

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ			
1. Датум и орган који је именовео комисију: 20. 7. 2023, на основу Одлуке Наставно Научног већа Факултета техничких наука, Декан Факултета техничких наука донео је Решење о именовању комисије за оцену и одбрану докторске дисертације број 012-199/36-2022.			
2. Састав комисије у складу са <i>Правилима докторских студија Универзитета у Новом Саду</i> :			
1.	Ристић др Соња	Редовни професор	Инжењерство информационих система 14. 5. 2018.
	презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
	Универзитет у Новом Саду Факултет техничких наука		Председник
	установа у којој је запослен-а		функција у комисији
2.	Стефановић др Миладин	Редовни професор	Индустријски инжењеринг 25. 9. 2014.
	презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
	Универзитет у Крагујевцу Факултет инжењерских наука		Члан
	установа у којој је запослен-а		функција у комисији
3.	Кордић др Славица	Ванредни професор	Примењене рачунарске науке и информатика 1. 4. 2019.
	презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
	Универзитет у Новом Саду Факултет техничких наука		Члан
	установа у којој је запослен-а		функција у комисији
4.	Луковић др Иван	Редовни професор	Информациони системи 10. 5. 2021.
	презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
	Универзитет у Београду Факултет организационих наука		Ментор
	установа у којој је запослен-а		функција у комисији

5.	Димитриески др Владимир	Доцент	Примењене рачунарске науке и информатика 14. 9. 2018.
	презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
	Универзитет у Новом Саду Факултет техничких наука		Ментор
	установа у којој је запослен-а		функција у комисији

## II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

- Име, име једног родитеља, презиме:  
Марко, Миленко, Вјештица
- Датум рођења, општина, држава:  
9. 7. 1994, Нови Сад, Република Србија
- Назив факултета, назив претходно завршеног нивоа студија и стечени стручни/академски назив:  
Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, мастер академске студије, Мастер инжењер електротехнике и рачунарства
- Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија:  
2018, Рачунарство и аутоматика

## III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Приступ спецификацији и генерисању производних процеса заснован на инжењерству вођеном моделима / *A Model-Driven Approach to the Production Process Specification and Generation*

## IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Навести кратак садржај са назнаком броја страница, поглавља, слика, схема, графикона и сл.

Докторска дисертација кандидата написана је на енглеском језику на 253 стране формата А4. Садржи 10 поглавља, у којима се налази 51 слика, 2 графикона, 8 табела и 21 листинг. Дисертација обухвата 265 литературна навода. Поглавља у дисертацији су:

- Увод (енгл. *Introduction*),
- Теоријске основе истраживања (енгл. *Background and Theoretical Foundation*),
- Мотивација, хипотезе, циљеви и методологија истраживања (енгл. *Motivation, Research Hypotheses, Goals and Methodology*),
- Тренутно стање у области (енгл. *State-of-the-Art*),
- Решење за моделовање и аутоматизовано извршавање производних процеса засновано на инжењерству вођеном моделима (енгл. *MD Solution for Modeling and Automatic Execution of Production Processes*),
- Анализа домена моделовања производних процеса (енгл. *Analysis of the Production Process Modeling Domain*),
- Вишенивовски језик за моделовање производних процеса (енгл. *Multi-Level Production Process Modeling Language*),
- Примена решења заснованог на инжењерству вођеном моделима и језика *MultiProLan* (енгл. *Application of the MD Solution and MultiProLan*),

9. Анализа и оцена језика *MultiProLan* и алата за моделовање производних процеса (енгл. *Evaluation of MultiProLan and Process Modeling Tool*),
10. Закључци и будући правци истраживања (енгл. *Conclusions and Future Work*).

Поред кључних документацијских информација датих на српском и енглеском језику, дисертација садржи и резиме с кључним речима на енглеском језику и проширени резиме с кључним речима на српском језику. Проширени резиме на српском језику написан је на 14 страна формата А4. Дисертација такође садржи и Посвету (енгл. *Dedication*), Признања (енгл. *Acknowledgments*), Садржај дисертације (енгл. *Contents*), као и Списак слика (енгл. *List of Figures*), Списак графикана (енгл. *List of Graphs*), Списак табела (енгл. *List of Tables*), Списак листинга (енгл. *List of Listings*), Списак коришћених скраћеница (енгл. *List of Acronyms*), Списак референци (енгл. *References*), Додатак А. Задаци експеримента и упитник (енгл. *Appendix A. Evaluation Experiment Tasks and Questionnaire*) и План третмана података.

## **V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

Резултати истраживања који су представљени у докторској дисертацији кандидата припадају научној области Електротехничко и рачунарско инжењерство и ужој научној области Примењене рачунарске науке и информатика.

У уводном, првом поглављу, кандидат представља кратак опис производње и пружа преглед изазова Индустрије 4.0 на које је било потребно одговорити у оквиру спроведеног истраживања. Истакнуто је пет изазова који представљају проблем истраживања, као и основна хипотеза и циљ истраживања. Представљен је и кратак преглед решења за моделовање и извршавање производних процеса које кандидат описује у дисертацији, а који се односе на употребу принципа инжењерства вођеном моделима и наменских језика. Стога, тема истраживања припада домену развоја софтвера заснованог на инжењерству вођеном моделима, као и моделовању и извршавању производних процеса. Кандидат такође представља преглед очекиваних доприноса и резултата истраживања. Прво поглавље завршено је структуром и кратким описом поглавља докторске дисертације.

Друго поглавље представља теоријске основе истраживања и почиње са прегледом индустријских револуција, уз посебну пажњу усмерену на Индустрију 4.0 и релевантне концепте и технологије који се јављају у том домену. Затим су описани концепти планирања производње и производних процеса, посебно савременог планирања производних процеса уз помоћ рачунара. Кандидат у овом поглављу истиче инжењерство засновано на способностима и могућност повезивања оваквог инжењерства са планирањем производних процеса, што је и урађено кроз предложено решење представљено у наредним поглављима. На крају другог поглавља представљен је преглед парадигме инжењерства вођеном моделима и језика за моделовање наменских за домен.

У трећем поглављу описана је мотивација да се одговори на изазове у ери Индустрије 4.0. Такође су, уз представљену основу хипотезу истраживања, дефинисане и четири изведене хипотезе како би на бољи начин били представљени различити аспекти основне хипотезе, а чијим је потврђивањем или одбацивањем могуће потврдити или одбацивати основну хипотезу. Следи представљање главног циља истраживања, као и критичних фактора успеха које је потребно достићи. У наставку поглавља, јасно су описани сви очекивани теоријски, развојни, апликативни и друштвени доприноси и резултати ове докторске дисертације, оправдавајући спроведено истраживање од стране кандидата. Комплетно истраживање спроведено је на систематичан начин, употребом општеприхваћених принципа метода научног рада у области рачунарских наука (енгл. *Design Science Research Methodology*), описаних на крају трећег поглавља докторске дисертације.

У четвртном поглављу докторске дисертације, кандидат представља преглед тренутног стања у области. Најпре је описана примена парадигме инжењерства вођеном моделима и

наменских језика у областима које обухватају информационе системе и Индустрију 4.0. Следи главни сегмент прегледа стања у области који се односи на моделовање производних процеса помоћу разних језика и приступа, посебно у ери Индустрије 4.0. На основу прелиминарног истраживања, кандидат је прво идентификовао десет захтева које би један језик за моделовање производних процеса у контексту Индустрије 4.0 требало да испуни. Специфицирани захтеви коришћени су за анализу постојећих језика за моделовање производних процеса. Тиме је постављен оквир у којем су сви језици анализирани на исти и систематичан начин. Затим је описан систематичан поступак претраге литературе, као и формулисана питања на које је потребно одговорити након прегледа литературе. Кандидат је идентификоване језике разврстао у четири различите категорије. Језици су детаљно описани и, за сваки од њих, извршена је анализа испуњености претходно дефинисаних десет захтева. На крају четвртог поглавља, кандидат одговара на формулисана истраживачка питања, приказује у којој мери анализирани језици испуњавају дефинисане захтеве, наводи главне предности и недостатке постојећих језика и отвара дискусију о будућим правцима истраживања у области моделовања производних процеса у контексту Индустрије 4.0. Како није пронађен ни један језик за моделовање процеса који испуњава све дефинисане захтеве, оправдана је потреба за креирањем новог наменског језика за моделовање производних процеса. Представљен и анализиран преглед литературе, посебно наведене недостатке постојећих језика и будуће правце истраживања у области моделовања производних процеса, могу искористити истраживачи као основу за свој истраживачки рад.

Решење засновано на инжењерству вођеном моделима, представљено од стране кандидата, које се састоји од новог система и новог приступа за моделовање и извршавање производних процеса, описано је у петом поглављу. Представљено решење део је ширег истраживања, а у докторској дисертацији кандидата, пажња је усмерена на моделовање производних процеса и аутоматизовано генерисање извршивих инструкција и техничке документације. Кандидат детаљно описује све компоненте система, посебно алат за моделовање производних процеса и генераторе инструкција и техничке документације, као и кораке у новом приступу неопходне како би се од модела производног процеса независног од производног система дошло до извршивих инструкција и техничке документације. Уз представљене циљеве новог решења заснованог на моделима, а посебно наменског језика и алата за моделовање производних процеса, овакав један иновативан приступ одговара филозофији Индустрије 4.0 и доприноси решавању изазова флексибилне производње.

Употребом језика *Feature-Oriented Domain Analysis (FODA)*, кандидат је у шестом поглављу докторске дисертације детаљно представио домен моделовања производних процеса у контексту Индустрије 4.0. Домен производних процеса представљен је кроз перспективе операција, ресурса и тока, а доменско знање кандидат је прикупио из различитих научних радова, техничке документације, разних студија случаја и кроз разговоре са експертима из домена. Кандидат је на систематичан начин представио проблемски домен и концепте који се користе у њему, формирајући основу за креирање новог језика који би подржао описане концепте.

Главна компонента описаног решења заснованог на моделима представља наменски језик за моделовање производних процеса, описаног у седмом поглављу докторске дисертације. Кандидат је развио нови наменски језик назван Вишенивовски језик за моделовање производних процеса (енгл. *Multi-Level Production Process Modeling Language (MultiProLan)*), чији су модели процеса погодни за потребе динамичке оркестрације у производњи и аутоматизованог генерисања извршивих инструкција и техничке документације. У овом поглављу описана је најпре употреба новог наменског језика, као и његови корисници. Затим су представљени апстрактна синтакса језика креирана уз помоћ језика *Ecore*, који је део радног окружења *Eclipse Modeling Framework (EMF)*, и низ ограничења развијених уз помоћ језика *Object Constraint Language (OCL)*. Конкретна синтакса и прототип алат за моделовање производних процеса креирани су уз помоћ радног оквира *Eclipse Sirius* и представљени су у наставку овог поглавља. Језик *MultiProLan* испуњава претходно формулисаних десет захтева за моделовање производних процеса, што га издваја од осталих језика доступних у

литератури, а који су приказани у докторској дисертацији.

Представљено решење засновано на моделима, са наменским језиком *MultiProLan* као главном компонентом, примењено је у две студије случаја, описане у осмом поглављу докторске дисертације. Прва студија случаја представља моделовање производног процеса састављања дрвене кутије која има више различитих варијација. У овој студији случаја кандидат истиче могућности новог наменског језика приликом моделовања разних аспеката производног процеса. Такође, у оквиру ове студије случаја представљени су и примери генерисаних инструкција и техничке документације, чиме су презентоване активности свих главних компоненти предложеног решења. Друга студија случаја представља показно окружење у којем су састављани објекти од *LEGO*<sup>®</sup> коцкица. У овом окружењу коришћени су различити ресурси за извршавање процесних корака, попут индустријских покретних робота, истраживачких паметних робота и људи. На тај начин представљено је извршавање производних процеса употребом новог решења заснованог на моделима. У оквиру ове две студије случаја, показано је да је могуће искористити предложено решење и нови наменски језик за потребе моделовања и извршавања производних процеса у монтажној индустрији.

Поред две студије случаја, кандидат је у деветом поглављу докторске дисертације представио и анализу и оцену наменског језика *MultiProLan* и алата за моделовање производних процеса. У овом поглављу описан је експеримент, у којем су учествовали инжењери процеса, инжењери софтвера, истраживачи и студенти, а који се састојао од тестирања наменског језика и алата за моделовање производних процеса кроз креирање примера модела и попуњавање упитника. Задаци које су учесници решавали у експерименту, решења задатака и упитник који су попуњавали, приказани су у додатку докторске дисертације. Учесници су оцењивали одређене карактеристике квалитета језика и алата, а из резултата попуњених анкета могуће је закључити да су језик и алат употребљиви у пракси. Већина учесника дала је позитивну оцену на све карактеристике квалитета које су биле анализиране, чиме је могуће потврдити теоријске и практичне резултате истраживања описаног у докторској дисертацији.

У последњем, десетом поглављу, представљена је рекапитулација остварених доприноса и резултата истраживања описаних у докторској дисертацији, као и потврђивање изведених хипотеза, а самим тим и основне хипотезе. Такође, у овом поглављу представљен је низ будућих праваца истраживања, који могу бити основа за нове истраживачке пројекте у домену моделовања и извршавања процеса у ери Индустрије 4.0.

Комисија закључује да су предмет, постављени циљеви истраживања, као и истраживачке хипотезе прецизно и на одговарајући начин описани. Кандидат у својој докторској дисертацији на систематичан начин представља тренутно стање у области, на основу којег предлаже ново решење за спецификацију и генерисање производних процеса. Предложено решење, његова примена у студијама случаја и оцена од стране различитих група корисника, детаљно су описани у докторској дисертацији, као и будући правци истраживања и развоја. Сагласно наведеним закључцима, комисија позитивно оцењује све делове докторске дисертације кандидата Марка Вјештице.

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

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

- [1] **Vještica M**, Dimitrieski V, Pisarić M, Kordić S, Ristić S, Luković I, "Production processes modelling within digital product manufacturing in the context of Industry 4.0", *International Journal of Production Research*, 61 (2023) 6271-6290, DOI: 10.1080/00207543.2022.2125593 (*Operations Research & Management Science*: 5/86; IF 2022 = 9,2) (**M21a**)
- [2] **Vještica M**, Dimitrieski V, Pisarić M, Kordić S, Ristić S, Luković I, "Multi-level production process modeling language", *Journal of Computer Languages*, 66 (2021) 101053, DOI: 10.1016/j.col.2021.101053 (*Computer Science, Software Engineering*: 58/108, IF 2022 = 2,2) (**M22**)
- [3] **Vještica M**, Dimitrieski V, Pisarić M, Kordić S, Ristić S, Luković I, "Towards a Formal Specification of Production Processes Suitable for Automatic Execution", *Open Computer Science*, 11 (2021) 161-179, DOI: 10.1515/comp-2020-0200 (IF 2022 = 1,5) (**M24**)
- [4] Todorović M, Ivanišević Đ, **Vještica M**, Dimitrieski V, Luković I, "An Automatic Generation of Production Documentation from MultiProLan Models", *Proceedings of the 11th International Conference on Information Society and Technology (ICIST 2021)*, 1 (2021) 96-101, ISBN: 978-86-85525-24-7 (**M33**)
- [5] **Vještica M**, Dimitrieski V, Pisarić M, Kordić S, Ristić S, Luković I, "The Syntax of a Multi-Level Production Process Modeling Language", *Annals of Computer Science and Information Systems, Proceedings of the 2020 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS 2020)*, 21 (2020) 751-760, DOI: 10.15439/2020F176 (**M33**)
- [6] **Vještica M**, Dimitrieski V, Pisarić M, Kordić S, Ristić S, Luković I, "An Application of a DSML in Industry 4.0 Production Processes", *IFIP Advances in Information and Communication Technology, Proceedings of the IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS 2020)*, 591 (2020) 441-448, DOI: 10.1007/978-3-030-57993-7\_50 (**M33**)
- [7] **Vještica M**, Dimitrieski V, Pisarić M, Kordić S, Ristić S, Luković I, "Towards a formal description and automatic execution of production processes", *Proceedings of the 2019 IEEE 15th International Scientific Conference on Informatics (Informatics'2019)*, 1 (2019) 463-468, DOI: 10.1109/Informatics47936.2019.9119314 (**M33**)

Комисија констатује да је кандидат током истраживачког рада на докторским студијама објавио 18 радова у научним часописима, монографијама и зборницима научних скупова. Међу тим радовима, укупно 7 радова је уже повезано с темом докторске дисертације кандидата и резултатима који су у тој докторској дисертацији представљени, укључујући 2 рада у међународним часописима са *ISI* листе (M21a) [1] и (M22) [2], један рад у међународном часопису са *ESCI* листе (M24) [3] и 4 саопштења с међународних скупова штампаних у целини (M33) [4-7].

## **VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА:**

У докторској дисертацији кандидата представљени су резултати остварени у раду на развоју методолошког приступа спецификације и генерисања производних процеса. На основу прегледа релевантне литературе и анализе постојећих језика и приступа за моделовање и извршавање производних процеса, могуће је уочити да остварени резултати представљају искоришћење, разраду и синтезу постојећих концепата и сазнања, што је довело до једног новог приступа решавању изазова Индустије 4.0. Посебно се издваја допринос решавању изазова моделовања производних процеса у ери Индустије 4.0, у којој би модели производних процеса требало да буду специфицирани тако да је могуће аутоматизовано извршавање процесних корака, али би модели процеса требало уједно да буду независни од производног система како би било могуће извршити их у различитим производним системима. У дисертацији, представљени су значајни теоријски, развојни, апликативни и друштвени резултати и доприноси истраживања.

Теоријски доприноси и резултати обухватају: а) преглед и анализу постојећих језика моделовања производних процеса, б) идентификацију основних концепата неопходних за креирање наменског језика за моделовање производних процеса у ери Индустије 4.0, в)

спецификацију новог приступа заснованог на моделима за потребе динамичке производње и аутоматизованог генерисања извршивих инструкција, г) спецификацију методологије за аутоматизовану трансформацију модела производних процеса независних од производног система у моделе производних процеса зависне од производних система, и д) примену принципа инжењерства вођеном моделима у домену производње, а чиме је омогућено једноставније моделовање и извршавање производних процеса.

Доприноси и резултати развоја софтверске подршке за моделовање и извршавање производних процеса обухватају: а) развијен нови наменски језик *MultiProLan* и софтверски алат за моделовање производних процеса, и б) развијени генератори инструкција и техничке документације за потребе аутоматизованог генерисања извршивих инструкција и техничке документације из модела производних процеса.

Доприноси и резултати примене новог приступа заснованог на моделима и наменског језика обухватају: а) реализацију две студије случаја у монтажној индустрији, б) анализу и оцену новог језика и софтверског алата за моделовање производних процеса од стране различитих корисника, и в) презентовање новог практичног искуства оствареног применом новог методолошког приступа, софтверског алата и језика за моделовање.

Друштвени доприноси и резултати обухватају могућност примене новог методолошког приступа и софтверског решења у различитим организацијама, чиме би било могуће унапредити управљање производним процесима на један савремен начин.

Резултати истраживања представљени у докторској дисертацији отварају нова истраживачка питања и могуће правце истраживања и развоја. Нови правци истраживања у домену моделовања у производњи обухватају креирање фамилије језика за моделовање производних процеса на нивоу једног постројења, колаборативних производних процеса на нивоу више фабрика, као и производних система и радника у ери Индустрије 4.0. Додатно је потребно истражити моделовање квалитета производње, сигурности и ризика по раднике у фабрици, утрошка енергије приликом извршавања производних процеса, али и аутоматизованог креирања модела производних процеса из модела производа. Даљи развој наменског језика и алата за моделовање производних процеса обухвата развој система препоруке извршавања модела производног процеса у одговарајућем систему, интеграцију алата са стандардизованим способностима и параметрима, као и проширење језика концептима за моделовање квалитета и комплексније сарадње ресурса. Нови домени примене језика и алата за моделовање производних процеса обухватају првенствено примену у процесној индустрији, односно континуалној производњи, интеграцију са системом за аутоматизовану детекцију извршавања процесних корака, примену у проширеној или помешаној реалности, као и примену науке о подацима и рударења процеса за потребе отклањања недостатака у моделима производних процеса.

## **VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА:**

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

Кандидат је у оквиру докторске дисертације на јасан, прегледан и систематичан начин спровео: формулисање теоријских основа неопходних за остварење истраживачких резултата; анализу тренутног стања у области моделовања и извршавања производних процеса у складу с доступном литературом; формирање новог методолошког приступа и имплементирање софтверског решења за моделовање и извршавање производних процеса; представљање теоријских, развојних, апликативних и друштвених резултата и доприноса; исказивање применљивости представљеног софтверског решења и структурирано анализирање истраживачких резултата; анализу и оцену софтверског решења; дискусију доприноса и питања битних за примену и идентификацију сличних будућих истраживања.

Комисија констатује да је ова докторска дисертација оригинално дело аутора. Текст дисертације додатно је проверен путем софтвера за детекцију плагијаризма *iThenticate* и нису пронађене сличности које би указивале на било какву врсту плагијаризма. Једине пронађене сличности односе се на објављене радове самог аутора у коауторству с менторима и истраживачима из исте истраживачке групе, а у којима су већ јавно приказани делови резултата, уграђених у ову докторску дисертацију, а што је и очекивани захтев према кандидату и његовом истраживачком раду.

Сагласно свим презентованим чињеницама у овом извештају, комисија даје позитивну оцену за начин приказа и тумачења резултата истраживања.

#### **IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

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

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

Дисертација је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме.

2. Да ли дисертација садржи све битне елементе?

Дисертација садржи све битне елементе.

3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци?

Кандидат је у истраживачком раду из области моделовања и извршавања производних процеса у домену Индустрије 4.0, представљеном у докторској дисертацији, остварио теоријске, развојне, апликативне и друштвене резултате који представљају оригиналан допринос науци и искорак у односу на тренутно стање приказано у доступној литератури. Креиран је нови методолошки приступ и софтверско решење на основу принципа инжењерства вођеном моделима, као и наменски језик за формалну спецификацију производних процеса са циљем увођења фабрика у процес дигиталне трансформације и повећања флексибилности производње, чиме је могуће одговорити на растуће потребе купаца. Поред новог методолошког приступа и наменског језика, креирани су генератори инструкција и техничке документације, који на аутоматизован начин трансформишу моделе производних процеса, специфициране помоћу новог наменског језика, у извршиве инструкције и техничку документацију различитих типова. Креирањем методолошког приступа у којем се раздвајају модели производних процеса независних од производног система од модела производних процеса зависних од производних система, пројектанти процеса не морају да поседују знање о конкретном производном систему и могу да моделују производни процес који је могуће извршити у различитим производним система. Методолошки приступ потврђен је кроз имплементацију софтверског решења и примену у студијама случаја, а наменски језик и софтверски алат за моделовање производних процеса оцењени су од стране различитих корисника. У дисертацији су представљени даљи правци истраживања који могу бити смернице за даљи развој науке у домену Индустрије 4.0. На тај начин, кандидат је овом докторском дисертацијом креирао одличне основе за примену општин, напредних, креативних и иновативних приступа унапређењу производних процеса у контексту Индустрије 4.0, а посебно оних аспеката који се односе на њихово апстрактно моделовање, а затим и аутоматизацију поступака њиховог извршења у конкретним производним постројењима и у контексту конкретно примењених производних технологија.

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

Дисертација не поседује недостатке који би могли негативно да утичу на вредност постигнутих резултата истраживања.



<b>X ПРЕДЛОГ:</b>
На основу наведеног, комисија предлаже:
<b>а) да се докторска дисертација прихвати, а кандидату одобри одбрана;</b> б) да се докторска дисертација врати кандидату на дораду (да се допуни односно измени); в) да се докторска дисертација одбије.

Место и датум:

1. др Соња Ристић, редовни професор  
\_\_\_\_\_, председник
2. др Миладин Стефановић, редовни професор  
\_\_\_\_\_, члан
3. др Славица Кордић, ванредни професор  
\_\_\_\_\_, члан
4. др Иван Луковић, редовни професор  
\_\_\_\_\_, ментор
5. др Владимир Димитриески, доцент  
\_\_\_\_\_, ментор

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

**DOCTORAL DISERTATION EVALUATION REPORT**

<b>I COMMITTEE INFORMATION</b>			
<p>1. Date and body that assigned the committee: 20. 7. 2023, based on the Decree of the Academic Council of the Faculty of Technical Sciences, Dean of the Faculty of Technical Sciences issued Decision on the appointment of the committee for the evaluation and defense of the doctoral dissertation, No. 012-199/36-2022.</p>			
<p>2. Committee members information in accordance with regulations for doctoral studies at University of Novi Sad:</p>			
1.	Dr. Ristić Sonja	Full Professor	Information System Engineering 14. 5. 2018.
	Surname and name	Title	Scientific field and date of election
	University of Novi Sad Faculty of Technical Sciences		Chair
	Institution of employment		Committee member role
2.	Dr. Stefanović Miladin	Full Professor	Industrial Engineering 25. 9. 2014.
	Surname and name	Title	Scientific field and date of election
	University of Kragujevac Faculty of Engineering		Member
	Institution of employment		Committee member role
3.	Dr. Kordić Slavica	Associate Professor	Applied Computer Science and Informatics 1. 4. 2019.
	Surname and name	Title	Scientific field and date of election
	University of Novi Sad Faculty of Technical Sciences		Member
	Institution of employment		Committee member role
4.	Dr. Luković Ivan	Full Professor	Information Systems 10. 5. 2021.
	Surname and name	Title	Scientific field and date of election
	University of Belgrade Faculty of Organizational Sciences		Mentor
	Institution of employment		Committee member role

5.	Dr. Dimitrieski Vladimir	Assistant Professor	Applied Computer Science and Informatics 14. 9. 2018.
	Surname and name	Title	Scientific field and date of election
	University of Novi Sad Faculty of Technical Sciences		Mentor
	Institution of employment		Committee member role

## II CANDIDATE INFORMATION

- Name, name of one parent, surname:  
Marko, Milenko, Vještica
- Date, municipality and country of birth:  
9. 7. 1994., Novi Sad, Republic of Serbia
- Name of the academic institution, previously completed academic program and the title acquired:  
University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Master Academic Studies, Master in Electrical and Computer Engineering
- Year of enrollment into doctoral studies and name of the PhD study program:  
2018., Computing and Control Engineering

## III TITLE OF THE DOCTORAL DISSERTATION:

*Пристап спецификацији и генерисању производних процеса заснован на инжењерству вођеном моделима / A Model-Driven Approach to the Production Process Specification and Generation*

## IV OVERVIEW OF THE DOCTORAL DISSERTATION:

Concisely summarize the dissertation content with the indicated number of pages, chapters, figures, images, charts etc.

The doctoral dissertation is written in English on 253 pages in the A4 format. It contains 10 chapters, consisting of 51 figures, 2 graphs, 8 tables and 21 listings. The dissertation contains 265 references. The dissertation chapters are presented as follows:

- Introduction;
- Background and Theoretical Foundation;
- Motivation, Research Hypotheses, Goals and Methodology;
- State-of-the-Art;
- MD Solution for Modeling and Automatic Execution of Production Processes;
- Analysis of the Production Process Modeling Domain;
- Multi-Level Production Process Modeling Language;
- Application of the MD Solution and MultiProLan;
- Evaluation of MultiProLan and Process Modeling Tool; and
- Conclusions and Future Work.

Besides Key Word Documentation presented in Serbian and English, the dissertation contains an abstract with keywords in English and an extended abstract with keywords in Serbian. The Serbian extended abstract is written on 14 pages in the A4 format. The dissertation also contains

Dedication, Acknowledgments, Contents, as well as List of Figures, List of Graphs, List of Tables, List of Listings, List of Acronyms, References, Appendix A. Evaluation Experiment Tasks and Questionnaire, and Data Processing Plan.

## **V EVALUATION OF INDIVIDUAL DISSERTATION CHAPTERS:**

Research results presented in the doctoral dissertation are from the scientific field of Electrical and Computer Engineering, and the specific scientific field of Applied Computer Science and Informatics.

In the Introduction section, the candidate briefly described the notion of production and provided an overview of Industry 4.0 challenges that the conducted research aimed to alleviate. Five challenges are highlighted, representing the research problem, as well as the main hypothesis and the research goal. The candidate presented a short overview of the solution for production process modeling and execution that is further discussed in the dissertation. In the solution, the model-driven principles and domain-specific languages were applied. Therefore, the research topic belongs to the domain of model-driven software development and modeling and execution of production processes. The candidate also presented an overview of expected research contributions and results. The first section ends with the structure and short description of the doctoral dissertation content.

The second section represents the background and theoretical foundation and begins with an overview of industrial revolutions, with a specific focus on Industry 4.0 and its relevant concepts and technologies. Afterward, production process planning concepts are described, especially contemporary computer-aided production process planning. In this section, the candidate pointed out skill-based engineering and the possibility of connecting it with production process planning, which is demonstrated in further sections through the proposed solution. At the end of the second section, an overview of the model-driven paradigm and domain-specific languages is presented.

In the third section, the motivation to alleviate Industry 4.0 challenges is described. Besides the main hypothesis, the four derived hypotheses are also defined to better address different aspects of the main hypothesis. By confirming or rejecting the derived hypotheses, the main hypothesis can be confirmed or rejected accordingly. Afterward, the main research goal and critical success factors that need to be achieved are outlined. Then, the expected theoretical, development, application and socio-economic contributions and results of the doctoral dissertation are concisely described, providing the justification for conducting the research done by the candidate. The research was conducted in a systematic manner, by utilizing Design Science Research Methodology (DSRM), outlined at the end of the third section of the doctoral dissertation.

In the fourth section of the doctoral dissertation, the candidate presented state-of-the-art in relevant research fields. First, the application of the model-driven paradigm and domain-specific languages in the fields of information systems and Industry 4.0 is presented. The following section of the state-of-the-art is the main one and is related to modeling production processes by using various languages and approaches, especially in the era of Industry 4.0. Based on the preliminary research, the candidate first identified ten requirements that a language for production process modeling in the context of Industry 4.0 should fulfill. Specified requirements were used for the analysis of existing languages for production process modeling. Therefore, a framework was established in which all the languages were analyzed in the same and systematic manner. Afterward, systematic research of the literature was described and the research questions were formulated which should be answered after the literature review. The candidate divided the identified languages into four different categories. Languages were described in detail and, for each one of them, the analysis of the fulfillment of the previously defined requirements was performed. At the end of the fourth section, the candidate answered the formulated research questions, presented how much analyzed languages fulfill the defined requirements, stated the main advantages and disadvantages of existing languages, and discussed future research directions in the field of production process modeling in the context of Industry 4.0. As a single language was not found for production process modeling

that fulfills all the defined requirements, the need for the creation of a novel domain-specific language for production process modeling is justified. The literature review being presented in the thesis, especially the stated disadvantages of existing languages and future research direction in the field of production process modeling, can be used by researchers as a foundation for their own research.

A model-driven solution proposed by the candidate is composed of a novel system and a novel approach for production process modeling and execution, described in the fifth section. The presented solution is a part of wider research efforts, in which the candidate's doctoral dissertation focuses on modeling production processes and automatically generating executable instructions and manufacturing documentation. The candidate described in detail all the system's components, especially the tool for production process modeling and generators of instructions and manufacturing documentation, as well as the steps in the novel approach necessary to transform production process models independent of production systems into executable instructions and manufacturing documentation. With the presented goals of the novel model-driven solution, especially the domain-specific language and the tool for production process modeling, such an innovative approach fits the Industry 4.0 philosophy and contributes to solving challenges of flexible production.

By using the Feature-Oriented Domain Analysis (FODA) method, the candidate presented in detail the domain of production process modeling in the context of Industry 4.0 in the sixth section of the doctoral dissertation. The production process domain is presented through operational, resource and control-flow perspectives, and the candidate gathered the domain knowledge from different research papers, technical documentation and use cases, and by talking to domain experts. The candidate presented the domain and related concepts in a systematic manner, forming a foundation for the creation of a novel language that would support the presented concepts.

The main component of the proposed model-driven solution is a domain-specific language for production process modeling, outlined in the seventh section of the doctoral dissertation. The candidate developed a novel domain-specific language named Multi-Level Production Process Modeling Language (MultiProLan), whose process models are suitable for dynamic production orchestration and automatic generation of executable instructions and manufacturing documentation. In this section, the usage of novel domain-specific language and its users were described first. Afterward, the language's abstract syntax created by using the Ecore language, which is a part of the Eclipse Modeling Framework (EMF), and different constraints developed by using Object Constraint Language (OCL) were presented. The language's concrete syntax and the tool prototype for production process modeling were created by using the Eclipse Sirius framework and they were presented next in this section. MultiProLan fulfills the previously formulated ten requirements for production process modeling, which distinguish it from other languages presented in the related literature of this doctoral dissertation.

The proposed model-driven solution, with MultiProLan domain-specific language as its main component, was applied in the two use cases, described in the eighth section of the doctoral dissertation. The first use case demonstrates the production process modeling of wooden box assembly that has different product variations. In this use case, the candidate pointed out the possibilities of the novel domain-specific language during the modeling of different aspects of production processes. In addition, examples of automatically generated instructions and manufacturing documentation were presented in this use case, demonstrating the activities of all main components of the proposed solution. The second use case represents a demonstration environment in which objects from LEGO® bricks were assembled. In this environment, different resources were used to perform process steps, such as industrial mobile robots, research-grade smart robots and human workers. Therefore, the execution of production processes was demonstrated by using the novel model-driven solution. These two use cases demonstrate that it is possible to use the proposed solution and the novel domain-specific language for production process modeling and execution in the assembly industry.

In addition to the use cases being considered, the candidate presented the evaluation of the MultiProLan domain-specific language and tool for production process modeling in the ninth section of the doctoral dissertation. In this section, the evaluation experiment was described, in which process engineers, software engineers, researchers and students participated. The experiment included testing the domain-specific language and the tool for production process modeling by creating different examples of models and completing the questionnaire. The tasks that participants were solving in the experiment, the solutions of the tasks and the questionnaire that the participants completed are given in the appendix of this doctoral dissertation. Participants evaluated different quality characteristics of the language and the tool, and based on the results from the completed questionnaire, it was concluded that the language and the tool can be used in practice. Most participants provided positive feedback related to all the quality characteristics that were analyzed. Thus, the theoretical and practical results of the research presented in this doctoral dissertation have been confirmed.

In the last, tenth section, the realized contributions and research results presented in this doctoral dissertation were recapitulated. The candidate justified the derived hypotheses and, consequently, the main hypothesis. Additionally, in this section, various future research directions were presented, which may be a foundation for new research projects in the domain of modeling and execution of processes in the era of Industry 4.0.

The committee states that the research problem, goals and hypotheses are described precisely and concisely. The candidate presented state-of-the-art in a systematic way in the doctoral dissertation, which was used as a basis to propose a novel solution for the production process specification and generation. The proposed solution, its application in the use cases and the evaluation performed by different user groups were presented in detail in the doctoral dissertation. The future research and development directions were also presented. Based on the stated conclusions, the committee positively evaluates all parts of the doctoral dissertation written by the candidate, Marko Vještica.

## **VI LIST OF SCIENTIFIC AND PROFESSIONAL MANUSCRIPTS PUBLISHED OR ACCEPTED FOR PUBLICATION, WHICH ARE BASED ON THE RESULTS OF THE DOCTORAL RESEARCH:**

List the related article titles, where and when they were published. First, state at least one article published or accepted for publication in accordance with regulations for doctoral studies at University of Novi Sad related to the content of the doctoral dissertation. In the case when articles are accepted for publication, list the article titles, where and when they will be published and attach the journal editorial acceptance confirmations.

- [1] **Vještica M**, Dimitrieski V, Pisarić M, Kordić S, Ristić S, Luković I, "Production processes modelling within digital product manufacturing in the context of Industry 4.0", International Journal of Production Research, 61 (2023) 6271-6290, DOI: 10.1080/00207543.2022.2125593 (Operations Research & Management Science: 5/86; IF 2022 = 9.2) **(M21a)**
- [2] **Vještica M**, Dimitrieski V, Pisarić M, Kordić S, Ristić S, Luković I, "Multi-level production process modeling language", Journal of Computer Languages, 66 (2021) 101053, DOI: 10.1016/j.cola.2021.101053 (Computer Science, Software Engineering: 58/108, IF 2022 = 2.2) **(M22)**
- [3] **Vještica M**, Dimitrieski V, Pisarić M, Kordić S, Ristić S, Luković I, "Towards a Formal Specification of Production Processes Suitable for Automatic Execution", Open Computer Science, 11 (2021) 161-179, DOI: 10.1515/comp-2020-0200 (IF 2022 = 1.5) **(M24)**
- [4] Todorović M, Ivanišević Đ, **Vještica M**, Dimitrieski V, Luković I, "An Automatic Generation of Production Documentation from MultiProLan Models", Proceedings of the 11th International Conference on Information Society and Technology (ICIST 2021), 1 (2021) 96-101, ISBN: 978-86-85525-24-7 **(M33)**
- [5] **Vještica M**, Dimitrieski V, Pisarić M, Kordić S, Ristić S, Luković I, "The Syntax of a Multi-Level Production Process Modeling Language", Annals of Computer Science and Information

- Systems, Proceedings of the 2020 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS 2020), 21 (2020) 751-760, DOI: 10.15439/2020F176 (M33)
- [6] **Vještica M**, Dimitrieski V, Pisarić M, Kordić S, Ristić S, Luković I, "An Application of a DSML in Industry 4.0 Production Processes", IFIP Advances in Information and Communication Technology, Proceedings of the IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS 2020), 591 (2020) 441-448, DOI: 10.1007/978-3-030-57993-7\_50 (M33)
- [7] **Vještica M**, Dimitrieski V, Pisarić M, Kordić S, Ristić S, Luković I, "Towards a formal description and automatic execution of production processes", Proceedings of the 2019 IEEE 15th International Scientific Conference on Informatics (Informatics'2019), 1 (2019) 463-468, DOI: 10.1109/Informatics47936.2019.9119314 (M33)

The committee states that during the research on his doctoral studies, the candidate published 18 articles in scientific journals, monographs and proceedings of scientific conferences. Among these articles, 7 articles are related to the candidate's doctoral dissertation and the results presented in the doctoral dissertation, including 2 articles in international journals from the ISI list (M21a) [1] and (M22) [2], a single article in the international journal from the ESCI list (M24) [3] and 4 articles from scientific conference proceedings (M33) [4-7].

## **VII CONCLUSIONS AND RESEARCH RESULTS:**

The results achieved in developing a methodological approach to production process specification and generation are presented in the doctoral dissertation. Based on the relevant literature review and the analysis of existing languages and approaches for production process modeling and execution, the committee justifies that the achieved results represent utilization, elaboration and synthesis of existing concepts and knowledge, which led to a novel approach in alleviating Industry 4.0 challenges. One of the main contributions is alleviating challenges of modeling production processes in the era of Industry 4.0, in which production process models should be specified in a way that allows the automatic execution of process steps, but also, process models should be independent of any production system, enabling production process models to be executed in various production systems. In the dissertation, various significant theoretical, development, application and socio-economic contributions and research results are presented.

Theoretical contributions and results include: (a) survey and analysis of existing languages for production process modeling; (b) identification of main concepts needed to implement a domain-specific language for production process modeling in the era of Industry 4.0; (c) specification of a novel model-driven approach for dynamic production and automatic generation of executable instructions; (d) specification of a methodology to automatically transform production process models independent of production systems into production process models dependent on specific production systems; and (e) application of model-driven principles in the production domain, contributing to easier production process modeling and execution.

Development contributions reflect a development of the software tool for production process modeling and execution, and include: (a) developed a novel domain-specific language MultiProLan and a software tool for production process modeling; and (b) developed instruction and manufacturing documentation generators for the automatic generation of executable instructions and manufacturing documentation from production process models.

Application contributions of the novel model-driven approach and the novel domain-specific language include: (a) two use cases in the assembly industry; (b) evaluation of the novel language and the software tool for production process modeling by different users; and (c) presentation of a new practical experience from applying a novel methodological approach, a software tool and a modeling language.

Socio-economic contributions include a possibility of applying a novel methodological approach and the proposed software tool in various organizations, improving the management of production processes contemporarily.

Research results presented in the doctoral dissertation open new research questions and new research and development directions. New research directions in the domain of modeling in production include the creation of a language family for modeling production processes in a single production facility, collaborative production processes in multiple factories, as well as production systems and human workers in the era of Industry 4.0. Additionally, it is necessary to research the modeling of production quality, safety aspects and risks for human workers in a factory, energy consumption during production process execution, and automatic creation of production process models based on product models. Further development of the domain-specific language and the tool for production process modeling include the development of a recommendation system for executing a production process model in the preferred production system, the integration of the tool with standardized capabilities and parameters, as well as the extension of the language with concepts for modeling production quality and more complex resource collaboration. New application domains of the language and the tool for production process modeling include primarily the application in the process industry, i.e., continuous production, the integration with a system for automatic detection of process step execution, the application in augmented or mixed reality, as well as the application in the domains of data science and process mining for eliminating insufficiencies from production process models.

**VIII EVALUATION OF STUDY RESULTS PRESENTATION AND INTERPRETATION:**

Explicitly indicate a positive or negative assessment of study results presentation and interpretation.

In his doctoral dissertation, the candidate clearly, precisely and systematically performed: formulation of the theoretical foundation required to achieve research results; analysis of state-of-the-art production process modeling and execution based on the available literature; creation of a novel methodological approach and implementation of a software tool for production process modeling and execution; presentation of theoretical, development, application and socio-economic results and contributions; application of the presented software tool and a structural analysis of the research results; evaluation of the software tool; discussion on contributions and questions relevant for the application and identification of similar future researches.

The committee finds that this doctoral dissertation is the original author's work. Text in the dissertation was additionally checked by using the iThenticate software for plagiarism detection. No similarities were found that would indicate any kind of plagiarism. The only similarities detected are related to the papers published by the author in co-authorship with his mentors, as well as the researchers of the same research group, in which parts of the results presented in this doctoral dissertation were already published. However, is the explicit requirement to the candidate in performing his doctoral research.

Based on the presented statements in this report, the committee gives a positive assessment of the presentation and interpretation of the research results.

**IX FINAL ASSESSMENT OF DOCTORAL DISSERTATION:**

Explicitly state if the dissertation is or is not written in accordance with the submitted dissertation proposal, as well as does it contain all the important elements. Provide clear, precise and concise answers to questions 3 and 4:

1. Was the dissertation written in accordance with the previously submitted dissertation proposal?

The dissertation is written in accordance with the previously submitted dissertation proposal.



2. Does the dissertation contain all the important elements?

The dissertation contains all the important elements.

3. Why does this dissertation provide original contributions to science?

In his research in the field of production process modeling and execution in the domain of Industry 4.0, presented in the doctoral dissertation, the candidate achieved theoretical, development, application and socio-economic results that represent the original contribution to the science and a step forward in comparison to contemporary state-of-the-art presented in the available literature. A new methodological approach and a model-driven software tool were created, as well as a domain-specific modeling language for the formal specification of production processes with the goal of introducing factories into the digital transformation process and increasing production flexibility, providing a response to the increasing needs of customers. Besides the novel methodological approach and domain-specific language, new instruction and manufacturing documentation generators were created, enabling the automatic transformation of production process models, specified by using the novel domain-specific modeling language, into executable instructions and manufacturing documentation of various types. By creating a methodological approach in which production process models independent of any production system are separated from production process models dependent on the specific production systems, process designers do not need to have knowledge about the specific production system, and they can model production processes that can be executed in different production systems. The methodological approach is approved through the implementation of the software tool and its application in the different use cases, and the domain-specific language and the software tool for production process modeling are evaluated by different users. Further research directions are presented in the dissertation that can be used as guidelines for the future development of science in the domain of Industry 4.0. That way, in his doctoral dissertation, the candidate created an excellent foundation for the application of basic, advanced, creative and innovative approaches that improve production processes in the context of Industry 4.0, especially aspects related to their abstract modeling and automating procedures for their execution in specific production systems and in the context of specifically applied production technologies.

4. What are the shortcomings of the dissertation and what is their impact on the research results?

The dissertation does not have shortcomings that would negatively impact on the research results.

<b>X PROPOSAL:</b>
Based on the indicated information, committee is proposing:
<b>a) To accept the doctoral dissertation and approve the candidate's defense;</b>
b) To return the doctoral dissertation to the candidate for revisions (to supplement or modify);
c) To reject the doctoral dissertation.

Place and date:

1. Dr. Sonja Ristić, Full Professor  
\_\_\_\_\_, chair
2. Dr. Miladin Stefanović, Full Professor  
\_\_\_\_\_, member
3. Dr. Slavica Kordić, Associate Professor  
\_\_\_\_\_, member
4. Dr. Ivan Luković, Full Professor  
\_\_\_\_\_, mentor
5. Dr. Vladimir Dimitrieski, Assistant Professor  
\_\_\_\_\_, mentor

**NOTE:** A committee member who does not want to sign the report due to disagreement in opinion with the majority of the committee is obliged to provide an explanation or reasons why the member does not want to sign the report and to sign the explanation accordingly.