УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
Машински факултет

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај о урађеној докторској дисертацији кандидата Душана М. Недељковића, маст. инж. маш.

Одлуком Наставно-научног већа Универзитета у Београду – Машинског факултета бр. 1210/3 од 07.09.2023. године именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Душана М. Недељковића, маст. инж. маш. под насловом

ДЕТЕКЦИЈА КИБЕРНЕТСКИХ НАПАДА НА СИСТЕМЕ ЗА УПРАВЉАЊЕ ПРОИЗВОДНИМ РЕСУРСИМА

После прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

И З В Е Ш Т А Ј

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат Душан Недељковић уписао је Докторске академске студије (ДАС) – Машинско инжењерство на Универзитету у Београду - Машинском факултету школске 2017/18. године. Другу годину ДАС уписао је први пут школске 2018/19. године, а затим је другу годину обновио 2019/20. школске године. Кандидат је испите из свих предмета предвиђених планом и програмом ДАС положио са просечном оценом 9,86. Трећу годину ДАС уписује школске 2020/21. године и обнавља је 2021/22. и 2022/23. школске године.

Кандидат је 27.04.2022. године поднео захтев број 663/1 да му се одобри израда докторске дисертације са темом „Детекција кибернетских напада на системе за управљање производним ресурсима“ под менторством др Живане Јаковљевић, редовног професора на који је сагласност дала Катедра за производно машинство. Одлуком Наставно-научног већа Универзитета у Београду - Машинског факултета бр. 663/3 од 02.06.2022. године Душану М. Недељковићу, маст. инж. маш. прихвата се тема докторске дисертације „Детекција кибернетских напада на системе за управљање производним ресурсима“ и именује се Комисија за подношење реферата о теми докторске дисертације у саставу:

- др Бојан Бабић, редовни професор Универзитета у Београду - Машинског факултета
- др Зоран Миљковић, редовни професор Универзитета у Београду - Машинског факултета
- др Никола Славковић, ванредни професор Универзитета у Београду - Машинског факултета
- др Милица Петровић, ванредни професор Универзитета у Београду - Машинског факултета
- др Младен Николић, ванредни професор Универзитета у Београду - Математичког факултета

Одлуком Наставно-научног већа Универзитета у Београду - Машинског факултета бр. 663/4 од 02.06.2022. године за ментора наведене докторске дисертације именује се др Живана Јаковљевић, редовни професор.

На основу Извештаја наведене Комисије за подношење реферата о теми докторске дисертације бр. 921/5 од 17.06.2022. године, Наставно-научно веће Универзитета у Београду - Машинског факултета 23.06.2022. године доноси Одлуку бр. 663/6 да се прихвата научна заснованост теме докторске дисертације и констатује да студент Душан Недељковић, маст. инж. маш. испуњава услове за израду докторске дисертације под насловом „Детекција кибернетских напада на системе за управљање производним ресурсима“. Веће научне области техничких наука Универзитета у Београду 04.07.2022. године доноси Одлуку бр. 61206-2742/2-22 да се даје сагласност на одлуке Наставно-научног већа Машинског факултета о прихватању теме докторске дисертације Душана Недељковића под називом „Детекција кибернетских напада на системе за управљање производним ресурсима“ и одређивању проф. др Живане Јаковљевић за ментора.

На основу обавештења др Живане Јаковљевић, редовног професора да је кандидат Душан М. Недељковић завршио докторску дисертацију, као и предлога колегијума наставника Катедре за производно машинство, Наставно-научно веће Универзитета у Београду - Машинског факултета 07.09.2023. године доноси Одлуку бр. 1210/3 о именовању Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације у саставу:

- др Зоран Миљковић, редовни професор Универзитета у Београду - Машинског факултета
- др Саша Живановић, редовни професор Универзитета у Београду - Машинског факултета
- др Никола Славковић, ванредни професор Универзитета у Београду - Машинског факултета
- др Милица Петровић, ванредни професор Универзитета у Београду - Машинског факултета
- др Младен Николић, ванредни професор Универзитета у Београду - Математичког факултета

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација Душана М. Недељковића под називом „Детекција кибернетских напада на системе за управљање производним ресурсима” припада научној области машинско инжењерство – ужа научна област производно машинство за коју је Универзитет у Београду – Машински факултет матичан. Дисертација је рађена под менторством проф. др Живане Б. Јаковљевић која у протеклих 10 година има објављених 14 радова категорије М23-М21а из уже научне области производно машинство.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Душан (Момир) Недељковић, маст. инж. маш. рођен је 03. децембра 1992. године у Аранђеловцу, Република Србија. Основну школу „Светолик Ранковић“ и средњу школу „Техничка школа – Милета Николић“ завршио је у Аранђеловцу као одличан ђак.

На Машински факултет Универзитета у Београду уписао се школске 2011/2012. године. Основне академске студије - Машинско инжењерство завршио је 2014. године одбранивши завршни рад са оценом 10 (десет) из предмета CAD/CAM системи и просечном оценом током Основних академских студија 8,48 (осам и 48/100). Школске 2014/2015. године уписао је Мастер академске студије - Машинско инжењерство на Модулу за производно машинство, а завршио их је 2016. године са просечном оценом 9,75 (девет и 75/100) одбранивши мастер рад на тему „Интерфејс човек-машина за одабране производне ресурсе" из предмета Аутоматизација производње, под менторством проф. др Живане Јаковљевић са оценом 10 (десет). Током студија на Машинском факултету два пута је награђиван за одличан успех поводом Дана Факултета. Школске 2017/2018. године, уписао је Докторске академске студије – Машинско инжењерство на Универзитету у Београду - Машинском факултету (број индекса Д13/17) где је положио све испите са просечном оценом 9,86 (девет и 86/100).

Након дипломирања започиње радни однос у компанији Сервотех д.о.о. као машински инжењер – пројектант. Од 19. јануара 2018. године запослен је као асистент на Универзитету у Београду - Машинском факултету на коме је, од пролећног семестра школске 2017/2018. године, укључен у наставни процес Катедре за производно машинство где реализује лабораторијске вежбе, преглед самосталних задатака и преглед пројеката на следећим предметима: Компјутерска графика (ОАС Машинско инжењерство), Технологија машинске обраде (ОАС Машинско инжењерство), CAD/CAM системи (ОАС Машинско инжењерство), Аутоматизација производње (МАС Машинско инжењерство), Рачунарски интегрисани системи и технологије (МАС Машинско инжењерство), Компјутерска симулација у аутоматизацији производње (МАС Машинско инжењерство), Кибернетско физички системи (МАС Индустрија 4.0) и Индустријски интернет ствари и сајбер безбедност (МАС Индустрија 4.0).

Душан Недељковић је од 1. фебруара 2018. ангажован на пројекту Технолошког развоја под називом „Иновативни приступ у примени интелигентних технолошких система за производњу делова од лима заснован на еколошким принципима“ који је финансирало Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије (ев. бр. ТР-35004, руководилац пројекта проф. др Бојан Бабић) закључно са 31. децембром 2019. године. Након тога, од 1. јануара 2020. ангажован је на пројекту под називом „Интегрисана истраживања у области макро, микро и нано машинског инжењерства“ који је финансиран од стране надлежних министарстава Владе Републике Србије према уговору о реализацији и финансирању научноистраживачког рада НИО у 2020. години (ев. бр. 451-03-68/2020-14/200105, руководилац пројекта проф. др. Радивоје Митровић), у 2021. години (ев. бр. 451-03-9/2021-14/200105, руководилац пројекта проф. др. Радивоје Митровић), у 2022. години (ев. бр. 451-03-68/2022-14/200105, руководилац пројекта проф. др. Владимир Поповић) и 2023. години (ев. бр. 451-03-47/2023-01/200105, руководилац пројекта проф. др. Владимир Поповић). Поред тога, од 2020. до 2022. године био је ангажован 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“. У периоду од 15.12.2021-15.03.2022. године Душан Недељковић је боравио на Џук Универзитету (енгл. *Duke University*) из Дурхама, САД у оквиру Erasmus+ КА107 пројекта размене студената. У том периоду, кандидат је био укључен у активности

Лабораторије за кибернетско-физичке системе (енгл. *Cyber-Physical Systems Lab*) чији је руководилац проф. др Мирослав Пајић.

На основу научноистраживачког рада током Докторских академских студија као аутор или коаутор објавио је пред широм научном и стручном јавношћу 19 радова и то 2 рада у међународним часописима (1 категорије М21 и 1 категорије М24), 1 рад у часопису националног значаја – категорија М53, 10 радова који су представљени на међународним и 6 на домаћим скуповима, као и једно техничко решење категорије М85.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација студента докторских студија Душана Недељковића под насловом „Детекција кибернетских напада на системе за управљање производним ресурсима“ представљена је на 139 страна А4 формата, писана је коришћењем серифног *Latin Modern Roman* фонта величине 12pt са једноструким проредом. Садржи 60 слика, 29 табела и 62 једначине, а структуирана је у следећих осам поглавља:

1. Увод
2. Анализа и класификација постојећих врста кибернетских напада
3. Преглед и анализа постојећих модела за детекцију кибернетских напада
4. Развој методологије за креирање алгоритама за детекцију кибернетских напада
5. Детекција кибернетских напада у ICS
6. Проширивање скупа података
7. Детекција кибернетских напада на секвенце дводимензионалних сигнала
8. Закључак

Поред тога, дисертација садржи и списак литературе са 136 литературних извора, као и резиме на српском и енглеском језику, садржај, биографију аутора, Изјаву о ауторству, Изјаву о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и Изјаву о коришћењу.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном поглављу наводе се предмет и научни циљ докторске дисертације који се односи на развој методологије за креирање алгоритама који представљају основе система за детекцију кибернетских напада у оквиру индустријских система управљања (енгл. *Industrial Control Systems* - ICS). Научни циљ је структуиран у пет основних циљева истраживања. На основу анализе тренутних потреба индустрије, специфичности архитектуре ICS и релевантних литературних извора у области детекције кибернетских напада на ICS наводе се три полазне хипотезе. На крају поглавља приказана је основна структура рада са кратким описом појединих поглавља.

Друго поглавље односи се на анализу и класификацију постојећих врста кибернетских напада на ICS. Анализирани су одговарајући литературни извори и успешно изведени кибернетски напади на индустријска постројења широм света, као и последице које су они изазвали или су могли изазвати. На основу спроведене анализе уведена је нова таксономија кибернетских напада на ICS.

Детаљан преглед и анализа постојећих метода за детекцију кибернетских напада на ICS дати су у оквиру трећег поглавља. Посебно су анализиране специфичности ICS и општих информационих технологија са аспекта захтева корисника, хардверске архитектуре система и последичних разлика у захтевима који се постављају пред системе сајбер безбедности код ове две врсте система. Након анализе постојећих метода заснованих на дизајну и подацима, извршена је дискусија њихових перформанси. Разматрани су и различити јавно доступни скупови података креирани за развој метода за детекцију кибернетских напада на ICS и анализирана је њихова заступљеност у литературним изворима.

Оригинална методологија за креирање алгоритама за детекцију кибернетских напада представљена је у четвртом поглављу. Методологија се састоји од две основне фазе: 1) офлајн генерисање алгоритма за детекцију напада и 2) онлајн детекција. Спада у класу метода заснованих на подацима и то на самонадгледаном учењу и у својој основи има универијатну ауторегресију података који се размењују између уређаја у оквиру ICS. Након уводних разматрања која се односе на преглед саме методологије, у поглављу су детаљно описани сви њени елементи – претпроцесирање сигнала, општи облици архитектура техника машинског учења коришћених за ауторегресију сигнала (машине са носећим векторима, три класе рекурентних неуронских мрежа и конволуционе неуронске мреже), критеријуми за избор одговарајућег модела, поступак аутоматског одређивања вредности прага детекције напада, као и алгоритам за онлајн имплементацију развијеног система за детекцију.

Резултати тестирања и верификације методологије представљене у оквиру четвртог поглавља описани су у петом поглављу кроз две студије случаја. Прва студија случаја односи се на јавно доступни скуп података SWaT (енгл. *Secure Water Treatment*) који је најчешће употребљаван у литературним изворима везаним за детекцију напада на ICS. У оквиру ове студије извршена је и упоредна анализа резултата предложене методологије са резултатима 11 метода из релевантних литературних извора. Друга студија случаја односи се на Електропнеуматски систем за позиционирање (ЕпСП) који је за потребе ове дисертације реализован у оквиру Лабораторије за аутоматизацију производње. У овој студији извршена је практична имплементација развијених алгоритама на контролерима ЕпСП и верификована је њихова применљивост у реалним условима и у реалном времену уз употребу стандардног управљачког хардвера.

Проблем потенцијалног недостатка довољне количине података за креирање система за детекцију напада разматран је у шестом поглављу у коме се предлаже приступ за проширивање скупа података заснован на генеративним супарничким мрежама. Овај приступ је тестиран на ЕпСП за који је умањена количина оригиналних података проширена предложеним приступом, а затим је на основу проширеног скупа креиран и имплементиран систем за детекцију напада. Експериментална верификација показала је да су резултати детекције добијени на основу проширеног скупа упоредиви са резултатима добијеним на основу оригиналног скупа података.

У седмом поглављу методологија из четвртог поглавља прилагођена је и имплементирана за детекцију напада на секвенце слика - дводимензионалних (2D) сигнала. Предложене су опште архитектуре за генерисање ауторегресионог модела секвенце 2D сигнала засноване на дводимензионалним конволуционим неуронским мрежама, дводимензионалним конволуционим мрежама са дугом краткорочном меморијом и њиховом комбинацијом, као и начини за избор одговарајућег ауторегресионог модела и онлајн детекцију напада. Перформансе развијених алгоритама су тестиране на секвенцама 2D сигнала које су прикупљене у оквиру дисертације.

У последњем поглављу сумирана су спроведена истраживања и извршена је дискусија добијених резултата. Изведени су закључци који се односе на резултате истраживања, карактеристике развијене методологије и полазне хипотезе. Предложене су и смернице за будућа истраживања у овој области.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација докторанда Душана Недељковића под називом: „Детекција кибернетских напада на системе за управљање производним ресурсима“ представља савремен и оригиналан научни рад у области сајбер безбедности индустријских система управљања. У оквиру дисертације развијена је оригинална методологија за креирање алгоритама за детекцију кибернетских напада на ICS са континуалним управљањем која је заснована на самонадгледаном учењу и униваријатној ауторегресији података који се размењују између паметних уређаја у оквиру ICS. Наведена методологија се уз увођење одговарајућих специфичности бави решавањем три проблема: 1) креирање алгоритама за детекцију напада на једнодимензионалне сигнале који се преносе између паметних уређаја у оквиру ICS, 2) проширивање података за креирање алгоритама како би се ублажио проблем њиховог недостатка изазван различитим ограничењима и 3) креирање алгоритама за детекцију напада на секвенце дводимензионалних сигнала (слика) који се преносе између паметних уређаја у оквиру ICS. Захваљујући својој аутономности и применљивости у реалним условима која је у раду експериментално демонстрирана, предложена методологија представља значајан прилог решавању једног од најактуелнијих проблема у области управљања производним ресурсима – сајбер безбедност и препознавање кибернетских напада на комуникационе линије између паметних уређаја у оквиру ICS.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У оквиру докторске дисертације коришћени су референтни и актуелни литературни извори – пре свега радови из утицајних научних часописа и са међународних конференција, као и монографски и нормативни извори из одговарајућих области. Извршен је детаљан преглед литературе која се односи на сајбер безбедност у оквиру ICS при чему су посебно разматране методе за генерисање система за детекцију напада на ICS са континуалним управљањем засноване на подацима и самонадгледаном учењу. Ове методе су послужиле и за упоредну анализу и верификацију перформанси развијене методологије. Поред тога, потребно је истаћи да је извршена и анализа јавно доступних скупова података за генерисање система за детекцију кибернетских напада на ICS на основу које је одабран скуп података за прву студију случаја. О актуелности наведене литературе говори и податак да је више од 80% литературних извора објављено у последњих 10, а више од 45% у последњих 5 година што је у потпуности у складу са чињеницом да се ради о новом истраживачком пољу.

На основу Правилника о поступку провере докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду извршена је провера оригиналности докторске дисертације „Детекција кибернетских напада на системе за управљање производним ресурсима“ аутора Душана М. Недељковића коришћењем програма iThenticate. Утврђен је индекс сличности од 11% уз свако појединачно преклапање мање од 1%. Наведени индекс сличности је настао као последица чињенице да приликом провере није искључена листа литературних извора, тако да се више од 50% пронађених преклапања односи на листу коришћене литературе. Поред тога, идентификована су преклапања која се односе на дефиниције скраћеница, затим у једначинама које су преузете из литературе наведене у раду, а које се односе на коришћене технике машинског учења, као и елементи из објављених радова аутора који су проистекли из докторске дисертације, цитирани су у раду и наведени у поглављу 4.3. овог Извештаја. Преостала преклапања односе се на опште фразе које се употребљавају у публикацијама овог типа (назив институције, наслови уводних поглавља, нумерација страна...), синтагме од неколико речи које су у широкој употреби, кључне речи у алгоритмима и слично. Све

наведено је у складу са чланом 9. Правилника о поступку провере докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У току израде докторске дисертације коришћене су мултидисциплинарне научне методе које поред техника уско везаних за производне технологије и управљање индустријским системима обухватају и методе из области математике и рачунарства. Конкретно, коришћене су следеће актуелне научне методе:

- Методе машинског учења засноване на статистичкој теорији учења – машине са носећим векторима,
- Методе дубоког учења засноване на конволуционим и рекурентним неуронским мрежама,
- Методе за креирање, дистрибуцију и имплементацију задатка управљања на паметне уређаје у оквиру ICS,
- Методе за дигиталну обраду сигнала у реалном времену,
- Методе за аквизицију и обраду експерименталних података,

које су током истраживања примењене на адекватан начин.

3.4. Применљивост остварених резултата

Питање сајбер безбедности у индустријским системима управљања отворено је релативно скоро као последица имплементације кибернетско физичких система, на њима заснованог индустријског интернета ствари и укидања границе између операционих и информационих технологија у оквиру ICS. Област детекције кибернетских напада на ICS представља релативно нов истраживачки правац у оквиру кога су истраживања интензивирана тек након *Stuxnet* напада 2010. године. Током претходних година развијен је одређен број техника за детекцију напада на ICS заснованих на подацима (детаљна анализа је дата у дисертацији), али су оне по правилу на релативно ниском технолошком нивоу спремности. За разлику од техника из разматраних литературних извора, методологија развијена у оквиру ове докторске дисертације примењена је на експерименталној инсталацији и њена употребљивост је демонстрирана у релевантном окружењу, што представља посебан допринос ове дисертације. Развијена методологија има практичну применљивост у свим индустријским областима у којима се користе ICS са континуалним управљањем засновани на кибернетско физичким системима (паметним уређајима).

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Током израде докторске дисертације докторанд Душан М. Недељковић показао је способност да самостално препозна и решава научне и инжењерске проблеме коришћењем савремених метода, као и да самостално овладава новим научноистраживачким методама теоријског и експерименталног карактера користећи релевантне литературне изворе. Наведено представља добру основу за успешан самосталан научноистраживачки рад у будућности.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру докторске дисертације „Детекција кибернетских напада на системе за управљање производним ресурсима“ кандидата Душана М. Недељковића остварен је научни допринос кроз развој следећих оригиналних метода:

1. Метода за креирање алгоритама за детекцију напада на једнодимензионалне сигнале који се преносе између уређаја у оквиру ICS, како за системе из којих је могуће прикупити довољну количину података тако и за системе из којих се може прикупити ограничена количина података (поглавља 4, 5 и 6 дисертације, верификовано у раду наведеном под [1] и радовима наведеним под [2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12] у одељку 4.3 овог Извештаја),
2. Метода за креирање алгоритама за детекцију напада на секвенце слика (2D сигнала) које се преносе између уређаја у оквиру ICS (поглавље 7, верификовано у радовима наведеним под [3, 11] у одељку 4.3 овог Извештаја).

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

На основу прегледа референтне литературе у области констатујемо да су резултати истраживања спроведених у оквиру ове докторске дисертације значајни и научно утемељени. Предложена методологија представља следећа унапређења у односу на остале (постојеће) приступе:

1. Коришћењем универзијатне ауторегресије обезбеђује се могућност имплементације развијених алгоритама детекције у реалном свету (увек на пријемном уређају) и превазилазе се недостаци досадашњих метода везани за доступност сигнала на појединим уређајима у оквиру ICS, различите фреквенце одабирања сигнала, кашњења у њиховом пријему и сл.
2. За разлику од алтернативних приступа избор ауторегресионог модела заснованог на техникама машинског учења (укључујући и све његове параметре) у предложеној методологији врши се аутоматски, водећи рачуна о прорачунским и енергетским ограничењима уређаја у оквиру ICS.
3. Избор прага детекције такође се врши аутоматски на основу прикупљених података током нормалног рада система и не садржи предубеђења проистекла из дефинисања прага на основу сигнала са нападима и последичне проблеме везане за генерализацију на неразматране нападе који су присутни у методама из литературних извора.
4. За разлику од осталих приступа, креирани алгоритми су примењени на експерименталној инсталацији и њихова употребљивост је демонстрирана у релевантном окружењу.

Поред наведеног, компаративна анализа са претходно развијеним методама из референтних литературних извора која је изложена у оквиру дисертације показује да алгоритми развијени предложеном методологијом дају боље резултате детекције напада изражене одговарајућим параметрима за процену перформанси.

4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси наведени у тачки 4.1. верификовани су радом категорије М21 чији је Душан М. Недељковић први аутор и једини аутор без доктората:

Категорија М21:

[1] **Nedeljkovic, D.**, Jakovljevic, Z., CNN based method for the development of cyber-attacks detection algorithms in industrial control systems, *Computers & Security*, Vol. 114, Article 102585, 2022, ISSN 0167-4048, DOI: https://doi.org/10.1016/j.cose.2021.102585, (M21, IF(2022): 5,6, 41/158)

који је цитиран 23 (извор Google Sholar), односно 16 (извор Scopus) пута без аутоцитата, као и у следећим радовима:

Категорија М24:

[2] **Nedeljković, D.**, Jakovljević, Ž., Miljković, Z., The detection of sensor signal attacks in industrial control systems, *FME Transactions*, Vol. 48, No. 1, pp. 7-12, 2020.

Категорија М33:

[3] **Nedeljković, D.**, Jakovljević, Ž., Deep Learning Prediction Models for the Detection of Cyber-Attacks on Image Sequences, in *International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region* (RAAD 2023), pp. 62-70, Bled, Slovenia, 2023.

[4] **Nedeljković, D.**, Jakovljević, Ž., GAN-based data augmentation in the design of Cyber-attack detection methods, in *9th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering* (IcETRAN 2022), pp. 669-674 (ISBN: 978-86-7466-930-3), Novi Pazar, Serbia, 2022.

[5] **Nedeljković, D.**, Jakovljević, Ž., Implementation of CNN based algorithm for cyber-attacks detection on a real-world control system, in *14th International Scientific Conference MMA 2021 – Flexible Technologies*, pp. 119-122 (ISBN 978-86-6022-364-9), Novi Sad, Serbia, 2021.

[6] **Nedeljković, D.**, Jakovljević, Ž., Cyber-attack detection method based on RNN, in *7th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering* (IcETRAN 2020), pp. 726-731 (ISBN: 978-86-7466-852-8), Belgrade, Serbia, 2020.

[7] **Nedeljković, D.**, Jakovljević, Ž., Miljković, Z., Pajić, M., Detection of cyber-attacks in electro-pneumatic positioning system with distributed control, in *Proceedings of 27th Telecommunications forum* (TELFOR 2019), art. 0525 (ISBN: 978-1-7281-4789-5), Belgrade, Serbia, 2019.

[8] **Nedeljković, D.**, Kokotović, B., Jakovljević, Ž., Comparative analysis of Discrete Wavelet Transform and Singular Spectrum Analysis in signal trend identification, in *Proceedings of International Conference on Innovative Technologies* (IN-TECH 2019), pp. 48-51 (ISSN 0184-9069), Belgrade, Serbia, 2019.

Категорија М53:

[9] **Nedeljković, D. M.**, Jakovljević, Ž. B., Miljković, Z. Đ., Pajić, M., Detection of cyber-attacks in systems with distributed control based on support vector regression, *Telfor Journal*, Vol. 12, No. 2, pp. 104-109, 2020.

Категорија М63:

[10] Јаковљевић, Ж., **Недељковић, Д.**, Сајбер безбедност у континуалним системима управљања – преглед резултата у оквиру пројекта Mission4.0, *43. ЈУПИТЕР конференција*, стр. 1.7-1.16 (ИСБН: 978-86-6060-137-9), Београд, Србија, 2022.

[11] **Недељковић, Д.**, Јаковљевић, Ж., Миљковић, З., Класификација слике заснована на примени конволуционих неуронских мрежа, *42. ЈУПИТЕР конференција*, стр. 4.13-4.23 (ИСБН: 978-86-6060-055-6), Београд, Србија, 2020.

[12] **Недељковић, Д.**, Миловановић, М., Јаковљевић, Ж., Прототип електропнеуматског система за позиционирање, *41. ЈУПИТЕР конференција*, стр. 4.19-4.24 (ИСБН: 978-86-7083-978-6), Београд, Србија, 2018.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу детаљног прегледа и анализе докторске дисертације „Детекција кибернетских напада на системе за управљање производним ресурсима“ докторанда Душана М. Недељковића, маст. инж. маш, Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације констатује да је дисертација успешно завршена у складу са предметом и постављеним циљевима истраживања и да представља оригинални научни рад са научним доприносом у научној области машинско инжењерство, ужа научна област производно машинство. Кандидат је кроз спроведена истраживања дошао до оригиналних научних резултата који су успешно експериментално верификовани и који се могу применити у инжењерској пракси.

Имајући у виду наведено, Комисија предлаже Наставно-научном већу Универзитета у Београду - Машинског факултета да усвоји овај Извештај и да се докторска дисертација под називом „**Детекција кибернетских напада на системе за управљање производним ресурсима**“ докторанда **Душана М. Недељковића, маст. инж. маш.** прихвати, заједно са овим Извештајем стави на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Др Зоран Миљковић, редовни професор
Универзитет у Београду - Машински факултет

.....
Др Саша Живановић, редовни професор
Универзитет у Београду - Машински факултет

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

.....
Др Милица Петровић, ванредни професор
Универзитет у Београду - Машински факултет

.....
Др Младен Николић, ванредни професор
Универзитет у Београду - Математички факултет