

Факултет Машински

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

469/4

(Број захтева)

24.04.2025.

(Датум)

Веће научних области техничких наука(Назив већа научне области коме се захтев
упућује)**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:

**КОНЦЕПЦИЈСКО ПРОЈЕКТОВАЊЕ И ОПТИМИЗАЦИЈА ПАРАМЕТАРА НОВЕ МАШИНЕ
СА ПАРАЛЕЛНОМ КИНЕМАТИКОМ ПОДРЖАНО ВИРТУЕЛНИМ ОБРАДНИМ СИСТЕМОМ**

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ: Машинство (ужа научна област: производно машинство)

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

1. Име, име једног од родитеља и презиме кандидата:
ЉУБОМИР (МИЛИЋ) НЕШОВАНОВИЋ
2. Претходно образовање (назив и седиште факултета, студијски програм):
Универзитет у Београду - Машински факултет, Краљице Марије 16, 11120 Београд 35
3. Година завршетка претходног нивоа студија: 2021.
4. Година уписа на докторске студије: 2021.
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] Zivanovic Sasa, Dimic Zoran, Furtula Mladen, Slavkovic Nikola, Djurkovic Marija, Vidakovic Jelena (2024). A flexible programming and verification methodology for reconfigurable CNC woodworking machine, *BioResources* 19(4), 9708–9726, <https://doi.org/10.15376/biores.19.4.9708-9726> IF1.5-2023, (9/20) M22
- [2] Vorkapic Nikola., Slavkovic Nikola, Kokotovic Branko, Zivanovic Sasa, Dimic Zoran (2024). Implementation of a cutting forces model through virtual simulation of machining process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 135, 3085–3099, <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14681-7> IF3.2-2023, (27/51) M22
- [3] Tabakovic Slobodan, Zeljkovic Milan, Zivanovic Sasa, Budimir Alexander, Dimic Zoran, Kosarac Aleksandar (2024). Calibration of a Hybrid Machine Tool from the Point of View of Positioning Accuracy, *Applied Sciences*, 14, 5275. pp.1-17, <https://doi.org/10.3390/app14125275> IF2.5-2023, (39/91) M22
- [4] Dimic Zoran, Zivanovic Sasa, Pavlovic Dragan, Furtula Mladen, Djurkovic Marija, Rakic Aleksandar, Kokotovic Branko (2024). Reconfigurable open architecture control system with integrated digital twin for 3-axis woodworking milling machine, *Wood material science & engineering*, Published online: 15 Feb 2024, <https://doi.org/10.1080/17480272.2024.2318024> IF2.3-2023, (6/20) M21
- [5] Milutinovic Milan, Vasilic Goran., Zivanovic Sasa, Dimic Zoran, Kokotovic Branko, Slavkovic, Nikola (2024). Calculation of wheel path for 3+2-axis grinding of brazed carbide profilemill cutters for wood and plastic, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 130, pp. 4603–4620, <https://doi.org/10.1007/s00170-024-12992-3> IF3.2-2023, (27/51) M22
- [6] Živanović Saša, Dimić Zoran, Rakić Aleksandar, Slavković Nikola, Kokotović Branko, Manasijević Srećko (2023). Programming methodology for multi-axis CNC woodworking machining center for advanced manufacturing based on STEP-NC, *Wood Material Science & Engineering*. Taylor & Francis Ltd, Abingdon, 18(2), 630-639, ISSN: 1748-0272, 10.1080/17480272.2022.2057816 IF2.3-2023, (6/20) M21
- [7] Kvrđić Vladimir, Ribić Aleksandar I, Dimić Zoran, Živanović Saša, Dodevska Zorica (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 IF4.8-2022, (18/50) M22
- [8] Živanović Saša, Tabaković Slobodan, Željковић 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 IF2.361-2021, (74/137) M22
- [9] 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 IF4.42-2021, (21/51) M22
- [10] 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 IF2.005-2021, (9/21) M22
- [11] 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 IF1.734-2020, (89/133) M23
- [12] 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 IF2.122-2020, (69/133) M22
- [13] Vasilic 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 IF3.866-2020, (29/133) M21
- [14] Vasilic 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, IF1.463-2019, (88/130) M23

[15] 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 IF1.755-2019, (76/130) M22

[16] 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 IF2.861-2019, (23/50) M22

[17] 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 IF1.356-2018, (87/129) M23

[18] Toquica Juan S., Živanović Saša, Alvares Alberto J., Bonnard Renan (2018). A STEPNC 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 IF2.75-2018, (21/49) M22

[19] 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 IF4.392-2018, (5/26) M21

Обавештавамо вас да је Наставно – научно веће на седници одржаној 24.04.2025. 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

Напомена: Факултет доставља Универзитету захтев са прилозима у електронској форми и једном писаном примерку за архиву Универзитета

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
Број: 469/4
Датум: 24.04.2025. 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 24.04.2025. 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 **ЉУБОМИРА НЕШОВАНОВИЋА**, магист. инж. маш. под насловом

„КОНЦЕПЦИЈСКО ПРОЈЕКТОВАЊЕ И ОПТИМИЗАЦИЈА ПАРАМЕТАРА НОВЕ МАШИНЕ СА ПАРАЛЕЛНОМ КИНЕМАТИКОМ ПОДРЖАНО ВИРТУЕЛНИМ ОБРАДНИМ СИСТЕМОМ“.

Извештај је поднела Комисија у саставу: др Бранко Кокотовић, ванр. проф., др Никола Славковић, ванр. проф., др Живана Јаковљевић, ред. проф., др Милош Пјевић, ванр. проф. и др Зоран Димић, виши научни сарадник, Лола Институт Београд.

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
Љубомира Нешовановића, маг.инж.маш.

Одлуком Наставно-научног већа Универзитета у Београду - Машинског факултета бр. 469/2 од 03.4.2025. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације под називом **„Концепцијско пројектовање и оптимизација параметара нове машине са паралелном кинематиком подржано виртуелним обрадним системом“** кандидата **Љубомира Нешовановића, маг.инж.маш.**

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Љубомир Нешовановић, маг.инж.маш., рођен је 29. априла 1997. године у Чачку, Република Србија. Завршио је основну школу „Милан Благојевић“ у Лучанима као одличан ђак у периоду од 2004 до 2012. године. Завршио је Гимназију „Свети Сава“ у Пожеги као одличан ђак у периоду од 2012 до 2016. године.

Основне академске студије на Универзитету у Београду – Машинском факултету уписује школске 2016/2017 године. Укупна просечна оцена током Основних академских студија износи 9.23 (девет и 23/100). Завршни рад на тему *„Примена биолошки инспирисаних техника вештачке интелигенције у роботизованом унутрашњем транспорту материјала“*, који је оцењен оценом 10, је радио под менторством проф др Зорана Миљковића. Награђиван је поводом Дана факултета за изванредан успех постигнут на Основним академским студијама.

Мастер академске студије на модулу за Производно машинство, Универзитета у Београду – Машинског факултета, уписује школске 2019/2020 године. Укупна просечна оцена током Мастер академских студија износи 9.90 (девет и 90/100). Мастер рад на тему *„Конфигурисање машине алатке на бази Ламбда паралелног механизма са транслаторно оснаженим актуаторима“*, који је оцењен оценом 10, је радио под менторством проф др

Саше Живановића. Награђиван је поводом Дана факултета за изванредан успех постигнут на Мастер академским студијама. Докторске студије уписује школске 2021/2022. године на Машинском факултету Универзитета у Београду (број индекса Д15/21).

Од 1.11.2021 године запослен је у Истраживачко развојном институту ЛОЛА у Сектору за машинске системе. Кандидат Љубомир Нешовановић је од 29.10.2021. године изабран у звање истраживач приправник, одлуком бр. 257 Научног већа Лола Института у Београду. Своје научноистраживачке и стручне активности обавља и ангажовањем као истраживач приправник у оквиру иновационих ваучера Фонда за иновациону делатност Републике Србије и у оквиру комерцијалних пројеката.

Усавршавање у области машина-алатки наставља похађањем специјализованог курса, који обухвата стицање знања из CAD/CAM технологија, са посебним фокусом на софтверски пакет HyperMILL, у октобру 2023. године.

У оквиру својих задатака у институту ЛОЛА у октобру 2024. године је учествовао у организацији и спровођењу специјализоване обуке за CNC оператере. Такође, био је ангажован у едукативним активностима које су реализоване у оквиру годишњих стручних пракси за студенте машинске струке и ученике струковних средњих школа

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 (Part, Assembly, Drawing, Sheet metal), PTC Creo (Part, Assembly, Drawing, Sheet metal, Manufacturing), Solid works (Part, Assembly, Drawing, FEA Analysis), Catia (Part, Assembly), Vericut, Matlab, LabView (Data Acquisition), Latex, AnyLogic, Tecnomatix Plant Simulation, Adobe Illustrator.

Истраживачке области

Машине алатке, виртуелне машине алатке и виртуелни обрадни системи, CAD/CAM системи, машине алатке са паралелном кинематиком, концепцијско пројектовање машина алатки са паралелном кинематиком, испитивање радног простора машина са паралелном кинематиком, оптимизација параметара машина са паралелном кинематиком.

Остало

Поседује возачку дозволу Б категорије

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Кандидат Љубомир Нешовановић, маг.инж.маш., уписао је Докторске студије на Универзитету у Београду - Машинском факултету школске 2021/2022. 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 (o*)</i>	Проф. др Слободан Радојевић	5	10 (десет)
<i>Нумеричке методе (o*)</i>	Проф. др Миодраг Спалевић	5	10 (десет)
<i>ОМНИР (организација и методе научно - истраживачког рада) и комуникација (o*)</i>	Проф. др Милош Недељковић	5	10 (десет)
<i>Аквизиција и обрада експерименталних података (и*)</i>	Проф. др Бранко Кокотовић	5	10 (десет)
<i>Истраживање и публикување - 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 (o*)</i>	Проф. др Зоран Митровић	5	10 (десет)
<i>CAD/CAM системи и интеграција пројектовања производа и технологија (и*)</i>	Проф. др Саша Живановић	5	10 (десет)
<i>Теорија резања (и*)</i>	В.проф. Др Милош Пјевић	5	10 (десет)
<i>Истраживање и публикување - II</i>	Проф. др Саша Живановић	15	10 (десет)

Трећи семестар Докторских академских студија

Назив предмета	Предметни наставник	ЕСПБ	Оцена
<i>Испитивање и оптимизација обрних система (и*)</i>	Проф. др Саша Живановић	5	10 (десет)
<i>Теорија и симулација процеса обраде (и*)</i>	Проф. др Михајло Поповић	5	10 (десет)
<i>Истраживање и публикување - III</i>	Проф. др Никола Славковић	20	10 (десет)

Четврти семестар Докторских академских студија

Назив предмета	Предметни наставник	ЕСПБ	Оцена
<i>Пројекат идеје докторске дисертације</i>	Проф. др Саша Живановић Проф. др Радован Пузовић Проф. др Никола Славковић	30	10 (десет)

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

Љубомир Нешовановић је на Докторским академским студијама – Машинско инжењерство на Универзитету у Београду - Машинском факултету положио 4 (четири) обавезна и 5 (пет) изборних предмета (сваки вреднован по 5 ЕСПБ бодова), чиме је остварио укупно 45 ЕСПБ бодова. Резултати научноистраживачког рада Љубомира Нешовановића на Универзитету у Београду - Машинском факултету, реализовани су кроз интензиван експериментални рад у

Лабораторији за обрадне системе (Истраживање и публикавање I-III), верификовани су објављивањем радова што указује на то да је кандидат веома успешно остварио додатних 45 ЕСПБ бодова. Кандидат је успешно написао и одбранио Пројекат идеје докторске дисертације, што је Комисија у саставу проф. др Саша Живановић, проф. др Радован Пузовић и проф. др Никола Славковић потврдила оценом 10 (десет), чиме је кандидат стекао додатних 30 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.

У наставку је дат списак објављених научних радова и других релевантних резултата и активности које опредељују афинитет кандидата за рад на предложеној теми.

Саопштења са међународног скупа, штампана у целини (M33)

- [1] **Nešovanović, Lj.**, Živanović, S., Kinematic structure and workspace analysis of a parallel kinematic machine based on Lambda mechanism with actuated translation joints, 21st International Symposium INFOTEH-JAHORINA, Proceedings, pp. 272-277, Jahorina, 16-18 March 2022.
- [2] **Nešovanović, Lj.**, Živanović, S., Conceptual design of a novel mechanism with parallel kinematics based on Chebyshev's linkage, 16th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering DEMI 2023, Proceedings ISBN 978-99976-11-03-1, Banja Luka, 1-2 June, pp. 35-40, 2023.
- [3] **Nešovanović, Lj.**, Živanović, S., Verification of kinematic joints on a physical prototype of a novel parallel mechanism based on Chebyshev's linkage, 39th International Conference on Production Engineering of Serbia, Proceedings ISBN 978-86-6022-610-7, Novi Sad, 26-27. October, pp. 246-251, 2023.
- [4] **Nešovanović, Lj.**, Živanović, S., Konjević, P.: Inaccuracy analysis of Chebyshev's mechanism, 10th International Scientific Conference on Flexible Technologies - MMA 2024, ISBN 978-86-6022-680-0, pp. 79-82, Novi Sad, Serbia, September 24-26, 2024.
- [5] Živanović, S., **Nešovanović, Lj.**, Dimić, Z., Puzović, R., Simulation of parallel kinematic machine with specific solutions of the passive translatory joint, Proceedings of the 7th international scientific conference "Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications" COMETA2024, ISBN 978-99976-085-2-9, pp. 284- 290, University of East Sarajevo Faculty of Mechanical Engineering, East Sarajevo-Jahorina, RS, B&H, 14.-16. November 2024.

Рад у врхунском часопису националног значаја (M51)

- [6] **Nešovanović, Lj.**, Živanović, S., Workspace and Kinematic Structure Analysis of a 6-DOF Lambda Parallel Kinematic Machine, International Journal of Electrical Engineering and Computing, Vol. 6, No. 1, pp.1-8, 2022. UDC 004.45:004.388]:621.9, DOI 10.7251/IJEEC2206001N.

Саопштење са скупа националног значаја, штампано у целини (M63)

- [7] **Нешовановић, Љ.**, Живановић, С., Поповић М., Симулација рада троосног механизма са паралелном кинематиком на бази механизма Чебишева, 44. Јупитер конференција, ИСБН 978-86-6060-204-8, пп. 3.49-3.54, Београд, Октобар 2024.

- [8] Воркапић, Н., Малетић, Ј., **Нешовановић, Љ.**, Живановић, С., Пјевић, М., Експериментална идентификација специфичних сила резања са експериментим 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, 04-05. октобар 2022.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Кандидат Љубомир Нешовановић, магистар машиничког инжењерства, својим досадашњим истраживачким активностима показао је посебну заинтересованост, преданост и изражену способност за научноистраживачки рад.

Публиковани научни радови у зборницима радова на међународним и националним научним скуповима и националном часопису указују на изразит потенцијал и посвећеност кандидата да се бави комплексним мултидисциплинарним теоријским и експерименталним научним истраживањима, која су суштински повезана 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

Научна област у којој се спровode истраживања која представљају предмет разматране докторске дисертације је производно машинство, при чему се у овом конкретном случају посебан акценат ставља на процес концепцијског пројектовања нових машина алатки са паралелном кинематиком [1-8].

Централни предмет истраживања у оквиру разматране дисертације је развој нове машине са паралелном кинематиком, која ће бити иновирана по својој концепцији, примени прилагођених метода за оптимизацију и пројектовање, посебним приступом у формирању метода за програмирање и управљање, као и увођењем посебних процедура за испитивање и верификацију. Машина са паралелном кинематиком базирана је на новом паралелном механизму и као таква је препозната као машина алатка нове генерације. Таква нова машина алатка оставља могућност остварења функционалних захтева у погледу мултифункционалности, реконфигурабилности, адаптивности управљања [28-31] итд.

Кључне теме које ће представљати основ истраживања садржаних у оквиру дисертације подразумевају анализу геометријског и кинематичког модела машине, испитивање облика и мера радног простора и сингуларитета изабране нове машине са паралелном кинематиком. Фундаментална карактеристика машина са паралелном кинематиком уопште, па самим тим и машине која се разматра у оквиру дисертације, је радни простор [19-21] који представља полазну техничку карактеристику за одређивање параметара паралелног механизма. Оптимизација геометријских параметара механизма машине ће бити у уској вези са анализом радног простора, при чему се функција циља формулише у виду максималне величине радног простора избором оптималних параметара механизма уз ограничења исказана кроз очување својстава покретљивости механизма [22-26].

Конфигурисање нове машине са паралелном кинематиком, као и развој компонената ће бити засновано на парадигми виртуелних обрадних система што ће резултирати конфигурисањем виртуелног прототипа машине у програмским и симулационим окружењима за развој, програмирање и управљање [12,27]. То је и суштина парадигме виртуелног обрадног система: развити довољно поуздано симулационо окружење, тако да је унутар њега могуће интерпретирати, анализирати, унапређивати и испитивати машину, као да је она стварна.

У оквиру верификације рада разматране машине са паралелном кинематиком ће се узети у обзир три могуће технологије које јој обезбеђују својства реконфигурабилности и мултифункционалности и то: обрада глодањем, обрада ласерским гравирањем и адитивна технологија [12]. Могућност промене намене саме машине представља својство мултифункционалности, што захтева примену различитих компоненти у конструкцији саме машине и представља својство подесиве способности које имају реконфигурабилне машине алатке. Истраживања која ће бити спроведена у оквиру разматране дисертације теже ка томе да развијену машину са паралелном кинематиком уврсте у групу машина алатки нове генерације која се по своме концепту и/или карактеристикама разликује од до сада познатих машина алатки.

У оквиру предложене дисертације биће развијена методологија за концепцијско пројектовање и оптимизацију параметара нове машине са паралелном кинематиком, уз подршку виртуелног обрадног система. Предложена методологија ће бити верификована кроз израду и тестирање виртуелног и физичког лабораторијског прототипа. Кључне компоненте предложене методологије се могу поделити и уједно представљати неке од најважнијих циљева предложене дисертације:

- Формирање математичког модела са циљем идентификације геометрије, кинематике, радног простора и сингуларитета изабране нове машине са паралелном кинематиком;
- Оптимизација параметара паралелног механизма ради постизања оптималних перформанси машине, узимајући у обзир дефинисане критеријуме;
- Развој система за концепцијско пројектовање који омогућава решавање кинематичких проблема, анализу радног простора и сингуларитета као и оптимизацију параметара машине са паралелном кинематиком;
- Развој система управљања отворене архитектуре на РС платформи са интегрисаном виртуелном машином и окружењем за програмирање које подржава верификацију програма на виртуелној машини;
- Развој и израда едукационог експерименталног окружења са једном новом машином са паралелном кинематиком за рад у лабораторијским условима;
- Верификација система за концепцијско пројектовање машине са паралелном кинематиком на примеру развојног испитивања лабораторијског прототипа машине са паралелном кинематиком и отвореном архитектуром управљања на РС платформи.

У наставку ће бити наведени неки од релевантних литературних извора за предложену тему дисертације.

2.1. Преглед и анализа литературе

- [1] P. Grosch and F. Thomas, Parallel Robots With Unconventional Joints: Kinematics and Motion Planning. in Parallel Robots: Theory and Applications. Cham: Springer International Publishing, 2019. doi: 10.1007/978-3-030-11304-9.
- [2] J. Gallardo-Alvarado, Kinematic Analysis of Parallel Manipulators by Algebraic Screw Theory. Cham: Springer International Publishing, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-31126-5.
- [3] X.-J. Liu and J. Wang, Parallel Kinematics: Type, Kinematics, and Optimal Design. in Springer Tracts in Mechanical Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. doi: 10.1007/978-3-642-36929-2.
- [4] X. Kong, C. Gosselin, Type Synthesis of Parallel Mechanisms, vol. 33. in Springer Tracts in Advanced Robotics, vol. 33. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007. doi: 10.1007/978-3-540-71990-8.
- [5] J.P. Merlet, Parallel Robots, vol. 128. in Solid Mechanics and Its Applications, vol. 128. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. doi: 10.1007/1-4020-4133-0.
- [6] C. R. Boër, L. Molinari-Tosatti, and K. S. Smith, Eds., Parallel Kinematic Machines. in Advanced Manufacturing. London: Springer London, 1999. doi: 10.1007/978-1-4471-0885-6.
- [7] P. Pham, 'Design of hybrid-kinematic mechanisms for machine tools', Lausanne, EPFL, 2009. doi: 10.5075/EPFL-THESIS-4314.
- [8] R. Neugebauer, Parallelkinematische maschinen: entwurf. in VDI-Buch. Berlin: Springer, 2006.
- [9] S. Briot, A. Pashkevich, and D. Chablat, 'Technology-Oriented Optimization of the Secondary Design Parameters of Robots for High-Speed Machining Applications', in Volume 2: 34th Annual Mechanisms and Robotics Conference, Parts A and B, Montreal, Quebec, Canada: ASMEDC, Jan. 2010, pp. 753–762. doi: 10.1115/DETC2010-28107.
- [10] W. Bi, F. Xie, X.-J. Liu, and X. Luo, 'Optimal design of a novel 4-degree-of-freedom parallel mechanism with flexible orientation capability', Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, vol. 233, no. 2, pp. 632–642, Jan. 2019, doi: 10.1177/0954405417731469.
- [11] D. Milutinovic, M. Glavonjic, V. Kvrjic, and S. Zivanovic, 'A New 3-DOF Spatial Parallel Mechanism for Milling Machines with Long X Travel', CIRP Annals, vol. 54, no. 1, pp. 345–348, 2005, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60119-X.
- [12] S. Zivanovic, S. Tabakovic, M. Zeljkovic, and Z. Dimic, 'Modelling and analysis of machine tool with parallel–serial kinematics based on O-X glide mechanism', J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng., vol. 43, no. 10, p. 456, Oct. 2021, doi: 10.1007/s40430-021-03171-6.
- [13] M. Glavonjić, D. Milutinović, S. Živanović, 'Troosni paralelni mehanizmi sa specifičnim rešenjima pasivnog translatorskog zgloba', Zbornik radova 32. Jupiter konferencije, ppt. 3.1-3.4, 2006, Zlatibor.
- [14] J. E. Shigley and J. J. Uicker, Theory of machines and mechanisms. in McGraw-Hill series in mechanical engineering. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [15] D. Klyukin, M. Shchedrin and V. Tarabarin, 'Straight-line Mechanisms in the Collection of Bauman Moscow State Technical University', The 13th World Congress in Mechanism and Machine Science, A21_451, Member Organization Mexico of IFToMM, 2011, Guanajuato.

- [16] D. Zhang, *Parallel Robotic Machine Tools*. Boston, MA: Springer US, 2010. doi: 10.1007/978-1-4419-1117-9.
- [17] K. Wang, J. Li, H. Shen, J. You, and T. Yang, 'Inverse Dynamics of A 3-DOF Parallel Mechanism Based on Analytical Forward Kinematics', *Chin. J. Mech. Eng.*, vol. 35, no. 1, p. 119, Dec. 2022, doi: 10.1186/s10033-022-00781-6.
- [18] Y. M. Azmoun, A. Rouhollahi, M. T. Masouleh, and A. Kalhor, 'Kinematics and Control of a 4-DOF Delta Parallel Manipulator', in *2018 6th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)*, Tehran, Iran: IEEE, Oct. 2018, pp. 494–500. doi: 10.1109/ICRoM.2018.8657618.
- [19] Xu, F. Yang, Y. Mei, D. Zhang, Y. Zhou, and Y. Zhao, 'Kinematic, Workspace and Force Analysis of A Five-DOF Hybrid Manipulator R(2RPR)R/SP+RR', *Chin. J. Mech. Eng.*, vol. 35, no. 1, p. 123, Dec. 2022, doi: 10.1186/s10033-022-00792-3.
- [20] Z. Anvari, P. Ataei, and M. Tale Masouleh, 'Collision-free workspace and kinetostatic performances of a 4-DOF delta parallel robot', *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 41, no. 2, p. 99, Feb. 2019, doi: 10.1007/s40430-019-1605-2.
- [21] M. Russo, D. Zhang, X.-J. Liu, and Z. Xie, 'A review of parallel kinematic machine tools: Design, modeling, and applications', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 196, p. 104118, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2024.104118.
- [22] Z. M. Bi and Y. Jin, 'Kinematic modeling of Exechon parallel kinematic machine', *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 27, no. 1, pp. 186–193, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.rcim.2010.07.006.
- [23] X.-J. Liu and J. Wang, 'A new methodology for optimal kinematic design of parallel mechanisms', *Mechanism and Machine Theory*, vol. 42, no. 9, pp. 1210–1224, Sep. 2007, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2006.08.002.
- [24] Nayak, V. Gupte, and P. Singru, 'Studying the Effects of Varying Link Lengths in Double Lambda Mechanism and Its Application to Rover Suspension Design', in *Recent Advances in Machines and Mechanisms*, V. K. Gupta, C. Amarnath, P. Tandon, and M. Z. Ansari, Eds., in *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Singapore: Springer Nature Singapore, 2023, pp. 43–50. doi: 10.1007/978-981-19-3716-3_4.
- [25] E. Rodriguez, C. Riaño, A. Alvares, and R. Bonnard, 'Design and dimensional synthesis of a Linear Delta robot with single legs for additive manufacturing', *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 41, no. 11, p. 536, Nov. 2019, doi: 10.1007/s40430-019-2039-6.
- [26] X.-J. Liu and J. Wang, 'Type Synthesis of Parallel Mechanisms', in *Parallel Kinematics*, in *Springer Tracts in Mechanical Engineering*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, pp. 31–77. doi: 10.1007/978-3-642-36929-2_2.
- [27] S. Tabaković, S. Živanović, 'Simulation of kinematic of virtual prototype of a machine tool based on hybrid O-X mechanism', *Proceedings of 3rd International Scientific Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications COMETA*, University of East Sarajevo, Faculty of Mechanical Engineering, Jahorina, B&H, Republic of Srpska, 2016, pp.199-206.
- [28] Fomin, D. Petelin, A. Antonov, V. Glazunov, and M. Ceccarelli, 'Virtual and Physical Prototyping of Reconfigurable Parallel Mechanisms with Single Actuation', *Applied Sciences*, vol. 11, no. 15, p. 7158, Aug. 2021, doi: 10.3390/app11157158.

- [29] K. V. Varalakshmi and J. Srinivas, 'Design, kinematic and dynamic studies of a reconfigurable parallel manipulator', in Proceedings of the 2015 Conference on Advances In Robotics, Goa India: ACM, Jul. 2015, pp. 1–6. doi: 10.1145/2783449.2783494.
- [30] F. Xie, X.-J. Liu, and Y. Zhou, 'Development and experimental study of a redundant hybrid machine with five-face milling capability in one setup', Int. J. Precis. Eng. Manuf., vol. 15, no. 1, pp. 13–21, Jan. 2014, doi: 10.1007/s12541-013-0301-x.
- [31] G. Vasilic and S. Zivanovic, 'Configuring and analysis of complex multi-axis reconfigurable machine for wire cutting process', Mechanism and Machine Theory, vol. 149, p. 103833, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.103833.

Референце [1-8] дају преглед истраживања у домену машина и механизмима са паралелном кинематиком где су представљени механизми разноврсних кинематичких структура, са нагласком на методе формирања математичких модела код различитих структура паралелних механизма, као и детаљна објашњења везана за примену различитих типова зглобова са специфичним начинима имплементације. Машине алатке са паралелном кинематиком због своје специфичне конфигурације у већини случајева имају проблем величине радног простора, где се као једно од решења овог проблема, које ће бити размотрено у оквиру предметне дисертације, намеће издуживање једне од оса машине како би се повећала величина радног простора [9-12].

Машина са паралелном кинематиком разматрана у оквиру дисертације поседује један кинематички ланац који је концепцијски разликује од других машина са паралелном кинематиком. Поменути кинематички ланац је сачињен од пасивног трансляторног зглоба карактеристичне изведбе, а неки од примера примене пасивног трансляторног зглоба су показани у референцама [11-13].

Због своје специфичности конструкције при концепцијском пројектовању машина са паралелном кинематиком потребно је размотрити примену посебно дизајнираних механизма који поседују могућност трансформације обртног кретања пасивних полуга механизма у праволинијско кретање жељеног елемента механизма. Механизми који поседују ову способност се називају генератори праве линије [13-15] и чиниће значајан део конструкције при пројектовању једног прототипа машине са паралелном кинематиком обухваћене дисертацијом.

Посебну пажњу је неопходно посветити решавању инверзног кинематичког проблема, јер он представља основу за сва даља истраживања, а може бити посебно захтевно код машина са паралелном кинематиком комплексне структуре [16-18].

Радни простор представља основни параметар машина са паралелном кинематиком и као такав је предмет детаљног испитивања [19-21] како би се дубљом анализом дошло до побољшања у самој конструкцији машине. Пројектовање и оптимизација параметара машина са паралелном кинематиком представљају посебну категорију у развоју нових машина, где је због великог броја покретних штапова неопходно детаљно изучити конструкцију и пројектовати машину тако да се дизајном омогуће максималне перформансе саме машине [22-26].

Тежиште испитивања прототипова машина са паралелном кинематиком се због ефикасности и једноставности спроводи у виртуелном окружењу како би се пре прве израде физичког

прототипа добила што функционалнија машина [27-28]. Референце [28-31] обухватају групацију мултифункционалних машина којима потенцијално може припадати неки од концепцијских прототипова чији се развој планира у оквиру дисертације тако да поседује особине модуларности и реконфигурабилности.

3. Полазне хипотезе

У оквиру истраживачке области којом је обухваћена тема предложене докторске дисертације и која се односи на развој методологије за концепцијско пројектовање нове машине са паралелном кинематиком тежиште истраживања ће бити усмерено ка формирању математичког модела, оптимизацији параметара паралелног механизма и конфигурисању управљања. Полазну тачку у оквиру истраживања обухваћених предложеном дисертацијом, представљају следеће полазне хипотезе:

Прва хипотеза: Могуће је развити методологију за концепцијско пројектовање нове машине са паралелном кинематиком, засноване на изабраној класи механизма.

Друга хипотеза: Могуће је успоставити математички модел за идентификацију геометрије, кинематике, радног простора и сингуларитета нове машине са паралелном кинематиком.

Трећа хипотеза: Могуће је извршити оптимизацију геометријских параметара паралелног механизма са функцијама циља које се односе на величину радног простора, уз ограничења која намеће сама конструкција.

Четврта хипотеза: Могуће је развити систем управљања са интегрисаном виртуелном машином на бази управљачког софтвера отворене архитектуре.

Пета хипотеза: Могуће је развити нову машину алатку са паралелном кинематиком са својством мултифункционалности, односно њене примене за различите методе обраде.

4. Научне методе истраживања

Истраживања, која се планирају кроз израду ове дисертације су мултидисциплинарна и сходно томе планира се примена различитих метода истраживања, примерених различитим фазама израде. У том смислу се наводе најважније:

- Методе компилације и класификације за комплетирање поглавља које се односи на систематизацију актуелних научно истраживачких достигнућа у предметној области истраживања.
- Математичке методе и методе моделирања у синтези геометријског модела, модела радног простора и кинематике разматраног објекта.
- Математичке методе у домену оптимизације параметара паралелних механизма, са образложењем изабраног алгоритма оптимизације, функција циља и ограничења.
- CAD/CAM/CAE методе намењене за формирање виртуелног прототипа машине, односно пројектовање, програмирање и симулацију рада виртуелног модела машине по унапред задатом програму;

- Методе синтезе управљања отворене архитектуре на РС платформи за разматрану машину;
- Експерименталне методе верификације физичког прототипа машине са паралелном кинематиком у лабораторијском окружењу, у погледу идентификације параметара геометријске, кинематичке тачности и радне тачности.

5. Очекивани научни допринос

Имајући у виду успостављене циљеве, као и наведене хипотезе у оквиру предложене докторске дисертације, а уз примену претходно наведених научних метода, очекује се да ће бити остварен следећи научни допринос дисертације:

- Нова методологија за концепцијско пројектовање и оптимизацију параметара нове класе машина са паралелном кинематиком која укључује генерализовани математички модел за идентификацију геометрије и кинематике машине, који ће се користити за потребе одређивања радног простора, анализе сингуларитета и оптимизацију параметара новог механизма и као основа за имплементацију специфичног система управљања са тако пројектованом машином.

Применом овакве методологије биће омогућен интегрисан приступ концепцијском пројектовању, који ће омогућити оптимизацију параметара нове класе машина алатки у циљу постизања што повољнијег облика и мера радног простора и избегавања сингуларитета, што је уобичајено један од главних недостатака машина са паралелном кинематиком.

Верификација ће бити остварена и развојем система управљања на бази управљачког софтвера отворене архитектуре са интегрисаном виртуелном машином. Експериментална верификација прототипа нове машине са паралелном кинематиком ће се реализовати кроз развојно испитивање и пробни рад у лабораторијском окружењу.

6. План истраживања и структура рада

Обим истраживања обухваћен предметном дисертацијом подразумева следеће фазе:

1. Анализа достигнућа у истраживањима у области машина алатки са паралелном и хибридном кинематиком;
2. Критички преглед актуелних и релевантних научних сазнања и трендова у области развоја машина алатки са паралелном кинематиком, у циљу формирања адекватне базе знања и идеја ради што боље формулације полазних основа за разраду постављених хипотеза у оквиру предметне дисертације;
3. Развој геометријског модела нове машине са паралелном кинематиком;
4. Развој математичког модела разматране машине алатке са посебним акцентом на решавање инверзног кинематичког проблема;
5. Анализа радног простора као основног параметра за испитивање и анализу машина са паралелном кинематиком;
6. Оптимизација геометријских параметара паралелног механизма и формирање виртуелног прототипа разматране машине алатке са паралелном кинематиком;

7. Развој система управљања отворене архитектуре са интегрисаном виртуелном машином у циљу верификације кинематичког модела машине;
8. Формулација и реализација процедура испитивања саме машине на физичком прототипу, у лабораторијском окружењу, као и тестирање имплементираног система управљања;
9. Анализа резултата остварених у фази испитивања, идентификација могућих унапређења и дефинисање будућих праваца развоја.

Оквирна структура предложене докторске дисертације обухвата следеће целине:

1. Увод
2. Стање истраживања у области машина алатки са паралелном кинематиком
3. Методологја за концепцијско пројектовање и оптимизацију параметара нове машине са паралелном кинематиком
4. Кинематичка структура разматране нове машине са паралелном кинематиком
 - 4.1. Концептуални модел разматране машине
 - 4.2. Идентификација зглобова разматране машине са паралелном кинематиком
5. Пасивни трансаторно-обртни зглоб
 - 5.1. Конструкција
 - 5.2. Функција пасивног трансаторно-обртног зглоба
6. Постављање математичког модела машине
 - 6.1. Решавање инверзног кинематичког проблема машине
 - 6.2. Успостављање једначина за све карактеристичне тачке механизма
7. Анализа радног простора машине
 - 7.1. Математички модел за анализу радног простора машине
 - 7.2. Оптимизација параметара паралелног механизма
8. Пројектовање виртуелног прототипа разматране машине
9. Систем управљања и програмирања разматране машине алатке са паралелном кинематиком
 - 9.1. Управљање отворене архитектуре
 - 9.2. Програмирање машине са паралелном кинематиком
 - 9.3. Интеграција виртуелне машине са системом управљања и верификација система управљања
10. Експериментална верификација рада разматране машине на развијеном прототипу у лабораторијским условима
11. Најава очекиваних научно истраживачких активности
12. Закључци
13. Литература
14. Прилог

7. Закључак и предлог

На основу анализе пријаве теме докторске дисертације кандидата Љубомира Нешовановића, маг.инж.маш., архивиране под евиденционим бројем 288/1 од 20.11.2023. године, а сходно сагласности Колегијума наставника Катедре за производно машинство број 469/1 од 27.3.2025. године, као и Одлуци Наставно-научног већа број 469/2 од 03.04.2025. 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 **Љубомиру Нешовановићу, маг.инж.маш.** одобри израда докторске дисертације под називом

Концепцијско пројектовање и оптимизација параметара нове машине са паралелном кинематиком подржано виртуелним обрадним системом

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 Љубомира Нешовановића, 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, 16.4.2025. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Др Бранко Кокотовић, ванредни професор
Универзитет у Београду - Машински факултет

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

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

.....
Др Милош Пјевић, ванредни професор
Универзитет у Београду - Машински факултет

.....
Др Зоран Димић, виши научни сарадник
ЛОЛА институт, Београд