система са аспекта могућности њихове примене у моделирању виртуелног модела обрадног система за препознавање подрхтавања у процесима обраде, на основу тренутне мапе захвата задате програмом обраде;

4. Развој техника за предикцију подрхтавања на основу снимљених сигнала са сензора током процеса обраде;
5. Развој динамичког модела обрадног система на основу података добијених применом ЕМА;
6. Развој динамичког модела обрадног система на основу виртуелног модела обрадног система у симулационом окружењу;
7. Верификација новоразвијених алгоритама за оптимизацију задатог програма обраде у циљу предикције и детекције подрхтавања из задатог процеса;
8. Тестирање и практична експериментална верификација новоразвијених алгоритама за предикцију и детекцију током процеса обраде;
9. Анализа остварених експерименталних резултата и дискусија о будућим правцима развоја.

Оквирна структура предложене докторске дисертације обухвата следеће целине:

1. Увод
2. Анализа и класификација услова при којима настаје подрхтавање
3. Преглед и анализа постојећих метода за детекцију, идентификацију и потискивање подрхтавања
 - а) Методе засноване на детекцији подрхтавања
 - б) Методе засноване на идентификацији подрхтавања
 - с) Методе засноване на потискивању подрхтавања
4. Развој методологије за креирање алгоритама за предикцију подрхтавања
 - а) Развој метода за препознавање подрхтавања на основу анализе сигнала са сензора
 - б) Развој метода за креирање карата стабилности обрадног система
 - с) Развој методе за генерисање динамичког модела обрадног система у симулационом окружењу
5. Детекција подрхтавања у обрадном систему
 - а) Имплементација и експериментална верификација развијених алгоритама на примеру стругања
 - б) Имплементација и експериментална верификација развијених алгоритама на примеру глодања
6. Закључци
7. Литература
8. Прилози

7. Закључак и предлог

На основу анализе пријаве теме докторске дисертације кандидата Николе Воркапића, маг.инж.маш., архивиране под евиденционим бројем 1840/1 од 20.11.2023. године, а сходно сагласности Колегијума наставника Катедре за производно машинство број 1840/2 од 28.12.2023. године, као и Одлуци Наставно-научног већа број 104/1 од 18.01.2024. године, Комисија за подношење извештаја о научној заснованости теме докторске дисертације закључује да је предложена тема научно утемељена и адекватна за израду докторске дисертације високог ранга, којом се може остварити значајан научни допринос, као и да кандидат испуњава законске и друге услове за рад на предметној докторској дисертацији, тако да Комисија предлаже Наставно-научном већу Универзитета у Београду - Машинског факултета да се

Николи Воркапићу, маг.инж.маш.

одобри израду докторске дисертације под називом

Предикција и детекција подрхтавања у обрадном систему

Која припада научној области: **машинско инжењерство** и ужој научној области **производно машинство**, а за коју је матичан Универзитет у Београду - Машински факултет. Комисија предлаже Наставно-научном већу Универзитета у Београду - Машинског факултета да се за **ментора** наведене докторске дисертације кандидата Николе Воркапића, маг.инж.маш., именује **др Саша Живановић**, редовни професор Универзитета у Београду - Машинског факултета који испуњава све услове у складу са чланом 28. Правилника о докторским студијама на Универзитету у Београду – Машинском факултету.

Београд, 26.01.2024. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Проф. др Живана Јаковљевић, редовни професор
Универзитет у Београду - Машински факултет

.....
Проф. др Никола Славковић, ванредни професор
Универзитет у Београду - Машински факултет

.....
др Бранко Кокотовић, доцент
Универзитет у Београду - Машински факултет

.....
Проф. др Слободан Табаковић, редовни професор
Факултет техничких наука Нови Сад

.....
Др Зоран Димић, виши научни сарадник
Лола институт д.о.о