

Факултет Машински

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

470/4

(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:

**РАЗВОЈ И ВЕРИФИКАЦИЈА ПОСТПРОЦЕСОРА ЗА ВИШЕОСНУ ОБРАДУ НА
НУМЕРИЧКИ УПРАВЉАНИМ МАШИНАМА АЛАТКАМА ПОДРЖАНИ ВИРТУЕЛНИМ
ОБРАДНИМ СИСТЕМОМ**

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

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

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

- Име, име једног од родитеља и презиме кандидата:
ЈУЛИЈА (ЗОРАН) МАЛЕТИЋ
- Претходно образовање (назив и седиште факултета, студијски програм):
Универзитет у Београду - Машински факултет, Краљице Марије 16, 11120 Београд 35
- Година завршетка претходног нивоа студија: 2021.
- Година уписа на докторске студије: 2021.
- 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] Vasilić 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] Vasilić 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: 470/4
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 **ЈУЛИЈЕ МАЛЕТИЋ**, магист. инж. маш. под насловом **„РАЗВОЈ И ВЕРИФИКАЦИЈА ПОСТПРОЦЕСОРА ЗА ВИШЕОСНУ ОБРАДУ НА НУМЕРИЧКИ УПРАВЉАНИМ МАШИНАМА АЛАТКАМА ПОДРЖАНИ ВИРТУЕЛНИМ ОБРАДНИМ СИСТЕМОМ“**.

Извештај је поднела Комисија у саставу: др Никола Славковић, ванр. проф., др Бранко Кокотовић, ванр. проф., др Горан Младеновић, ванр. проф., др Михајло Поповић, ванр. проф. и др Слободан Табаковић, ред. проф., Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука.

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 кандидаткиње
Јулије Малетић, маг.инж.маш.

Одлуком Наставно-научног већа Универзитета у Београду - Машинског факултета бр. 470/2 од 03.4.2025. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације под називом „**Развој и верификација постпроцесора за вишеосну обраду на нумерички управљаним машинама алаткама подржани виртуелним обрадним системом**“ кандидаткиње **Јулије Малетић, маг.инж.маш.**

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидаткиње, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидаткињи

1.1. Биографски подаци

Јулија Малетић, маг.инж.маш., рођена је 19. јула 1997. године у Београду, Република Србија. Завршила је основну школу „Јован Стерија Поповић“ у Београду као одличан ђак у периоду од 2004. до 2012. године. IX београдску гимназију „Михаило Петровић-Алас“ у Београду похађала је 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 9,00 (девет и 00/100). Завршни рад на тему „Примена биолошки инспирисаних техника вештачке интелигенције у роботизованом унутрашњем транспорту материјала“, који је оцењен оценом 10, је радила под менторством проф. др Зорана Миљковића. Награђивана 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 9,95 (девет и 95/100). Мастер рад на тему „Верификација постпроцесорског рачуна за вишеосне машине алатке“, који је оцењен оценом 10, је радила под менторством проф. др Саше Живановића. Награђивана је поводом Дана факултета за

изванредан успех постигнут на Мастер академским студијама. Докторске студије уписује школске 2021/2022. године на Универзитету у Београду - Машинском факултету (број индекса Д16/21).

Од 1.11.2021. године запослена је у Истраживачко развојном институту ЛОЛА. Кандидаткиња Јулија Малетић је од 29.10.2021. године изабрана у звање истраживач приправник, одлуком бр. 258 Научног већа Лола Института у Београду, у оквиру сектора за машинске системе. 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 области CAD/CAM технологија – усавршавањем у оквиру софтверског пакета HyperMILL у октобру 2023. године. Такође је, у децембру 2024. године, похађала интердисциплинарни курс за младе истраживаче под називом „Како комуницирати савремену науку“ у организацији Центра за промоцију науке.

У оквиру задужења у институту ЛОЛА, у октобру 2024. године, је учествовала у организацији и спровођењу специјализоване обуке за CNC оператере. Учествовала је у едукативним активностима које су спровођене у оквиру годишњих стручних пракси студентима машинске струке, као и ученицима струковних средњих школа. Такође, у оквиру радних задатака је реализовала и водила стручни курс за коришћење CAD/CAM софтверског пакета HyperMILL, у фебруару 2025. године.

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), Vericut, Matlab, LaTeX, AnyLogic, Adobe Illustrator.

Истраживачке области

Машине алатке, Виртуелне машине алатке и виртуелни обрадни системи, CAD/CAM системи, Вишеосне машине алатке, Програмирање машина алатки

Остало

- Поседује возачку дозволу Б категорије

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Кандидаткиња Јулија Малетић, маст.инж.маш., уписала је Докторске студије на Универзитету у Београду - Машинском факултету школске 2021/2022. године. У циљу реализације Програма усавршавања, положила 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 (u*)</i>	Проф. др Бранко Кокотовић	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 (o*)</i>	Проф. др Зоран Митровић	5	10 (десет)
<i>CAD/CAM системи и интеграција пројектовања производа и технологија (u*)</i>	Проф. др Саша Живановић	5	10 (десет)
<i>Теорија резања (u*)</i>	В.проф. Др Милош Пјевић	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>Моделирање и симулација система индустријских робота (u*)</i>	Проф. др Никола Славковић	5	10 (десет)
<i>Теорија и симулација процеса обраде (u*)</i>	Проф. др Михајло Поповић	5	10 (десет)
<i>Истраживање и публиковање - 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; u* - изборни предмет.

Јулија Малетић је на Докторским студијама – Машинско инжењерство на Универзитету у Београду - Машинском факултету положила 4 (четири) обавезна и 5 (пет) изборних предмета (сваки вреднован по 5 ЕСПБ бодова), чиме је остварила укупно 45 ЕСПБ бодова. Резултати научноистраживачког рада Јулије Малетић на Универзитету у Београду - Машинском факултету, реализовани су кроз интензиван експериментални рад у Лабораторији за обрадне системе (Истраживање и публиковање I-III), верификовани су објављивањем радова што указује на то да је кандидаткиња веома успешно остварила

додатних 45 ЕСПБ бодова. Кандидаткиња је успешно написала и одбранила 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 кандидаткиња стекла додатних 30 ЕСПБ бода. Дакле, кандидаткиња је остварила укупно 120 ЕСПБ бодова чиме је у складу са чланом 21. Правилника о Докторским студијама на Универзитету у Београду - Машинском факултету стекла услов да упише трећу годину студија и самим тим у складу са чланом 33 наведеног Правилника испунила основни услов да пријави докторску дисертацију.

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

Саопштења са међународног скупа, штампана у целини (М33)

- [1] **Maletić, J., Živanović, S.**, Verification of kinematic equations for a five-axis, table tilting machine tool, Proceedings of 21st International Symposium INFOTEH-JAHORINA, Zbornik radova ISBN 978-99976-710-9-7, pp.278-283, Jahorina, RS, B&H, 16 - 18 March 2022.
- [2] **Maletić, J., Živanović, S.**, A post-processor for the five-axis machine MultiProDesk based on inverse kinematic transformation, Proceedings of the 16th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering DEMI 2023, ISBN 978-99976-11-04-8, pp. 28-34, University of Banja Luka, Faculty of Mechanical Engineering, 01-02 Jun, 2023.
- [3] **Maletić, J., Živanović S.**, Development of a postprocessor for milling with a rotary axis and verification assisted by virtual machining environment, 39th International Conference on Production Engineering of Serbia, ISBN 978-86-6022-610-7, pp. 240-245, Novi Sad, 26-27 October, 2023.
- [4] **Maletić J., Vorkapic, N., Živanović S.**, Programming and verification of the machining program for a test workpiece for a machine with a horizontal rotary axis, Proceedings of the 15th International Scientific Conference MMA 2024 – Flexible Technologies, ISBN 978-86-6022-681-7, pp. 87-90, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Department for Production Engineering, Novi Sad, 24.-26. septembar 2024. doi:10.24867/MMA-2024-02-015

Рад у врхунском часопису националног значаја (М51)

- [5] **Maletić, J., Živanović, S.**, Verification of inverse kinematic equations for a five-axis machine tool with a spindle tilting configuration, Advanced Technologies and Materials, Vol. 47, No. 1, pp. 33-38, 2022. doi: 10.24867/ATM-2022-1-006

Саопштење са скупа националног значаја, штампано у целини (М63)

- [6] Vorkapić, N., **Maletić, J.**, Nešovanović, Lj., Živanović, S., Pjević, M., Eksperimentalna identifikacija specifičnih sila rezanja sa eksperimentim obimnog glodanja, 43. JUPITER konferencija, 39. simpozijum NU-Roboti-FTS, Zbornik radova, ISBN 978-86-6060-137-9, str. 3.106-3.111, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 04-05. oktobar 2022.
- [7] **Maletić, J., Živanović, S.**, Popović, M., Puzović, R., Simulacija procesa obrade skulptorskih površina na mašinama sa horizontalnom obrtnom osom, 44. JUPITER konferencija, 40. simpozijum NU-Roboti-FTS, Zbornik radova, ISBN 978-86-6060-204-8, str. 3.24-3.29, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 16-17. oktobar 2024.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Кандидаткиња Јулија Малетић, магистар инжењерства, својим досадашњим истраживачким активностима показала је посебну заинтересованост, посвећеност 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 кандидаткиње да се бави комплексним мултидисциплинарним теоријским и експерименталним научним истраживањима, која су суштински повезана са научном облашћу којој припада предложена тема, што кандидаткињу, према мишљењу Комисије, квалификује за самосталан, успешан и ефикасан теоријски и експериментални научноистраживачки рад на предложеној докторској дисертацији.

2. Предмет и циљ истраживања

Стални развој нових производа са сложенијим облицима површина, било функционалних, било естетских, и захтевима за економичном и флексибилном производњом, уз присутну конкуренцију, подразумева и сложеније обрадне системе са већим управљаним бројем оса. У основи оваквих обрадних система је машина алатка за вишеосну обраду. Када говоримо о вишеосној обради, за то су нам потребне машине са бар 4 осе управљања, а најчешће је то случај машина са 5 оса управљања, мада број оса може бити и већи, на пример код машина са паралелном кинематиком које имају 6 степени слободе. Вишеосне машине алатке обично се не програмирају ручно. Генерално програмирање вишеосних машина алатки се може реализовати на два начина и то: применом независног и адекватног САМ система који информације о геометрији дела преузима из расположивог САД система у коме је извршено пројектовање производа, као и његових компонената и делова или применом расположивог САД/САМ система, као заокружене целине за интегрисано пројектовање производа и технологија. Ово подразумева прорачун и генерисање путање алата на бази геометрије радног предмета, независно од машине на којој ће се реализовати обрада. Као резултат се добија путања алата у облику форматизованог записа те путање као CLF (Cutter Location File), који представља интерпретацију те путање у АРТ формату. Путања врха алата се у циљу верификације може симулирати у одговарајућем окружењу. Генерисање програма за изабрану машину се врши помоћу адекватног постпроцесора (PP) који преводи CLF/АРТ у програм према стандардима за формат програма (RS274D, DIN 66025, ISO 6983) и који се може директно извршавати на машини. На овај начин се добија програм обраде за НУМА познатији као G-код.

Већина делова комплексне геометрије се производи процесима уклањања материјала на вишеосним нумерички управљаним машинама алаткама (НУМА), где се програм обраде добија коришћењем конвенционалних постпроцесора за специфичну машину. Мотивација за ово истраживање произилази из ограничења стандардних и комерцијалних постпроцесора [1], који нису довољно флексибилни да могу да се користе за различите конфигурације вишеосних НУМА.

Мултифункционалне, реконфигурабилне и прилагодљиве машине алатке су све присутније у оквиру модерне индустрије, како би одговориле на захтеве израде делова различитих комплексних геометрија. Примена реконфигурабилних и прилагодљивих машина треба да оствари велики обим производње и широки асортиман, уз повећавање флексибилности и аутоматизације. Израда комплексних делова често захтева коришћење вишеосних машина, са четири или више оса, где је потребно на адекватан начин извршити програмирање истих.

Све раширенија употреба вишеосних машина у савременој индустрији, као одговор на све већу потребу израде делова вишестраном и вишеосном обрадом, отвара могућност за истраживање и унапређивање начина њиховог програмирања. Програмирање вишеосних машина или машина са специфичном геометријом подразумева и развој адекватних постпроцесора [19-22], као и оптимизацију путање алата [16-18] при вишеосној обради.

Ефикасност производног процеса се даље може унапредити кроз градњу синтетичког - симулационог окружења, заснованог на парадигми виртуелног обрадног система. Смисао таквог окружења је да се унутар њега, на бази поузданих модела, могу остварити функције предикције и оптимизације карактеристичне за пројектовање, евалуацију и унапређење објеката и процеса унутар обрадног система.

Примарна функција виртуелне обраде јесте да се процес обраде тестира и по потреби коригује пре њихове примене на реалној машини. Применом виртуелне обраде, у циљу верификације програма, доприноси повећању ефикасности кроз рану идентификацију и корекцију проблема у програму обраде.

Развој генерализованог постпроцесора [14-18], посебно оног који је подржан виртуелном обрадом поседује велики практични значај у савременој индустријској пракси, посебно у оквиру парадигме Индустрије 4.0, јер омогућава већу флексибилност, прилагодљивост и оптимизацију производних процеса. Осим тога, генерализовани постпроцесор омогућава компатибилност са различитим конфигурацијама вишеосних НУМА, што га чини универзалним алатом за производне погоне који производе комплексне делове и њима прилагођене производне процесе. Ова универзалност доприноси лакшој интеграцији у већ постојеће производне системе. Коначно, оваква истраживања представљају корак ка савременом управљању производњом, омогућавајући индустријским погонима да одговоре на све захтевније тржишне услове и персонализоване захтеве купаца.

Постојећа решења за програмирање вишеосних НУМА и постпроцесирање често су власнички развијена и интегрисана у комерцијалне CAD/CAM системе, што их чини недоступним за прилагођавање специфичним потребама. Ова ограничења представљају значајну препреку за кориснике који желе већу флексибилност у дефинисању путања алата и оптимизацији процеса обраде. Управо из тог разлога, у оквиру предложене докторске дисертације разматра се развој сопственог система за постпроцесирање у функцији програмирања вишеосних машина алатки, уз подршку виртуелне симулације, како би се омогућило прилагођено и ефикасније управљање процесом обраде.

Научни циљ предметне дисертације је развој напредног, генерализованог (универзалног) постпроцесора [14-18] за вишеосне НУМА, који ће интегрисати савремене технологије оптимизације [16-18] и виртуелне симулације у циљу унапређења тачности, ефикасности и флексибилности процеса обраде. Фокус ове дисертације би био на омогућавању скалабилности постпроцесорских решења за различите конфигурације вишеосних машина алатки, док се кроз процес виртуелне обраде омогућава прецизна верификација програмских путања, смањење грешака и повећање поузданости обраде.

Област постпроцесирања за вишеосне НУМА је предмет бројних истраживања [1-23], с обзиром на њен значај у савременој индустрији и континуиран развој напредних производних технологија. Различити приступи у генерисању и оптимизацији путања алата и симулацији процеса обраде резултовали су објављивањем стварању обимне литературе у овој области. У наставку су наведени литературни извори који представљају основу за истраживања у оквиру ове докторске дисертације.

2.1. Преглед и анализа литературе

- [1] R.-S. Lee and C.-H. She, 'Developing a postprocessor for three types of five-axis machine tools', *Int Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 13, no. 9, pp. 658–665, Sep. 1997, doi: [10.1007/BF01350824](https://doi.org/10.1007/BF01350824).
- [2] R. T. Farouki, C. Y. Han, and S. Li, 'Inverse kinematics for optimal tool orientation control in 5-axis CNC machining', *Computer Aided Geometric Design*, vol. 31, no. 1, pp. 13–26, Jan. 2014, doi: [10.1016/j.cagd.2013.11.002](https://doi.org/10.1016/j.cagd.2013.11.002).
- [3] J. Xu, D. Zhang, and Y. Sun, 'Kinematics performance oriented smoothing method to plan tool orientations for 5-axis ball-end CNC machining', *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 157–158, pp. 293–303, Jul. 2019, doi: [10.1016/j.ijmecsci.2019.04.038](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.04.038).
- [4] Y. Liu, M. Wan, Q.-B. Xiao, and W.-H. Zhang, 'Identification and compensation of geometric errors of rotary axes in five-axis machine tools through constructing equivalent rotary axis (ERA)', *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 152, pp. 211–227, Mar. 2019, doi: [10.1016/j.ijmecsci.2018.12.050](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.12.050).
- [5] S. Tulsyan and Y. Altintas, 'Local toolpath smoothing for five-axis machine tools', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 96, pp. 15–26, Sep. 2015, doi: [10.1016/j.ijmachtools.2015.04.014](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.04.014).
- [6] C. Yan, C.-H. Lee, X. Li, Y. Zhang, and K. Min, 'A multi-objective tool-axis optimization algorithm based on covariant field functional', *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 48, pp. 30–37, Jul. 2018, doi: [10.1016/j.jmsy.2018.04.012](https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.04.012).
- [7] E. Kudabalage, L. Van Dang, and S. Makhanov, 'Postprocessor for five-axis machining of STL surfaces based on Nagata interpolation and optimization of rotation angles', *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 33, no. 8, pp. 792–809, Aug. 2020, doi: [10.1080/0951192X.2020.1780319](https://doi.org/10.1080/0951192X.2020.1780319).
- [8] Q. Hu, Y. Chen, and J. Yang, 'On-line contour error estimation and control for corner smoothed five-axis tool paths', *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 171, p. 105377, Apr. 2020, doi: [10.1016/j.ijmecsci.2019.105377](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105377).
- [9] Y. Lu, Y. Ding, and L. Zhu, 'Simultaneous optimization of the feed direction and tool orientation in five-axis flat-end milling', *International Journal of Production Research*, vol. 54, no. 15, pp. 4537–4546, Aug. 2016, doi: [10.1080/00207543.2015.1070973](https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1070973).
- [10] Z. Mi, C.-M. Yuan, X. Ma, and L.-Y. Shen, 'Tool orientation optimization for 5-axis machining with C-space method', *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 88, no. 5–8, pp. 1243–1255, Feb. 2017, doi: [10.1007/s00170-016-8849-0](https://doi.org/10.1007/s00170-016-8849-0).
- [11] S. Tajima and B. Sencer, 'Accurate real-time interpolation of 5-axis tool-paths with local corner smoothing', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 142, pp. 1–15, Jul. 2019, doi: [10.1016/j.ijmachtools.2019.04.005](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2019.04.005).

- [12] S. Tajima and B. Sencer, 'Real-time trajectory generation for 5-axis machine tools with singularity avoidance', *CIRP Annals*, vol. 69, no. 1, pp. 349–352, 2020, doi: [10.1016/j.cirp.2020.04.050](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.04.050).
- [13] P. Sun, Q. Liu, J. Wang, Z. Yin, and L. Wang, 'Rotation-Angle Solution and Singularity Handling of Five-Axis Machine Tools for Dual NURBS Interpolation', *Machines*, vol. 11, no. 2, p. 281, Feb. 2023, doi: [10.3390/machines11020281](https://doi.org/10.3390/machines11020281).
- [14] C.-H. She and C.-C. Chang, 'Design of a generic five-axis postprocessor based on generalized kinematics model of machine tool', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, no. 3–4, pp. 537–545, Mar. 2007, doi: [10.1016/j.ijmachtools.2006.06.002](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.06.002).
- [15] T. G. Li, D. M. Liu, Z. G. Fan, C. L. Fu, and W. S. Wang, 'Design of a Generic Postprocessor Based on UG', *AMR*, vol. 335–336, pp. 625–628, Sep. 2011, doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.335-336.625](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.335-336.625).
- [16] N. A. Fountas, C. I. Stergiou, N. M. Vaxevanidis, and R. Benhadj-Djilali, 'A Generic Multi-Axis Post-Processor Engine for Optimal CNC Data Creation and Intelligent Surface Machining', *SSP*, vol. 261, pp. 463–469, Aug. 2017, doi: [10.4028/www.scientific.net/SSP.261.463](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.261.463).
- [17] Y. Liu, M. Wan, W.-J. Xing, Q.-B. Xiao, and W.-H. Zhang, 'Generalized actual inverse kinematic model for compensating geometric errors in five-axis machine tools', *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 145, pp. 299–317, Sep. 2018, doi: [10.1016/j.ijmecsci.2018.07.022](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.07.022).
- [18] F. Y. Peng, J. Y. Ma, W. Wang, X. Y. Duan, P. P. Sun, and R. Yan, 'Total differential methods based universal post processing algorithm considering geometric error for multi-axis NC machine tool', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 70, pp. 53–62, Jul. 2013, doi: [10.1016/j.ijmachtools.2013.02.001](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.02.001).
- [19] C.-H. She and R.-S. Lee, 'A Postprocessor Based on the Kinematics Model for General Five-Axis Machine Tools', *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 2, no. 2, pp. 131–141, Jan. 2000, doi: [10.1016/S1526-6125\(00\)70021-1](https://doi.org/10.1016/S1526-6125(00)70021-1).
- [20] L. L. Lv and J. F. Ni, 'Development for Post-Processing System of 5-Axis CNC Machines', *AMR*, vol. 314–316, pp. 1624–1627, Aug. 2011, doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.314-316.1624](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.314-316.1624).
- [21] H. J. Son, Y. T. Cho, and Y. G. Jung, 'Development of Post Processor for Five-Axis Machine of Non-Orthogonal Head Tilting Type', *AMR*, vol. 655–657, pp. 1304–1309, Jan. 2013, doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.655-657.1304](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.655-657.1304).
- [22] C.-H. She, C.-H. Lin, and T.-H. Yang, 'Development of the integration of postprocessor for five-axis machine tools', in *2012 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, Kaohsiung, Taiwan: IEEE, Jul. 2012, pp. 638–643. doi: [10.1109/AIM.2012.6265932](https://doi.org/10.1109/AIM.2012.6265932).
- [23] A. My and E. L. J. Bohez, 'A novel differential kinematics model to compare the kinematic performances of 5-axis CNC machines', *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 163, p. 105117, Nov. 2019, doi: [10.1016/j.ijmecsci.2019.105117](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105117).

Референца [1] представља један од темељних истраживања у области постпроцесора, на којем се ослања значајан број каснијих радова. У овом истраживању, кинематичка структура вишеосних НУМА је анализирана кроз категоризацију у три групе, засновану на распореду ротационих и трансляторних оса. За сваку од дефинисаних категорија изведене су одговарајуће кинематичке једначине, чиме је постављен основ за развој алгоритама за постпроцесирање у зависности од специфичне конфигурације машине алатке.

Оптимизација CNC обраде представља кључни аспект истраживања, усмерен на унапређење тачности, ефикасности и адаптивности обрадних стратегија. У оквиру ове групе референци, издвајају се радови чији је фокус на модификацији кинематичких једначина машина ради побољшања квалитета обрађених површина. Референце [2-6] разматрају анализу кретања ротационих оса и примену различитих алгоритама за редукцију угловних помераја између две узастопне тачке путање, чиме се смањују динамичка оптерећења и побољшава квалитет обрађене површине. У оквиру радова [7-10] разматране су различите стратегије формирања путање алата у циљу заглађивања путање алата, побољшања квалитета обрађене површине и избегавања колизија. У референци [11] дат је опис методе за смањивање контурних грешака, али у овом случају користе се методе за предиковање грешака, и примењује се *on-line* методе за њихову компензацију. За тему оптимизације путање алата потребно је нагласити грешке које се јављају у положајима сингуларитета, што је дато у оквиру референци [12,13] где су изложене методе анализе сингуларитета, као и технике њиховог избегавања.

Референце [14-18] фокусирају се на развој генерализованих постпроцесора, са циљем омогућавања флексибилне примене на различитим конфигурацијама CNC машина алатки. У радовима [14,15] анализирају се приступи прилагођавања кинематичких трансформација у контексту различитих кинематичких структура, док радови [16-18] разматрају методе за генерисање оптимизованог G-кода. Овакви приступи доприносе унапређењу универзалности постпроцесора и ефикасности програмирања вишеосних обрадних система.

Радови [19-22] истражују развој постпроцесора за специфичне конфигурације петоосних НУМА, при чему се анализира кинематика система и примењују методе координатне трансформације за генерисање путања алата. Верификација предложених постпроцесора извршена је упоредним тестирањем са комерцијалним решењима и практичном израдом тест делова. Референца [23] представља нови приступ анализи и поређењу кинематичких перформанси 5-осних CNC машина алатки, заснован на универзалном или генерализованом кинематичком моделу, који омогућава ефикасније формулисање кинематичких једначина и развој генерализованих постпроцесора.

3. Полазне хипотезе

С обзиром на све већу примену сложених производних система, истраживање у оквиру ове дисертације се усмерава ка развоју алгоритама и софтверских решења која могу унапредити процес генерисања путања алата и постпроцесирања, уз подршку виртуелних обрадних система. Хипотезе које следе дефинишу очекиване резултате:

Хипотеза 1: Могуће је развити алгоритме за постпроцесорско генерисање програма обраде за различите конфигурације вишеосних НУМА, што се може потврдити кроз симулације у виртуелном окружењу и верификацију на реалним обрадним системима.

Хипотеза 2: Могуће је успоставити методологију за развој генерализованог постпроцесора која се реализује кроз софтверску апликацију за различите конфигурације вишеосних НУМА

и која је подржана адекватним виртуелним обрадним системом за потребе верификације добијених програма.

Хипотеза 3: Могуће је, у конфигурисаним виртуелним обрадним системима, кроз симулацију поуздано предвидети грешке у програмима обраде и омогућити правовремену корекцију.

4. Научне методе истраживања

У оквиру ове докторске дисертације, истраживачка питања везана за постпроцесирање различитих конфигурација вишеосних НУМА, користиће се наредне методе истраживања:

- **Методе кинематичког моделирања** за разраду математичких модела за различите конфигурације вишеосних машина.
- **Методе програмирања и верификације програма** за различите конфигурације вишеосних НУМА.
- **Методе софтверске имплементације развијених алгоритама** за развој постпроцесора у погодним програмским језицима, као и тестирање и евалуација развијеног софтвера кроз итеративни процес оптимизације и симулације.
- **CAD/CAM/CAE** за конципирање, пројектовање и симулацију рада машине, као и развој виртуелног окружења за верификацију процеса обраде развијених програма.
- **Експерименталне методе** за верификацију предложених хипотеза, са конфигурисањем тест делова сложене геометрије ради провере перформанси развијених постпроцесорских решења и обрадом тих делова на вишеосним НУМА.

5. Очекивани научни допринос

Допринос који представља резултат предметне докторске дисертације припада домену програмирања обраде на вишеосним обрадним системима. Имајући у виду наведене хипотезе очекивани научни допринос подразумева:

- Методе и алгоритме за постпроцесорско генерисање програма обраде за различите конфигурације вишеосних НУМА, што се може потврдити кроз симулације у виртуелном окружењу и верификацију на реалним обрадним системима.
- Методологију за развој генерализованог постпроцесора која се реализује кроз софтверску апликацију за различите конфигурације вишеосних НУМА и која је подржана адекватним виртуелним обрадним системом за потребе верификације добијених програма.

6. План истраживања и структура рада

У оквиру разматране докторске дисертације план истраживања ће бити реализован кроз следеће фазе:

1. Преглед и анализа актуелних научних радова, стандарда (попут ISO 6983) и софтверских алата за програмирање машина алатки како би се идентификовале предности, недостаци и могућности унапређења.

2. Груписање различитих структура вишеосних машина и постпроцесорских модела ради генерисања основне базе за даљу анализу и имплементацију.
3. Анализа постојећих метода за кинематичко моделирање типичних конфигурација вишеосних машина алатки.
4. Развој методологије као подлоге за имплементацију софтверског решења за постпроцесирање за различите конфигурације вишеосних машина алатки.
5. Развој виртуелног окружења за верификацију добијених програма обраде, кроз симулацију обраде на изабраним машинама за вишеосну обраду.
6. Верификација развијених софтверских модула за постпроцесирање у оквиру виртуелног обрадног система.
7. Верификација развијених софтверских модула кроз експеримент са обрадом на реалним вишеосним машинама алаткама.
8. Анализа добијених експерименталних резултата и разматрање могућих праваца даљег развоја.

Прелиминарна структура разматране докторске дисертације се састоји из следећих целина:

1. Увод
2. Преглед литературе и постојећих решења везаних за:
 - Кинематичко моделирање вишеосних машина алатки
 - Програмирање вишеосних машина алатки и анализа недостатака и могућности за унапређивањем
3. Развој софтверске апликације за постпроцесирање вишеосних НУМА:
 - Развој методологије за реализацију софтверског решења за постпроцесирање у циљу генерисања програма различитих конфигурација вишеосних машина алатки
 - Конфигурисање виртуелног окружења различитих конфигурација вишеосних машина
 - Валидација генерисаних програма обраде у оквиру виртуелног обрадног система
4. Експериментална евалуација и анализа резултата
 - Опис експерименталне поставке
 - Упоређивање резултата обраде на основу програма генерисаних путем различитих постпроцесора
 - Дискусија о ефикасности и тачности генерисаних путања алата
 - Анализа предности развијеног приступа у поређењу са постојећим приступима
5. Закључци
6. Литература
7. Прилози

7. Закључак и предлог

На основу анализе пријаве теме докторске дисертације кандидаткиње Јулије Малетић, маг.инж.маш., архивиране под евиденционим бројем 289/1 од 21.02.2025. године, а сходно сагласности Колегијума наставника Катедре за производно машинство број 470/1 од 23.3.2025. године, као и Одлуци Наставно-научног већа број бр. 470/2 од 03.4.2025. 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 кандидаткиња 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 **Јулији Малетић, маг.инж.маш.** одобри израда докторске дисертације под називом

Развој и верификација постпроцесора за вишеосну обраду на нумерички управљаним машинама алаткама подржани 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 кандидаткиње Јулије Малетић, 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 Никола Славковић, ванредни професор
Универзитет у Београду - Машински факултет

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

.....
Др Горан Младеновић, ванредни професор
Универзитет у Београду - Машински факултет

.....
Др Михајло Поповић, ванредни професор
Универзитет у Београду - Машински факултет

.....
Др Слободан Табаковић, редовни професор
Универзитет у Новом Саду - Факултет техничких наука