

Факултет Машински

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

934/6

(Број захтева)

Веће научних области техничких наука

(Назив већа научне области коме се захтев  
упућује)

29.08.2024.

(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:

Терминирање технолошких процеса у динамичким условима применом  
биолошки инспирисаних алгоритама оптимизације  
(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ: Машинско инжењерство (ужа научна област: производно машинство)

**ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:**

- Име, име једног од родитеља и презиме кандидата:  
КАТАРИНА (ЗОРАН) БРЕЊО
- Претходно образовање (назив и седиште факултета, студијски програм):  
Универзитет у Београду - Машински факултет, Краљице Марије 16, 11120 Београд 35
- Година завршетка претходног нивоа студија: 2018.
- Година уписа на докторске студије: 2018.
- Назив студијског програма докторских студија: Машинско инжењерство

## ПОДАЦИ О МЕНТОРУ:

Име и презиме ментора: Милица Петровић

Звање: ванредни професор

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. **Petrović, M.**, Jokić, A., Miljković, Z., Kulesza, Z., **Multi-Objective Scheduling of Single Mobile Robot Based on Grey Wolf Optimization Algorithm**, Applied Soft Computing (ISSN 1568-4946), Vol. 131, Article No. 109784, December 2022 (Available online: 7th November 2022; DOI: 10.1016/j.asoc.2022.109784), Elsevier, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109784> (**Science Citation Index-Web of Science® – IF = 8,7 (2022) → M21**; извор **KoBSON**).
2. Jokić, A., **Petrović, M.**, Miljković, Z., **Semantic Segmentation Based Stereo Visual Servoing of Nonholonomic Mobile Robot in Intelligent Manufacturing Environment**, Journal Expert Systems with Applications (ISSN 0957-4174), Volume 190, 116203, 15 March 2022 (Available online: 15 November 2021; DOI: 10.1016/j.eswa.2021.116203), Elsevier, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417421015189> (**Science Citation Index-Web of Science® – IF = 8,5 (2022) → M21a**; извор **KoBSON**).
3. **Petrović, M.**, Cieczkowski, M., Romaniuk, S., Wolniakowski, A., Miljković, Z., **A Novel Hybrid NN-ABPE-Based Calibration Method for Improving Accuracy of Lateration Positioning System**, Journal Sensors (eISSN 1424-8220), Volume 21 Issue 24, Paper: 8204, (Available online: 8 December 2021; DOI: 10.3390/s21248204), Published by MDPI, 4052 Basel, Switzerland <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/24/8204> (**Science Citation Index-Web of Science® – IF = 3,847 (2021) → M21**; извор **KoBSON**).
4. **Petrović, M.**, Miljković, Z., Jokić, A., **A novel methodology for optimal single mobile robot scheduling using whale optimization algorithm**, Applied Soft Computing (ISSN 1568-4946), Vol. 81, 105520, August 2019, Elsevier, (**Science Citation Index-Web of Science® – IF = 5.472 (2019) → M21a**; извор **KoBSON**).
5. Vuković, N., **Petrović, M.**, Miljković, Z., **A comprehensive experimental evaluation of orthogonal polynomial expanded random vector functional link neural networks for regression**, Applied Soft Computing (ISSN 1568-4946), Vol. 70, pp. 1083-1096, September 2018, Elsevier, (**Science Citation Index-Web of Science® – IF = 4,873 (2018) → M21**; извор **KoBSON**).
6. Mitić, M., Vuković, N., **Petrović, M.**, Miljković, Z., **Chaotic metaheuristic algorithms for learning and reproduction of robot motion trajectories**, Neural Computing and Applications (ISSN 0941-0643), Vol. 30 Issue: 4, pp. 1065-1083, August 2018, Springer-Verlag London Ltd., United Kingdom, (**Science Citation Index-Web of Science® – IF = 4,664 (2018) → M21**; извор **KoBSON**).
7. Miljković, Z., **Petrović, M.**, **Application of modified multi-objective particle swarm optimisation algorithm for flexible process planning problem**, International Journal of Computer Integrated Manufacturing (Print ISSN: 0951-192X), Vol. 30 Issue: 2-3, pp. 271-291, Taylor & Francis Group, United Kingdom, 2017, (**Science Citation Index-Web of Science® – IF = 1,995 (2017) → M22**; извор **KoBSON**).
8. **Petrović, M.**, Vuković, N., Mitić, M., Miljković, Z., **Integration of process planning and scheduling using chaotic particle swarm optimization algorithm**, Journal Expert Systems with Applications (ISSN 0957-4174), Vol. 64, pp. 569-588, Elsevier, December 2016, (**Science Citation Index-Web of Science® – IF = 3,928 (2016) → M21a**; извор **KoBSON**).
9. **Petrović, M.**, Mitić, M., Vuković, N., Miljković, Z., **Chaotic particle swarm optimization algorithm for flexible process planning**, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (Print ISSN 0268-3768), Vol. 85 Issue: 9, pp. 2535-2555, Springer-Verlag London Ltd., August 2016. (Online ISSN 1433-3015), (**Science Citation Index-Web of Science® – IF = 2.209 (2016) → M22**; извор **KoBSON**).
10. Mitić, M., Vuković, N., **Petrović, M.**, Miljković, Z., **Chaotic fruit fly optimization algorithm**, Knowledge-Based Systems (ISSN 0950-7051), Vol. 89, pp. 446-458, Elsevier, November 2015, (**Science Citation Index-Web of Science® – IF = 3,325 (2015) → M21**; извор **KoBSON**).

Обавештавамо вас да је Наставно – научно веће на седници одржаној 29.08.2024. године размотрило предложену тему и закључило да је тема пододна 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: 934/5  
Датум: 29.08.2024. 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 29.08.2024. 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 **КАТАРИНЕ БРЕЊО**, маг. инж. маш. под насловом „Терминирање технолошких процеса у динамичким условима применом биолошки инспирисаних алгоритама оптимизације“.

Извештај је поднела Комисија у саставу: др Живана Јаковљевић, ред. проф., др Саша Живановић, ред. проф., др Никола Славковић, ванр. проф., др Радиша Јовановић, ред. проф. и др Дејан Лукић, ред. проф. Универзитета у Новом Саду – Факултета техничких наука.

За ментора докторске дисертације именује се др Милица Петровић, ванредни 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 **Катарине Брењо, маг. инж. маш.**

Одлуком Наставно-научног већа Универзитета у Београду – Машинског факултета број 934/3 од 11.7.2024. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације под називом „**Терминирање технолошких процеса у динамичким условима применом биолошки инспирисаних алгоритама оптимизације**“ кандидаткиње **Катарине Брењо, маг. инж. маш.**

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидаткиње, Комисија подноси следећи

### **ИЗВЕШТАЈ**

#### **1. Подаци о кандидаткињи**

##### **1.1 Биографски подаци**

Катарина (Зоран) Брењо (рођена Миљковић), маг. инж. маш., рођена је 7. октобра 1994. године у Београду, Република Србија. Основну школу „Петар Петровић Његош“ и Трећу београдску гимназију завршила је у Београду са одличним успехом.

На Универзитет у Београду – Машински факултет уписала се школске 2013/2014. године. Основне академске студије – машинско инжењерство завршила је 2016. године, одбравивши завршни рад (BSc) са оценом 10 (десет) из предмета Основе моторних возила и просечном оценом током основних академских студија 8,59 (осам и 59/100). Школске 2016/2017. године уписала је Мастер академске студије – машинско инжењерство, Модул за аутоматско управљање, а завршила их је 19. септембра 2018. године са просечном оценом током мастер академских студија 9,20 (девет и 20/100), одбравивши са оценом 10 (десет) мастер рад (MSc) на тему „Моделовање и управљање серво мотора једносмерне струје применом неуронских мрежа“ из предмета Интелигентни системи управљања, под менторством проф. др Радише Јовановића.

Након дипломирања, у школској 2018/2019. години, уписала је Докторске академске студије – машинско инжењерство на Универзитету у Београду – Машинском факултету (број индекса Д12/2018). Током првог семестра Докторских академских студија утврђени су правци њеног научноистраживачког рада на Катедри за производно машинство, да би Одлуком број 46/1 од 11.1.2019. године био озваничен и Програм усавршавања, који се реализује под руководством потенцијалног ментора др Милице Петровић, ванредног професора. Кандидаткиња је положила све испите на Докторским академским студијама и тренутно је студент VI семестра.

У звање истраживач-приправник први пут изабрана је 17. јануара 2019. године, а од 1. фебруара 2019. године запослена је на Универзитету у Београду – Машинском факултету као истраживач-приправник, и то на пројекту технолошког развоја под називом „*Иновативни приступ у примени интелигентних технолошких система за производњу делова од лима заснован на еколошким принципима*“, који је финансирао Министарство просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије (ев. бр. ТР-35004, руководилац пројекта проф. др Бојан Бабић), закључно са 31. децембром 2019. године. Кандидаткиња је од 1. јануара 2020. године запослена и даље на Универзитету у Београду – Машинском факултету, такође у звању истраживача-приправника, и то на Катедри за производно машинство, у оквиру пројекта под називом „*Интегрисана истраживања у области макро, микро и нано машинског инжењерства*“, односно потпројекта „*Дубоко машинско учење интелигентних технолошких система у производном машинству*“, а који је финансиран од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије, према уговорима о реализацији и финансирању научноистраживачког рада НИО у 2020. и 2021. години (ев. бр. 451-03-68/2020-14/200105 и 451-03-9/2021-14/200105, руководилац пројекта проф. др Владимир Поповић). Након тога, кандидаткиња је од 1. септембра 2020. године ангажована и на пројекту под називом „*Deep Machine Learning and Swarm Intelligence-based Optimization Algorithms for Control and Scheduling of Cyber-Physical Systems in Industry 4.0*“ (акроним - MISSION4.0, ев. бр. 6523109, руководилац пројекта проф. др Зоран Миљковић), који је финансирао Фонд за науку Републике Србије у оквиру позива „Програм за развој пројеката из области вештачке интелигенције“. Звање истраживач-приправник поново стиче 9. децембра 2021. године и од 1. јануара 2022. године запослена је на Универзитету у Београду – Машинском факултету као истраживач-приправник на Катедри за производно машинство, у оквиру пројекта под називом „*Интегрисана истраживања у области макро, микро и нано машинског инжењерства*“, који је финансирао Министарство просвете, науке и технолошког развоја, односно Министарство науке, технолошког развоја и иновација Владе Републике Србије према уговорима о реализацији и финансирању научноистраживачког рада НИО у 2022. и 2023. години (ев. бр. 451-03-68/2022-14/200105 и 451-03-47/2023-01/200105, руководилац пројекта проф. др Владимир Поповић, интерни назив потпројекта *Дубоко машинско учење интелигентних технолошких система у производном машинству*). Кандидаткиња је од 1. јануара 2024. године запослена на Универзитету у Београду – Машинском факултету у својству истраживача-приправника на Катедри за производно машинство, у оквиру пројекта под интерним називом „*Дубоко учење и сајбер безбедност кибернетско-физичких система Индустрије 4.0*“, који финансира Министарство науке, технолошког развоја и иновација Владе Републике Србије према уговору о реализацији и финансирању научноистраживачког рада НИО у 2024. години (ев. бр. 451-03-65/2024-03/200105 од 5.2.2024. године, руководилац пројекта проф. др Владимир Поповић).

За постигнуте резултате током похађања Мастер академских студија добила је похвалу поводом Дана Универзитета у Београду – Машинског факултета за одличан успех постигнут на другој години Мастер академских студија (школска 2017/18. година).

Докторанткиња Катарина Брењо активно је укључена у наставни процес Катедре за производно машинство Универзитета у Београду – Машинског факултета. Кандидаткиња реализује све видове вежби (аудиторне вежбе, лабораторијске вежбе, преглед самосталних задатака, преглед пројеката) на следећим наставним предметима Катедре:

2020-...            Методе одлучивања (МАС) и

Интелигентни технолошки системи (МАС).

### **Познавање страних језика**

- Енглески језик – говори, чита и пише.

### Познавање рада на рачунару

- Напредно коришћење програма: Microsoft Office (Word, Excel, PowerPoint), SolidWorks, MATLAB, CorelDRAW, Latex.

### Истраживачке области

- Производно машинство, Интелигентни технолошки системи, Биолошки инспирисане технике вештачке интелигенције, Оптимизација.

### Остало

- Поседује возачку дозволу Б категорије возила.

### 1.2 Сечено научноистраживачко искуство

Кандидаткиња Катарина Брењо, маг. инж. маш., уписала је Докторске академске студије – машинско инжењерство на Универзитету у Београду – Машинском факултету школске 2018/2019. 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 (о*)</i>                                                     | Проф. др Слободан Радојевић | 5    | 9 (девет)  |
| <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    | 10 (десет) |
| <i>Аквизиција и обрада експерименталних података (и*)</i>                            | Проф. др Живана Јаковљевић  | 5    | 10 (десет) |
| <i>Истраживање и публикавање - I</i>                                                 | Проф. др Радиша Јовановић   | 10   | 10 (десет) |

#### Други семестар Докторских академских студија

| Назив предмета                                          | Предметни наставник       | ЕСПБ | Оцена      |
|---------------------------------------------------------|---------------------------|------|------------|
| <i>Одабрана поглавља из механике (и*)</i>               | Проф. др Зоран Митровић   | 5    | 10 (десет) |
| <i>Напредни курс из фази система управљања (и*)</i>     | Проф. др Радиша Јовановић | 5    | 10 (десет) |
| <i>Биолошки инспирисани алгоритми оптимизације (и*)</i> | Проф. др Милица Петровић  | 5    | 10 (десет) |

|                                       |                          |    |            |
|---------------------------------------|--------------------------|----|------------|
| <i>Истраживање и публиковање - II</i> | Проф. др Милица Петровић | 15 | 10 (десет) |
|---------------------------------------|--------------------------|----|------------|

### Трећи семестар Докторских академских студија

| Назив предмета                                      | Предметни наставник        | ЕСПБ | Оцена      |
|-----------------------------------------------------|----------------------------|------|------------|
| <i>Дигитална обрада нестационарних сигнала (и*)</i> | Проф. др Живана Јаковљевић | 5    | 10 (десет) |
| <i>Анализа перформанси технолошких система (и*)</i> | Проф. др Бојан Бабић       | 5    | 10 (десет) |
| <i>Истраживање и публиковање - III</i>              | Проф. др Милица Петровић   | 20   | 10 (десет) |

### Четврти семестар Докторских академских студија

| Назив предмета                              | Предметни наставник                                                                 | ЕСПБ | Оцена      |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------|------------|
| <i>Истраживање и публиковање - IV</i>       | Проф. др Милица Петровић                                                            | 8    | 10 (десет) |
| <i>Пројекат идеје докторске дисертације</i> | Проф. др Милица Петровић<br>Проф. др Живана Јаковљевић<br>Проф. др Никола Славковић | 22   | 10 (десет) |

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

Катарина Брењо је на Докторским академским студијама Универзитета у Београду – Машинског факултета положила 3 (три) обавезна и 6 (шест) изборних предмета (сваки вреди по 5 ЕСПБ бодова), чиме је остварила укупно 45 ЕСПБ бодова. Резултати научноистраживачког рада Катарине Брењо на Универзитету у Београду – Машинском факултету, реализовани кроз рад у Лабораторији за индустријску роботiku и вештачку интелигенцију (Истраживање и публиковање I-IV), а верификовани објављивањем радова, као и учествовање у извођењу наставе на предметима Катедре за производно машинство, указују на то да је кандидаткиња веома успешно остварила још 53 ЕСПБ бода. Кандидаткиња је успешно написала и одбранила Пројекат идеје докторске дисертације, што је Комисија у саставу проф. др Милица Петровић, проф. др Живана Јаковљевић и проф. др Никола Славковић потврдила оценом 10 (десет), а тиме је кандидаткиња стекла још 22 ЕСПБ бода. Дакле, у складу са чланом 21. Правилника о Докторским студијама на Универзитету у Београду – Машинском факултету, кандидаткиња је остварила укупно 120 ЕСПБ бодова, чиме је испунила основни услов да упише трећу годину студија и пријави тему докторске дисертације.

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

### Рад објављен у водећем часопису националног значаја

- [1] **Миљковић, К.**, Петровић, М., *Интегрисано планирање и терминирање технолошких процеса у динамичким условима – преглед стања у области истраживања*, ТЕХНИКА –

#### Радови саопштени на скуповима националног значаја, штампани у целини

- [2] **Миљковић, К.**, Петровић, М., Јовановић, Р., *Прилог развоју интелигентног управљања серво мотора једносмерне струје применом вештачких неуронских мрежа*, 42. ЈУПИТЕР конференција, 44. симпозијум Управљање производњом у индустрији прераде метала, стр. 4.24 – 4.35 (2020) → **M63**.
- [3] Миљковић, З., Бабић, Б., Петровић, М., Јокић, А., **Миљковић, К.**, Јевтић, Ђ., Ђокић, Л., *Интелигентно стерео-визуелно управљање мобилних робота и оптимално терминирање технолошких процеса – преглед резултата истраживања у оквиру пројекта MISSION4.0*, 43. ЈУПИТЕР Конференција, 39. симпозијум „НУ-РОБОТИ-ФТС“, Зборник радова - USB, стр. 3.13-3.25, (2022) → **M63**.

#### Техничка и развојна решења – алгоритми, методе и софтвери

- [4] **Миљковић, К.**, Петровић, М., Бабић, Б., *Динамичко интегрисано планирање и терминирање технолошких процеса базирано на генетичким алгоритмима*, Ново техничко решење, усвојено на седници МНО за машинство и индустријски софтвер 22.04.2021. → **M85**.

#### Скупови података

- [5] **Миљковић, К.**, Петровић, М., *Dataset of alternative process plan networks for dynamic integrated process planning and scheduling (Version 0.1.0) [Data set]*. Zenodo, <http://doi.org/10.5281/zenodo.4400610>, 2020.

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

- 1) Бабић, Б., Миљковић, З., Јаковљевић, Ж., Петровић М.М., **Миљковић К.**, и остали, *„Иновативни приступ у примени интелигентних технолошких система за производњу делова од лима заснован на еколошким принципима“*, Пројекат технолошког развоја који је финансирало Министарство просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије: ТР-35004, Београд, 2011–2019.
- 2) Бабић, Б., Миљковић, З., Јаковљевић, Ж., Петровић М.М., **Миљковић К.**, и остали, *„Интегрисана истраживања у области макро, микро и нано машинског инжењерства – Дубоко машинско учење интелигентних технолошких система у производном машинству“*, који је финансирало Министарство просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије закључно са 2022. годином, а од фебруара 2023. године, финансирало га је Министарство науке, технолошког развоја и иновација Владе Републике Србије (уговори бр. 451-03-68/2020-14/200105, 451-03-9/2021-14/200105, 451-03-68/2022-14/200105 и 451-03-47/2023-01/200105 од 3.2.2023. године), Београд, 2020-2023.
- 3) Миљковић, З., Бабић, Б., Јаковљевић, Ж., Петровић М.М., **Миљковић К.**, и остали, *„Deep Machine Learning and Swarm Intelligence-based Optimization Algorithms for Control and Scheduling of Cyber-Physical Systems in Industry 4.0“* (акроним - MISSION4.0), Пројекат је био финансиран од стране Фонда за науку Републике Србије у оквиру позива „Програм за развој пројеката из области вештачке интелигенције“, ев. бр. 6523109, Београд, 2020–2022.

4) Миљковић, З., Јаковљевић, Ж., Петровић М.М., Недељковић, Д., Јокић, А., **Брењо К.**, Јевтић, Ђ., „Дубоко учење и сајбер безбедност кибернетско-физичких система Индустије 4.0“ (интерни назив), који финансира Министарство науке, технолошког развоја и иновација Владе Републике Србије према уговору о реализацији и финансирању научноистраживачког рада НИО у 2024. години (ев. бр. 451-03-65/2024-03/200105 од 5.2.2024. године, руководиоца пројекта проф. др Владимир Поповић).

### 1.3 Оцена подобности кандидаткиње за рад на предложеној теми

Кандидаткиња Катарина Брењо, маг. инж. маш., својим досадашњим истраживачким активностима показала је посебну заинтересованост, квалитет и изражену способност за научноистраживачки рад. Публиковани научни радови у водећем часопису националног значаја, у зборницима радова скупова националног значаја, као и верификовано техничко решење и скуп података указују на изразит смисао кандидаткиње да се бави комплексним интердисциплинарним теоријским и експерименталним научним истраживањима.

Биографски подаци, објављени научни радови, експериментална истраживања кроз ангажовање на пројектима технолошког развоја (ев. бр. ТР-35004, ев. бр. 451-03-68/2020-14/200105, ев. бр. 451-03-9/2021-14/200105, ев. бр. 451-03-68/2022-14/200105, ев. бр. 451-03-47/2023-01/200105 и ев. бр. 451-03-65/2024-03/200105) и пројекту Фонда за науку (ев. бр. 6523109), као и други остварени резултати Катарине Брењо маг.инж.маш., суштински су повезани са научном облашћу којој припада предложена тема, што кандидаткињу, према мишљењу Комисије, квалификује за самосталан, успешан и ефикасан теоријски и експериментални научноистраживачки рад на предметној докторској дисертацији.

## 2. Предмет и циљ истраживања

Предмет планираних истраживања односи се на развој математичких модела динамичких фактора у технолошком систему, на основу којих се генеришу оптимални технолошки процеси, применом биолошки инспирисаних техника вештачке интелигенције – метахеуристичких алгоритама, на којима се такође заснивају терминирање и ретерминирање оптималних технолошких процеса у оквиру докторске дисертације.

У ужем смислу, планирана истраживања усмерена су на развој једнокритеријумских и вишекритеријумских метода оптимизације које узимају у обзир поремећајне факторе у динамичком технолошком систему попут отказа обраде дела, потребе за обрадом новог дела и престанка рада машине алатке. У циљу генерисања оптималних планова терминирања технолошких процеса у динамичким условима, биће анализирани и имплементирани биолошки инспирисани метахеуристички алгоритми оптимизације, попут еволуционих алгоритама, алгоритама базираних на интелигенцији роја и хибридних приступа који се заснивају на удруженим карактеристикама два или више алгоритама.

Интелигентни технолошки системи (ИТС) представљају највишу класу флексибилних технолошких система и подразумевају следеће кључне функције: пројектовање технолошких процеса, терминирање производње, терминирање транспортних средстава у оквиру ИТС-а и управљање транспортним токовима материјала. Пројектовање технолошких процеса настало је са циљем да се на системски начин дефинишу методе које обезбеђују да се производња реализује на економичан и компетитиван начин. Пројектовање технолошких процеса почиње дефинисањем геометрије дела (радионички цртеж са информацијама о захтеваном квалитету и тачности обраде), а потом и одабиром метода обраде, обрадног система (машина алатки, алата, помоћних прибора, припремка, обрадног процеса),

редоследа операција, уз одређивање главног времена обраде за захвате у оквиру свих технолошких операција. Различити типови информација попут пројектантских података о материјалу, производној опреми, као и захтевима квалитета обраде, представљају улаз у функцију пројектовања технолошких процеса, док је излаз из поменутог система сам технолошки процес, којим се дефинише редослед свих активности (посебно технолошких операција) потребних да се од полазног материјала (сировине или полуфабриката) реализује готов део (производ). Генерално, приступи у пројектовању технолошких процеса могу се класификовати у две категорије: ручно пројектовање технолошких процеса и Компјутерски подржано пројектовање технолошких процеса (енгл. *Computer-Added Process Planning – CAPP*). CAPP се може дефинисати као аутоматизован и компјутерски подржан приступ у пројектовању технолошких процеса, базиран углавном на принципима групне технологије и егзактним математичким моделима и алгоритмима, у циљу интеграције Компјутерски подржаног пројектовања (енгл. *Computer-Aided Design – CAD*) и Компјутерски подржане производње (енгл. *Computer-Aided Manufacturing – CAM*). Оваквим приступом генеришу се оствариви технолошки процеси у складу са различитим критеријумима попут минимизације технолошких времена и трошкова, као и дефинисања обима производње, доступности машина алатки и производне опреме и коначно, транспортних токова материјала.

Под појмом терминирање (енгл. *scheduling*), или детаљно терминирање (енгл. *detailed scheduling*), или терминирање производње (енгл. *production scheduling*), подразумева се примена метода одлучивања и оптимизационих метода у циљу планирања и оптималног временског распоређивања активности производно-технолошких ентитета (машина алатки, алата, помоћних прибора, транспортних средстава попут мобилних робота итд.). Терминирање технолошких процеса представља процес планирања машинске обраде делова на основу расположивих ресурса технолошких система, а у складу са усвојеним критеријумима перформанси. На тај начин се, као резултат процеса терминирања, добија редослед технолошких операција обраде делова на одговарајућим машинама алаткама, према неком од следећих критеријумима: производно време (енгл. *makespan*), трошкови производње (енгл. *production cost*), уравнотежено искоришћење машина алатки (енгл. *balanced utilization*), транспортни токови материјала (енгл. *flow time*), поштовање рокова завршетка (енгл. *lateness*) са своје две категорије – кашњење (енгл. *tardiness*) и завршетак пре рока (енгл. *earliness*). На основу токова материјала у технолошком систему, издваја се *job-shop* тип терминирања који се дефинише за  $N$  различитих делова и  $M$  различитих машина алатки, где је за сваки од делова дефинисан скуп операција, као и њихов редослед извршавања на машинама алаткама, а за сваку од операција време обраде на одговарајућим машинама. Уколико се нека операција састоји од више захвата или више пролаза у оквиру једног захвата, време трајања операције је једнако збиру главних времена обраде за сваки од захвата.

У реалним технолошким системима често се јављају поремећаји па је стога неопходно извршити одређене измене како би се омогућило прилагођавање њиховој динамичкој природи, што доводи до појаве динамичког флексибилног терминирања технолошких процеса (енгл. *Dynamic Flexible Job-Shop Scheduling– DFJSS*). Престанак рада машине алатке, увођење нове машине у технолошки систем, долазак новог дела и отказ обраде дела која је у току само су неки од поремећаја који описују динамичку природу технолошких система и који ће бити обухваћени и детаљно анализирани при изради докторске дисертације. Потреба за обрадом новог дела који се уводи у технолошки систем (енгл. *new job arrival*) подразумева и промену редоследа постојећих операција након тренутка доласка, узимајући у обзир и операције неопходне за обраду новог дела. Нови план терминирања, који се још назива и план ретерминирања (енгл. *rescheduling*), може се искористити за унапређење перформанси технолошког система за обраду новог дела поштујући

истовремено задате рокове обраде свих делова у систему. Престанак рада машине алатке (енгл. *machine breakdown*) такође доводи до потребе за поновним терминирањем, тј. ретерминирањем свих операција које нису завршене у тренутку отказа, а изводиле су се на машини алатки пре престанка њеног рада. Приступи у моделирању овог динамичког фактора подразумевају да се операције које нису завршене прослеђују на алтернативне машине алатке на којима је могуће наставити обраду машинског дела. Отказ обраде дела (енгл. *job cancellation*) представља догађај у технолошком систему који настаје услед потребе да се прекине обрада дела. Из тог разлога, након тренутка отказа, врши се поновно терминирање – ретерминирање преосталих делова, уз занемаривање свих предвиђених операција обраде за отказани део. Увођење нове машине алатке у технолошки систем подразумева да је потребно извршити ретерминирање у погледу распоређивања операција неопходних за обраду свих делова и на новоуведену машину. Технолошке операције које су биле у току завршавају се на машинама на којима су се одвијале у тренутку увођења нове машине алатке, док се за преостале формира нови оптимални план ретерминирања који подразумева прераспodelу свих неизвршених операција на све машине које су на располагању у технолошком окружењу. Постоје два основна приступа ретерминирања која ће бити предмет разматрања услед настанка различитих поремећајних фактора: парцијално (енгл. *partial rescheduling*) и тотално ретерминирање (енгл. *total rescheduling*). Парцијално ретерминирање подразумева промену редоследа операција на које директно или индиректно утиче поремећај, док тотално ретерминирање представља процес где је након настанка поремећајног фактора потребно све незавршене операције поново терминирати. Иако је резултат тоталног ретерминирања боље оптимално решење, рачунарска комплексност овог приступа је знатно вишег нивоа, док се компаративна предност парцијалног ретерминирања заснива на могућности примене у изразито динамичким системима где је потребно да се нови редослед операција генерише у што краћем року. Тотално ретерминирање се може разматрати као потпуно нови проблем терминирања са различитим простором могућих решења.

Флексибилни технолошки процеси који су предмет оптимизације у докторској дисертацији, подразумевају следеће типове флексибилности: (1) флексибилност машина алатки (једна операција може да се изводи на више алтернативних машина алатки), (2) флексибилност алата, (3) флексибилност оријентација алата, (4) флексибилност редоследа операција (представља могућност замене редоследа операција при оптимизацији технолошких процеса) и (5) флексибилност процеса (односи се на могућност одабира различитих варијантних решења обраде дела). Флексибилни технолошки процеси могу да се представе на више начина, као на пример: помоћу графова, применом различитих структура топологије дрвета и Петријевих или AND/OR мрежа. Једна од метода која ће се користити у докторској дисертацији је представљање алтернативних технолошких процеса помоћу AND/OR мрежа. На основу информација датих у мрежама алтернативних технолошких процеса, формира се иницијални план терминирања генерисан пре настанка поремећаја, а затим се формира оптимални ретерминирани план за обраду делова, након утицаја једног или више динамичких фактора. Мреже алтернативних технолошких процеса, са детаљним информацијама о различитим *benchmark* деловима, које ће се користити у току израде докторске дисертације генерисане су и биће приказане у јавно доступном скупу сопствених података (*Dataset of alternative process plan networks for dynamic integrated process planning and scheduling*, <https://zenodo.org/records/4400610>).

Конвенционални приступи у пројектовању две најважније функције ИТС-а подразумевају да се поменуте фазе извршавају посебно, у смислу да фаза пројектовања технолошких процеса претходи фази терминирања. Овакав приступ пројектовању, често заснован на фиксним технолошким процесима пројектованим без увида у ресурсе и стање самог технолошког

система, доводи до неуравнотеженог искоришћења производних ресурса, стварања узких грла у производном процесу, смањења перформанси времена испоруке и немогућности прилагођавања динамичкој природи реалних технолошких система. У циљу превазилажења ових недостатака, смањења производних трошкова и повећања ефикасности производних система, истраживања у овој области показују да интеграција планирања и терминирања технолошких процеса, како у идеалним условима, тако и у реалним технолошким системима динамичке природе, утичу на остваривање много бољих резултата оптимизације. У оквиру DFJSS, у ужем смислу, динамичко интегрисано планирање и терминирање технолошких процеса (енгл. *Dynamic Integrated Process Planning and Scheduling – DIPPS*), подразумева добијање оптималног редоследа операција потребних за обраду машинских делова на основу дефинисаних алтернативних технолошких процеса обраде, уз поштовање задатих технолошких ограничења, узимајући у обзир поремећајне факторе. Добијени редослед операција представља оптимални план терминирања који је дефинисан у складу са усвојеним критеријумима перформанси.

Попут пројектовања и терминирања технолошких процеса, и DFJSS проблем припада класи недетерминистичких полиномиалних проблема, тзв. NP-hard комбинаторно-оптимизационих проблема. Како време потребно за решавање ових проблема експоненцијално расте са њиховом димензионалношћу (повећање броја делова, машина алатки и операција доводи до повећања простора могућих решења), они се не могу ефикасно решити применом конвенционалних нехеуристичких метода. У циљу превазилажења недостатака конвенционалних метода, у литератури [21, 22, 25, 32, 33] предложен је значајан број приступа у решавању DFJSS проблема, који се генерално могу поделити на: (1) приступе базиране на мултиагентним системима (енгл. *multiagent systems*) и (2) приступе базиране на алгоритмима. У оквиру израде предметне докторске дисертације користиће се приступ базиран на различитим оптимизационим алгоритмима. Приступ за решавање DFJSS проблема базиран на оптимизационим алгоритмима у потпуности зависи од типа коришћеног алгоритма. Метакеуристички алгоритми се често користе за решавање DFJSS проблема због своје једноставне имплементације која омогућава генерисање оптималних технолошких процеса обраде делова. Ови алгоритми такође могу бити подељени у две групе: (1) алгоритми базирани на јединственим решењима (енгл. *single-solution algorithms*) и (2) алгоритми базирани на свим решењима у популацији (енгл. *population-based algorithms*). Алгоритми базирани на јединственим решењима, попут алгоритма симулираног жарења (енгл. *Simulated Annealing – SA*), табу претраге (енгл. *Tabu Search – TS*) и претраге променљивих суседства (енгл. *variable neighborhood search*), развијаће се у циљу модификације само једног случајно генерисаног иницијалног решења. Са друге стране, алгоритми базирани на свим решењима, који ће бити развијани и експериментално верификовани у циљу решавања DFJSS проблема у оквиру дисертације, могу се класификовати на: (1) еволуционе метакеуристичке алгоритме (енгл. *evolutionary algorithms*), (2) алгоритме базиране на интелигенцији роја (енгл. *swarm intelligence-based algorithms*) и (3) хибридне алгоритме.

Научни циљ дисертације је развој методологије за генерисање оптималних технолошких процеса и оптималних планова терминирања обраде делова у динамичким условима засноване на биолошки инспирисаним техникама вештачке интелигенције. Он ће се остварити кроз следеће основне циљеве истраживања:

(i) идентификација динамичких фактора (на пример: отказ обраде дела, престанак рада машине алатке, долазак новог дела у технолошки систем) релевантних за одабрано технолошко окружење,

- (ii) креирање математичких модела за одређивање различитих временских параметара технолошких процеса (попут времена почетка операције и времена завршетка операције) на основу главног времена обраде, времена транспорта, времена измене алата и оријентације алата, узимајући у обзир утицај динамичких фактора,
- (iii) развој методе за кодирање и декодирање технолошких процеса и планова терминирања сходно доступним ресурсима (на пример: машинама алаткама, алатима, помоћним приборима, транспортним средствима) у циљу представљања могућих решења оптимизационих алгоритама,
- (iv) анализа различитих функција циља (на пример: укупно време потребно за машинску обраду свих делова, трошкови производње, уравнотежено искоришћење машина алатки, транспортни токови материјала, поштовање задатих рокова) релевантних за унапређење перформанси интелигентних технолошких система и
- (v) развој и имплементација различитих метода оптимизације технолошких процеса и планова терминирања сходно усвојеним функцијама циља.

## 2.1. Преглед стања у области истраживања

Проблемски оријентисан развој математичких модела за решавање недетерминистичко-полиномног, комбинаторно-оптимизационог терминирања технолошких процеса у динамичким технолошким системима, који има широку примену у реалним окружењима, представља иницијацију рада на предметној докторској дисертацији. У вези са тим, до данас је извршена публикација више научноистраживачких радова, књига и докторских дисертација, уз реализацију значајаног броја научноистраживачких пројеката референтних лабораторија, који са различитих становишта третирају проблем динамичке природе технолошких система, као и флексибилног терминирања технолошких процеса. У наставку су наведени неки од литературних извора релевантних у поменутој научној области, који представљају основ за покретање истраживања предвиђених овом докторском дисертацијом:

- [1] S. Lin, E. Goodman, and W. Punch, "A Genetic Algorithm Approach to Dynamic Job Shop Scheduling Problem.", *Proceedings of International Conference on Genetic Algorithms*, pp. 481–488, 1997.
- [2] A. K. Jain and H. A. Elmaraghy, "Production scheduling/rescheduling in flexible manufacturing", *International Journal of Production Research*, vol. 35, pp. 281–309, 1997, doi: 10.1080/002075497196082.
- [3] C. Bierwirth and C. Mattfeld, Dirk, "Production scheduling and rescheduling with genetic algorithms", *Evolutionary Computation*, vol. 7, pp. 1–17, 1999, doi: 10.1007/3-540-60286-0\_120.
- [4] A. Madureira, "A Genetic Approach for Dynamic Job-Shop Scheduling Problems", *MIC'2001 - 4th Metaheuristics International Conference*, no. March. pp. 41–46, 2001.
- [5] S. C. Cheng, D. F. Shiau, Y. M. Huang, and Y. T. Lin, "Dynamic hard-real-time scheduling using genetic algorithm for multiprocessor task with resource and timing constraints", *Expert Systems with Application*, vol. 36, pp. 852–860, 2009, doi: 10.1016/j.eswa.2007.10.037.
- [6] X.N. Shen, and X. Yao, "Mathematical modeling and multi-objective evolutionary algorithms applied to dynamic flexible job shop scheduling problems", *Information Sciences*, vol. 298, pp. 198–224, 2015, doi: 10.1016/j.ins.2014.11.036.
- [7] L. Yin, L. Gao, X. Li, and H. Xia, "An improved genetic algorithm with rolling window technology for dynamic integrated process planning and scheduling problem", *Proc. 2017 IEEE 21st International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design*

- CSCWD 2017, pp. 414–419, 2017, doi: 10.1109/CSCWD.2017.8066730.
- [8] S. M. Sajadi, A. Alizadeh, M. Zandieh, and F. Tavan, “Robust and stable flexible job shop scheduling with random machine breakdowns: multi-objectives genetic algorithm approach”, *International Journal of Mathematics in Operational Research*, vol. 14, no. 2, pp. 268–289, 2019, doi: 10.1504/IJMOR.2019.097759.
  - [9] J. Duan, and J. Wang, “Energy-efficient scheduling for a flexible job shop with machine breakdowns considering machine idle time arrangement and machine speed level selection”, *Computers & Industrial Engineering*, vol. 161, pp. 107677, 2021, doi: 10.1016/j.cie.2021.107677.
  - [10] K.B. Ali, S. Bechikh, A. Louati, H. Louati, and E. Kariri, “Dynamic Job Shop Scheduling Problem with New Job Arrivals using Hybrid Genetic Algorithm”, *IEEE Access*, (in press), 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3401080.
  - [11] M. Petrović, N. Vuković, M. Mitić, Z. Miljković, “Integration of process planning and scheduling using chaotic particle swarm optimization algorithm”, *Expert Systems with Applications*, vol. 64, pp. 569–588, 2016, doi: 10.1016/j.eswa.2016.08.019.
  - [12] M. Petrović, M. Mitić, N. Vuković, Z. Miljković, “Chaotic particle swarm optimization algorithm for flexible process planning”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 85, pp. 2535–2555, 2016, doi: 10.1007/s00170-015-7991-4.
  - [13] M. Petrović, A. Jokić, Z. Miljković, and Z. Kulesza, 2022. “Multi-objective scheduling of a single mobile robot based on the grey wolf optimization algorithm”, *Applied Soft Computing*, vol. 131, pp.109784, 2022, doi: 10.1016/j.asoc.2022.109784.
  - [14] M. R. Yu, B. Yang, and Y. Chen, “Dynamic integration of process planning and scheduling using a discrete particle swarm optimization algorithm”, *Advances in Production Engineering & Management*, vol. 13, no. 3, pp. 279–296, 2018, doi: 10.14743/apem2018.3.290.
  - [15] Z. Wang, J. Zhang, and S. Yang, “An improved particle swarm optimization algorithm for dynamic job shop scheduling problems with random job arrivals”, *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 51, pp. 100594, 2019, doi: 10.1016/j.swevo.2019.100594.
  - [16] J. Duan, and J. Wang, “Robust scheduling for flexible machining job shop subject to machine breakdowns and new job arrivals considering system reusability and task recurrence”, *Expert Systems with Applications*, vol. 203, pp. 117489, 2022, doi: 10.1016/j.eswa.2022.117489.
  - [17] R. Zhou, A. Y. C. Nee, and H. P. Lee, “Performance of an ant colony optimisation algorithm in dynamic job shop scheduling problems”, *International Journal of Production Research*, vol. 47, pp. 2903–2920, 2009, doi: 10.1080/00207540701644219.
  - [18] H. I. Demir and C. Erden, “Dynamic integrated process planning, scheduling and due-date assignment using ant colony optimization”, *Computers & Industrial Engineering*, vol. 149, no. September, p. 106799, 2020, doi: 10.1016/j.cie.2020.106799.
  - [19] K. Z. Gao, P. N. Suganthan, T. J. Chua, C. S. Chong, T. X. Cai, and Q. K. Pan, “A two-stage artificial bee colony algorithm scheduling flexible job-shop scheduling problem with new job insertion”, *Expert Systems with Applications*, vol. 42, pp. 7652–7663, 2015, doi: 10.1016/j.eswa.2015.06.004.
  - [20] K. Z. Gao, P. N. Suganthan, Q. K. Pan, M. F. Tasgetiren, and A. Sadollah, “Artificial bee colony algorithm for scheduling and rescheduling fuzzy flexible job shop problem with new job insertion”, *Knowledge-Based Systems*, vol. 109, pp. 1–16, 2016, doi: 10.1016/j.knosys.2016.06.014.
  - [21] L. Wei, J. He, Z. Guo, and Z. Hu, “A multi-objective migrating birds optimization algorithm based on game theory for dynamic flexible job shop scheduling problem”, *Expert Systems with Applications*, vol. 227, pp. 120268, 2023, doi: 10.1016/j.eswa.2023.120268.

- [22] K. Zhu, G. Gong, N. Peng, L. Zhang, Huang, D., Luo, Q. and Li, X., “Dynamic distributed flexible job-shop scheduling problem considering operation inspection”, *Expert Systems with Applications*, vol. 224, pp. 119840, 2023, doi: 10.1016/j.eswa.2023.119840.
- [23] N. Zhu, G. Gong, D. Lu, D. Huang, N. Peng, and H. Qi, “An effective reformative memetic algorithm for distributed flexible job-shop scheduling problem with order cancellation”, *Expert Systems with Applications*, vol. 237, pp. 121205, 2024, doi: 10.1016/j.eswa.2023.121205.
- [24] C. Luo, W. Gong, and C. Lu, “Knowledge-driven two-stage memetic algorithm for energy-efficient flexible job shop scheduling with machine breakdowns”, *Expert Systems with Applications*, vol. 235, pp. 121149, 2024, doi: 10.1016/j.eswa.2023.121149.
- [25] A., Baykasoğlu, F.S. Madenoğlu, and A. Hamzadayı, “Greedy randomized adaptive search for dynamic flexible job-shop scheduling”, *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 56, pp. 425–451, 2020, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.06.005.
- [26] N. Al-Hinai and T. Y. Elmekawy, “Robust and stable flexible job shop scheduling with random machine breakdowns using a hybrid genetic algorithm”, *International Journal of Production Economics*, vol. 132, pp. 279–291, 2011, doi: 10.1016/j.ijpe.2011.04.020.
- [27] L. Zhang, L. Gao, and X. Li, “A hybrid genetic algorithm and tabu search for a multi-objective dynamic job shop scheduling problem”, *International Journal of Production Research*, vol. 51, pp. 3516–3531, 2013, doi: 10.1080/00207543.2012.751509.
- [28] L. Zhang, L. Gao, and X. Li, “A hybrid intelligent algorithm and rescheduling technique for job shop scheduling problems with disruptions”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 65, pp. 1141–1156, 2015, doi: 10.1007/s00170-012-4245-6.
- [29] N. Kundakcı and O. Kulak, “Hybrid genetic algorithms for minimizing makespan in dynamic job shop scheduling problem”, *Computers and Industrial Engineering*, vol. 96, pp. 31–51, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.cie.2016.03.011.
- [30] X. Li, Z. Peng, B. Du, J. Guo, W. Xu, and K. Zhuang, “Hybrid artificial bee colony algorithm with a rescheduling strategy for solving flexible job shop scheduling problems”, *Computers and Industrial Engineering*, vol. 113, pp. 10–26, 2017, doi: 10.1016/j.cie.2017.09.005.
- [31] Y. Yang, M. Huang, Z.Y. Wang, and Q.B. Zhu, “Robust scheduling based on extreme learning machine for bi-objective flexible job-shop problems with machine breakdowns”, *Expert Systems with Applications*, vol. 158, pp. 113545, 2020, doi: 10.1016/j.eswa.2020.113545.
- [32] S. Zhang, F. Tang, X. Li, J. Liu, and B. Zhang, “A hybrid multi-objective approach for real-time flexible production scheduling and rescheduling under dynamic environment in Industry 4.0 context”, *Computers & Operations Research*, vol. 132, pp. 105267, 2021, doi: 10.1016/j.cor.2021.105267.
- [33] H. Tang, Y. Xiao, W. Zhang, D. Lei, J. Wang, and T. Xu, “A DQL-NSGA-III algorithm for solving the flexible job shop dynamic scheduling problem”, *Expert Systems with Applications*, vol. 237, pp. 121723, 2024, doi: 10.1016/j.eswa.2023.121723.

Аутори рада [1] представљају унапређену верзију претходно развијеног генетичког алгоритма (енгл. *Genetic Algorithm* – GA) примењеног на IPPS проблем, за решавање DIPPS услед континуалних долазака нових делова у технолошки систем. У процесу добијања оптималног решења, разматрано је следећих шест функција циља: време транспортних токова материјала, максимално време кашњења, време кашњења, време дефинисано задатим роком, број делова који касне и збир времена кашњења и времена рока завршетка, уз напомену да су све функције циља осим максималног времена кашњења пондерисане. У поређењу са конвенционалним приступима, експериментални резултати показују значајно побољшање перформанси вредности функција циља при генерисању оптималних планова

терминирања, као и робусност предложеног алгоритма у терминирању технолошких процеса, што оправдава значајну примену GA и константно унапређивање његових карактеристика [2, 3]. Аутори рада [4] предлажу приступ базиран на GA у решавању проблема терминирања једне машине алатке, на којој се обрада делова врши у складу са дефинисаним роковима. У раду се анализирају три модула: модул за претпроцесирање, модул за терминирање, као и модул за динамичку адаптацију. Модификовањем тренутних јединки у популацији и узимајући у обзир промене настале услед поремећаја, омогућава се да модул терминирања ефикасно настави процес претраживања заснован на новој модификованој популацији. Истраживања у раду [5] приказују успешну примену приступа базираног на коришћењу GA у оптимизацији енергетске функције циља при вишепроцесорском терминирању у реалном времену, са ограничењима у погледу ресурса и времена. У том смислу, развијена је нова методологија креирања генотипа у циљу представљања динамичких планова терминирања реалних система са доласком нових делова. У циљу добијања нових оптималних планова терминирања код DFJSS проблема, у раду [6] развијен је виšekритеријумски еволуциони алгоритам (енгл. *Multi-Objective Evolutionary Algorithm* – MOEA) базиран на проактивно-реактивној методи. Релевантност развијеног алгоритма огледа се у могућности успешне оптимизације, узимајући у обзир четири критеријума истовремено (укупно време потребно за обраду свих делова, кашњење, максимално искоришћење машина алатки и стабилност), брзом прилагођавању новом технолошком окружењу укључивањем хеуристичке стратегије динамичке оптимизације, као и симултаном решавању следећих задатака: додељивање машина алатки и распоређивања редоследа операција потребних за обраду дела. Ранија истраживања показала су да комбинација стратегије клизећих прозора (енгл. *rolling scheduling strategy*) и GA успешно решава проблем DFJSS типа терминирања. Из тог разлога, аутори рада [7] предлажу нову стратегију за DIPPS базирану на стратегији клизећих прозора и унапређеном GA (енгл. *Improved Genetic Algorithm* – IGA) за решавање проблема насталих услед дејства два поремећајна фактора: долазак новог дела и престанак рада машине алатке. За побољшање способности претраге предложеног IGA алгоритма, развијени су специјални оператори генетичких алгоритама; конкретно, за побољшање перформанси локалног претраживања коришћен је оператор мутације за случајну претрагу простора могућих решења. Аутори рада [8] разматрају робусно и стабилно ретерминирање у случају отказа рада машина алатки, при чему се за генерисање нових планова терминирања примењује двофазни GA. Прва фаза подразумева оптимизацију *makespan*-а у детерминистичким условима без очекиваних поремећаја. У другој фази се, након отказа рада машина алатки, генеришу оптимални планови ретерминирања на основу два критеријума, *makespan* и стабилност, при чему се користе две различите верзије виšekритеријумске оптимизације базиране на примени NSGA-II алгоритма (енгл. *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II*) и NPGA алгоритма (енгл. *Non-dominated Ranking Genetic Algorithm*). Метода за процену енергетске потрошње машина алатки, као и времена завршетка свих операција, базирана на NSGA-II алгоритму, предложена је у раду [9]. У овом моделу, разматране су две мере енергетске штедње за машинску обраду: време мировања машина алатки и брзина рада машине, као и следећа два критеријума: минимизација енергетске потрошње и максималног времена завршетка свих операција. Одговарајући скупови Парето граничних решења остварени су на основу експеримената основног случаја. Експериментални резултати показују да развијени алгоритам може ефикасно да смањи потрошњу енергије и максимално време завршетка свих операција, чиме се смањује утицај на животну средину и постиже очување зелене енергије. У циљу прилагођавања технолошког система новонасталим променама и генерисања оптималног плана терминирања нових делова, уз минимизацију *makespan*-а, аутори рада [10] предлажу модел заснован на примени еволуционог GA и више локалних претрага. Статистичка анализа заснована на експерименталној верификацији показује да предложени

модел има бржу конвергенцију и обезбеђује већу тачност у односу на алгоритме из референтне литературе.

Решење за IPPS, односно у ужем смислу, за генерисање оптималног флексибилног технолошког процеса, који подразумева разматрање великог броја технолошких операција, као и расположивих технолошких ресурса, тражи се у великом простору могућих решења. У циљу свеобухватног истраживања и избегавања локалног оптималног решења, успешно се примењују методе засноване на алгоритму инспирисаном интелигенцијом роја честица (енгл. *Particle Swarm Optimization algorithm* – PSO) и теорији хаоса (енгл. *Chaos theory*) (cPSO) [11, 12]. Почетна решења за IPPS проблем представљена су у облику честица cPSO алгоритма, док је примарни циљ да се спречи конвергенција PSO у раним фазама процеса оптимизације имплементацијом десет различитих хаотичних мапа које повећавају простор могућих решења. Оптимално планирање технолошких процеса базира се на вишекритеријумској оптимизацији времена и трошкова производње, док се са друге стране, оптимални планови терминирања генеришу на основу следеће три функције циља: производно време обраде свих делова, уравнотежено искоришћење машина алатки и средње време транспортних токова материјала. Вишекритеријумска метода оптимизације инспирисана интелигенцијом чопора вукова (енгл. *Multi-Objective Grey Wolf Optimizer* – MOGWO), успешно је примењена за оптимизацију планова терминирања транспортних система [13]. Такође, развијено је 13 нових функција циља комбинованих у циљу формирања Парето фронта вишекритеријумског оптимизационог проблема и развијена је нова стратегија за вишекритеријумско оптимално истраживање простора претраге. Развој, унапређење и имплементација PSO алгоритама у решавању DIPPS такође има широку примену. У том смислу, током претходних година, развијени су: (1) дискретни PSO алгоритам у којем честице ажурирају своје положаје на основу претходног сопственог најбољег положаја (*pbest*) и најбољег положаја целе популације (*gbest*) [14], (2) нови модел у циљу минимизације три функције циља [15] и (3) нова робусна оптимизациона метода која узима у обзир динамичке факторе и генерише два индикатора за евалуацију робусности технолошких система, поновно коришћење система, као и репродуктивност задатака обраде [16]. Отказ рада машине алатке и долазак нових делова у технолошки систем представљају динамичке поремећаје који су разматрани у поменутих истраживањима.

Циљ истраживања у раду [17] је да се идентификују различите примене оптимизационог алгоритма инспирисаног колонијом мравца (енгл. *Ant Colony Optimization* – ACO) у области динамичког *job-shop* терминирања технолошких процеса. ACO алгоритам је тестиран у технолошком систему за три нивоа искоришћености машина алатки, три различита типа расподела којима се моделирају времена обраде, као и три различита критеријума перформанси у одабиру оптималног плана терминирања. Перформансе ACO алгоритма, у смислу средњег времена транспортних токова материјала, средњег времена кашњења и укупне пропусне моћи у различитим експерименталним окружењима, упоређују се са онима базираним на диспечарским правилима и FIFO (енгл. *first-in-first-out*) концепту. У циљу идентификације најбоље ACO стратегије и диспечарских правила, изводе се две серије експеримената, а добијени резултати су касније упоређени за различита времена обраде. Експериментални резултати показују да ACO надмашује друге приступе у случајевима када искоришћеност машине алатке или промена времена обраде није значајна. Приступи у решавању проблема терминирања базирани на GA и ACO алгоритмима, при чему се динамичка природа поремећаја описује случајним доласком делова у технолошки систем, разматрани су у раду [18]. Циљ је генерисање најбољег модела који комбинује диспечарска правила, задате рокове и транспортне токове, уз минимизацију три функције циља везане за рокове завршетка. Експериментални резултати су показали да у поређењу са GA, интегрисан приступ базиран на ACO алгоритму обезбеђује глобално оптималне планове терминирања.

Једно од ефикасних решења проблема терминирања и ретерминирања технолошког система базирано је на примени двофазног алгоритма инспирисаног колонијом пчела (енгл. *Two-stage Artificial Bee Colony* – ТАВС) [19]. Проблем је моделиран као флексибилни *job-shop* тип терминирања у случају доласка новог дела у систем. Циљ оптимизације је остваривање минималног времена потребног за обраду свих делова. Поред новог правила за иницијализацију популације колоније пчела, предлаже се и побољшање перформанси алгоритма колективним локалним претраживањем. У својим даљим истраживањима, аутори продубљују проблем флексибилног *job-shop* типа терминирања, усвајајући поред проблема доласка новог дела у технолошки систем и ограничење у погледу фази времена обраде делова [20]. У циљу минимизације максималног фази времена потребног за обраду свих делова, предложена је примена унапређеног ТАВС алгоритма, а чији су резултати поређења, у односу на седам постојећих алгоритама за пет референтних случајева, показали успешност решавања ове врсте проблема.

У раду [21], развијен је математички модел за динамичко флексибилно *job-shop* терминирање услед отказа рада машине алатке. Предлаже се вишекритеријумски алгоритам оптимизације инспирисан птицама селицама (енгл. *Multi-Objective Migrating Birds Optimization Algorithm*), базиран на теорији игара која подразумева проучавање математичких модела стратешких интеракција и користи се да уравнотежи оптималност Парето фронта и обезбеди оптимално доношење одлука између две функције циља – производне ефикасности и стабилности. Приликом примене модела базираног на теорији игара, могуће је да не постоји најбоље решење Нешовог еквилибријума па је развијена нова метода у циљу његове апроксимације.

Новија истраживања довела су до развоја меметичких алгоритама за успешно решавање DFJSS проблема [22, 23]. Модификовани меметички алгоритам (енгл. *Modified Memetic Algorithm* – ММА) подразумева процес провере обрадака након завршене сваке операције пре прослеђивања у следећу фазу производње. Такође, развијен је реформативни меметички алгоритам (енгл. *Reformative Memetic Algorithm* – RMA) за решавање DFJSS проблема, који услед отказа обраде дела води до неискоришћености ресурса и чини оригинални план терминирања неупотребљивим. У оквиру поменута два меметичка алгоритма, у циљу добијања висококвалитетне почетне популације, генерисана је нова петослојна метода кодирања, као и метода за иницијализацију. Ефикасни оператори укрштања, оператори мутације и оператори локалне претраге, генерисани су у циљу проширивања простора могућих решења алгоритама, као и побољшања брзине конвергенције. Успешна експериментална верификација предложених алгоритама оправдава пораст интересовања за даља унапређивања меметичког алгоритма и подразумева упоредну анализу перформанси MMA и RMA у односу на три добро позната алгоритма из релевантне литературе (NNIA, NSGA-II и NSGA-III). У циљу ефикасног истовременог одређивања редоследа операција на машинама алаткама и брзине рада машина, односно смањења укупне енергетске потрошње, предложен је нови меметички алгоритам заснован на знању (енгл. *Knowledge-driven Two-stage Memetic Algorithm* – КТМА) [24].

Последњих година, истраживања су довела до развоја итеративног GRASP алгоритма (енгл. *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) [25], који може да реши и DFJSS проблем са ограничењем у погледу капацитета и доступности машина алатки разматрајући следећих пет поремећаја: долазак нових делова у систем, промене задатих рокова, откази рада машина алатки, откази обраде делова и захтев за хитном обрадом нових делова. Поред тога, механизам за одлуке о прихватању/одбијању нових делова развијен је и имплементиран у предложеној методологији, а лексикографска метода користи се за минимизацију следећих функција циља: нестабилност планова терминирања, *makespan*, средње кашњење и транспортни токови материјала.

Истраживања у раду [26] фокусирају се на робусност и стабилност флексибилних *job-shop* планова терминирања, усвајајући *makespan* као функцију циља. Предложен је приступ базиран на хибридном GA, који се састоји из две фазе. Примарни циљ је да се у току прве фазе систем посматра као детерминистички без очекиваних поремећаја, док друга фаза (фаза декодирања) подразумева оптимизацију двокритеријумске функције циља и интеграцију задатака машина и редоследа операција у складу са очекиваним престанком рада машине алатке. Ефекти различитих критеријума перформанси анализирани су применом ANOVA статистичке методе, а предложени приступ је упоређен са три постојећа приступа. Успешна примена приступа базираног на хибридном GA-TS алгоритму, при вишекритеријумском терминирању технолошких процеса услед долазака нових делова у систем и отказа машина алатки, резултује новом структуром кодирања хромозома, са операторима укрштања и мутације [27, 28]. У циљу математичког моделирања динамичких поремећаја, генерисана је симулација поменутих фактора, тако да у сваком моменту када је неопходно вршити ретерминирање на основу предложене шеме хибридног интелигентног алгоритма, симулација генерише динамичке поремећаје за следећи корак. Истраживања у раду [29] показују примену хибридног GA у циљу минимизације *makespan*-а. Развијена је нова хеуристика, заснована на три корака, која је комбинована са GA за решавање DFJSS проблема. У тим корацима даје се предност при додељивању операција машинама алаткама у погледу дужине трајања времена обраде, док се у следећем додељивању операција машинама приоритет даје делу чија је претходна операција раније завршена. У циљу задржавања најбоље репрезентативне иницијалне популације, добро позната диспечарска правила су интегрисана са GA. Хибридни приступ у раду [30] подразумева примену алгоритма инспирисаног колонијом пчела и TS за развијање математичког модела, при чему је рулет метода предложена за груписање кластера у циљу успешне оптималне иницијализације популације, док се оператор укрштања уводи за активне пчеле ради побољшања функције експлоатације. Допринос истраживања у раду [31] огледа се у новоразвијеној мери робусности (енгл. *Robustness Measure* – RMc) преко машине за екстремно учење (енгл. *Extreme Learning Machine* – ELM) у циљу процене осетљивости плана терминирања на утицај динамичких фактора. Такође, предложена је метода која комбинује побољшану верзију NSGA-II и RMc у циљу решавања вишекритеријумског DFJSS проблема. У раду [32], предложен је хибридни MPGA-CP приступ (енгл. *Multi-Population Genetic Algorithm and Constraint Programming*) у циљу обезбеђивања Парето решења, узимајући у обзир три типична оптимизациона критеријума: *makespan*, искоришћење машина алатки, као и укупно кашњење. У поређењу са другим алтернативним приступима из релевантне литературе, предложеним приступом остварује се побољшана ефикасност у решавању комплексних проблема, покривајући велики број Парето решења. Такође, DFJSS проблем са ограничењима у погледу транспортних ресурса није још истражен у потпуности. У циљу успешног решавања поменутог ограничења, аутори рада [33] развијају нови DQNSGA алгоритам, који интегрише унапређени генетички алгоритам базиран на NSGA-III (енгл. *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-III*) и машинско учење ојачавањем (енгл. *Reinforcement Learning* – RL). У оквиру DQNSGA алгоритма, развијен је метод иницијализације заснован на хеуристичким правилима и похлепном приступу декодирања.

Иако претходно анализирана литература показује предности приступа базираних на алгоритмима, један од кључних недостатака односи се на њихову брзу конвергенцију ка локално оптималном решењу у иницијалним фазама оптимизације. У том смислу, у оквиру предметне докторске дисертације биће предложене различите стратегије претраживања простора могућих решења оптимизационог проблема које ће за циљ имати унапређење конвергентних карактеристика алгоритма и квалитета добијеног решења. Такође, литературни извори у недовољној мери анализирају ограничења везана за транспортне ресурсе па ће из тог разлога она бити узета у обзир у предметној докторској дисертацији.

### 3. Основне хипотезе

Фокус истраживања у оквиру предметне докторске дисертације односи се на имплементацију биолошки инспирисаних техника вештачке интелигенције у циљу генерисања оптималних технолошких процеса и оптималних планова терминирања обраде делова у динамичким условима. Оптимизација ће бити остварена кроз развој једнокритеријумских и вишекритеријумских метода, на основу задатих функција циља, применом метахеуристичких алгоритама попут еволуционих алгоритама, алгоритама базираних на интелигенцији роја, као и хибридних приступа. Имплементација новоразвијених метода оптимизације требало би да обезбеди смањење укупних производних трошкова, економичнију и ефикаснију производњу машинских делова, а у складу са тим, да омогући повећање обима производње. На основу детаљне анализе релевантних литературних извора и помоћу знања стечених током досадашњих истраживања, а у циљу теоријске и експерименталне верификације предложених вишекритеријумских метода оптимизације планова терминирања, будућа истраживања, као и рад на предметној докторској дисертацији, засниваће се на следећим полазним хипотезама:

- Прва хипотеза: Применом биолошки инспирисаних техника вештачке интелигенције могуће је генерисати оптималан технолошки процес обраде делова у динамичким технолошким системима, узимајући у обзир алтернативне ресурсе попут машина алатки, алата и помоћних прибора.
- Друга хипотеза: На основу оптималних технолошких процеса, као и једнокритеријумских и вишекритеријумских модела оптимизације, могуће је одредити оптималне планове терминирања сходно усвојеним критеријумима перформанси.

### 4. Научне методе истраживања

Имајући у виду свеобухватност, комплексност и мултидисциплинарни карактер тематске области, у овој докторској дисертацији предлажу се следеће научне методе истраживања:

- Методе за компјутерско пројектовање базиране на CAD софтверима за генерисање 3D модела репрезентативних машинских делова;
- Методе за софтверску имплементацију развијених алгоритама;
- Методе биолошки инспирисане оптимизације планова терминирања;
- Методе за експерименталну верификацију и валидацију предложених хипотеза и статистичку анализу добијених резултата.

### 5. Очекивани научни допринос

Очекивани резултати предложених научних истраживања, у оквиру предметне докторске дисертације, подразумевају:

- Нову методологију за кодирање (шематско представљање редоследа операција технолошких процеса и планова терминирања у форми погодној за примену различитих оператора оптимизационих алгоритама) и декодирање (одређивање функције циља технолошких процеса и планова терминирања);
- Нове методологије за оптимизацију технолошких процеса и њихово оптимално терминирање у динамичким условима применом биолошки инспирисаних техника

вештачке интелигенције, уз дефинисање релевантних функција циља и побољшање перформанси интелигентних технолошких система у погледу смањења времена и трошкова производње, као и ефикаснијег планирања производних ресурса.

## 6. План истраживања и структура рада

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

1. Критичка анализа литературних извора и претходних истраживања, релевантних за динамичко интегрисано планирање и оптимално терминирање флексибилних технолошких процеса;
2. Анализа метода, циљева и биолошки инспирисаних алгоритама оптимизације од значаја за генерисање оптималних планова ретерминирања у динамичким технолошким системима;
3. Анализа типова флексибилности и начина представљања алтернативних технолошких процеса обраде делова;
4. Развој математичких модела за решавање комплексног, недетерминистичко-полиномног, комбинаторно-оптимизационог проблема терминирања технолошких процеса у динамичким технолошким окружењима;
5. Развој једнокритеријумских и вишекритеријумских метода оптимизације планова терминирања базираних на примени принципа биолошки инспирисаних техника вештачке интелигенције, уз усвајање одговарајућих оптимизационих критеријума и формирање функција одлучивања;
6. Имплементација развијеног система терминирања и тестирање новоразвијених модела за генерисање оптималних планова терминирања на реалним и референтним *benchmark* проблемима из литературе;
7. Лабораторијска експериментална верификација новоразвијене оригиналне методологије на прототипском моделу технолошког система сходно усвојеним оптимизационим критеријумима и формираним функцијама циља;
8. Анализа и дискусија остварених експерименталних резултата.

Оквирна структура предложене докторске дисертације обухвата следеће целине:

1. Увод
2. Преглед и критичка анализа стања у области досадашњих теоријских и експерименталних истраживања у вези са оптималним терминирањем флексибилних технолошких процеса у динамичким технолошким системима, са посебним освртом на биолошки инспирисане алгоритме оптимизације
3. Динамички фактори у технолошким системима
4. Математички модели за оптимизацију планова ретерминирања
5. Биолошки инспирисани алгоритми оптимизације
6. Методе једнокритеријумске и вишекритеријумске оптимизације планова терминирања
7. Тестирање и експериментална верификација предложене методологије са дискусијом
8. Закључци
9. Литература
10. Прилози

## 7. Закључак и предлог

На основу анализе поднете пријаве теме докторске дисертације кандидаткиње Катарине Брењо, мастер инжењера машинства, архивиране под евиденционим бројем 934/1 од 6.6.2024. године, а сходно сагласности Колегијума наставника Катедре за производно машинство број 934/2 од 18.6.2024. године, као и према Одлуци Наставно-научног већа број 934/3 од 11.7.2024. 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, као и да кандидаткиња испуњава законске и друге услове за рад на предметној докторској дисертацији, тако да предлаже Наставно-научном већу Универзитета у Београду – Машинског факултета да се

**Катарини Брењо, маст. инж. маш.**

одобри израду докторске дисертације са темом под насловом

**Терминирање технолошких процеса у динамичким условима  
применом биолошки инспирисаних алгоритама оптимизације**

научна област: **машинско инжењерство** (ужа научна област – **производно машинство**).

Комисија предлаже Наставно-научном већу Универзитета у Београду – Машинског факултета да се за ментора наведене докторске дисертације кандидаткиње Катарине Брењо, маст. инж. маш. именује **др Милица Петровић, ванредни професор** Универзитета у Београду – Машинског факултета која у претходних десет година има 10 објављених радова у часописима са импакт фактором са SCI-Web of Science® листе (Образац 3.), и то у домену машинског инжењерства – производног машинства, дакле има све неопходне компетенције у оквиру научне области којој припада тема докторске дисертације.

Београд, 22.8.2024. године

### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ:

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

.....  
Проф. др Саша Живановић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Машински факултет

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

.....  
Проф. др Радиша Јовановић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Машински факултет

.....  
Проф. др Дејан Лукић, редовни професор  
Универзитет у Новом Саду – Факултет техничких наука