

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Сање Вујновић

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета бр. 5023/11-3 од 22.9.2017. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Сање Вујновић под насловом

„Детекција стања ротационих актуатора заснована на анализи акустичких сигнала“

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са Кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Школске 2011/2012 године Сања Вујновић је уписала докторске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на студијском програму Управљање системима и обрада сигнала. Током студија положила је све испите са просечном оценом 10,00 и одрадила све обавезе везане за студијски истраживачки рад предвиђене програмом.

Под менторством Жељка Ђуровића, редовног професора, кандидат је започео истраживачки рад у вези са детекцијом контаминације сигнала звука и детекцијом стања ротационих машина. Тему докторске дисертације под називом „Детекција стања ротационих актуатора заснована на анализи акустичких сигнала“ пријавила је Комисији за студије трећег степена на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, 02.02.2017. године.

Комисија за студије трећег степена разматрала је на својој седници одржаној 07.02.2017. године предлог теме за израду докторске дисертације и упутила предлог Комисије о оцени подобности теме и кандидата Наставно-научном већу на усвајање.

Наставно-научно веће је одлуком од 24.02.2017. године (број одлуке: 5023/11-1), на предлог Комисије за студије трећег степена, именovalo Комисију за оцeну услова и прихватање теме докторске дисертације кандидата Сање Вујновић у саставу:

1. проф. др Бранко Ковачевић, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду,
2. проф. др Зоран Перић, Електронски факултет, Универзитет у Нишу,
3. проф. др Драгана Шумарац Павловић, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду,
4. доц. др Милан Бебић, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду,
5. доц. др. Горан Квашчев, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду.

За ментора је именован др Жељко Ђуровић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

На седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета, одржаној 11.04.2017. године, усвојен је извештај Комисије за оцeну услова и прихватање теме докторске дисертације (број одлуке 5023/11-2).

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду је на седници од 24.04.2017. године дало сагласност на предлог теме докторске дисертације под насловом „Детекција стања ротационих актуатора заснована на анализи акустичких сигнала“ (број одлуке 61206-1590/2-17).

Кандидат је предао докторску дисертацију на преглед и оцeну 31.08.2017. године.

Комисија за студије трећег степена потврдила је на својој седници одржаној 05.09.2017. године испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета за формирање Комисије за преглед и оцeну докторске дисертације.

Наставно-научно веће Факултета је на својој седници, одржаној 12.09.2017. године (број одлуке 5023/11-3 од 22.9.2017. године) именovalo Комисију за преглед и оцeну докторске дисертације у саставу:

1. проф. др Жељко Ђуровић, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду,
2. проф. др Бранко Ковачевић, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду,
3. проф. др Зоран Перић, Електронски факултет, Универзитет у Нишу,
4. доц. др Горан Квашчев, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду,
5. доц. др Милан Бебић, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду и
6. проф. др Драгана Шумарац Павловић, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација под називом „Детекција стања ротационих актуатора заснована на анализи акустичких сигнала“ припада Техничким наукама, ужој научној области Аутоматике за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду. Ментор докторског рада је проф. др Жељко Ђуровић који је изабран у звање редовног професора за исту научну област и истовремено је аутор већег броја радова у истакнутим међународним часописима. Поред тога, ментор предаје више предмета при Катедри за сигнале и системе на

Електротехничком факултету који су у вези са предметом дисертације. Релевантни радови ментора су наведени приликом пријаве теме докторске дисертације кандидата.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Сања Вујновић рођена је 30. априла 1987. године у Београду где је завршила основну школу и Математичку гимназију. Електротехнички факултет Универзитета у Београду је уписала 2006. године. У јуну 2010. године је дипломирала са просеком 9.58 на Одсеку за сигнале и системе. Мастер студије из управљања процесима уписује 2010. године на универзитету *Imperial College* у Лондону, у трајању од годину дана, које завршава са највећом оценом *Distinction*. Мастер рад јој се звао „*Semidefinite relaxation for global optimization problems*“ и рађен је под супервизијом професора Имад Јаимоукха. Докторске студије на Електротехничком факултету у Београду је уписала 2011. године на модулу Управљање системима и обрада сигнала, а ментор докторске тезе јој је проф. др Жељко Ђуровић.

Сања Вујновић је изабрана у звање асистента у априлу 2012. године на Одсеку за сигнале и системе. Тренутно је активно ангажована у држању наставе на 14 предмета из области аутоматског управљања, обраде сигнала, стохастичких система и индустријске регулације. У току рада на факултету Сања Вујновић је учествовала на неколико пројеката, међу којима су: ТЕМПУС пројекат NeReLa (*Building network of remote labs for strengthening university-secondary vocational schools collaboration*), пројекат билатералне сарадње између Италије и Србије RODEO (*Robust decentralized estimation for large-scale system*), пројекат Министарства за науку и технолошки развој (Повећање енергетске ефикасности и расположивости у системима за производњу и пренос електричне енергије развојем нових метода за дијагностику и рану детекцију отказа), АЛАС симулатор лета,...

Област истраживања Сање Вујновић укључује обраду сигнала, моделирање и идентификацију система, препознавање облика, детекцију и изолацију отказа. Међу важним истраживањима може се сврстати детекција стања ударних плоча млинова у термоелектранама на основу акустичких сигнала. Током лета 2013. године била је у студијској посети на Универзитету у Калифорнији, Сан Дијего (UCSD, *Cymer Center for Control Systems and Dynamics*) под надзором професора Мирослава Крстића, а 2013. и 2014. године је похађала курсеве Европског института за управљање (*European Embedded Control Institute*, EECI). Досадашњи резултати приказани су кроз 1 рад у међународном часопису, 4 рада у домаћим часописима, 6 радова на домаћим конференцијама и 11 радова на међународним конференцијама.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација по својој форми и структури у потпуности одговара Упутству за обликовање докторске дисертације Универзитета у Београду. Дисертација је написана на 115 страна куцаног текста латиничним писмом и садржи 54 слике, 7 табела и 119 референци наведених по редоследу цитирања у тексту дисертације. Текст дисертације је организован у пет поглавља којима су додељени следећи наслови: 1. Увод; 2. Акустички сигнали у предиктивном одржавању; 3. Детекција контаминације акустичког сигнала; 4. Детекција стања ротационих актуатора; 5. Закључак. Такође, дисертација садржи насловну страну на српском и на енглеском језику, страну са информацијама о ментору и члановима комисије, кратак резиме дисертације на српском и енглеском језику, захвалницу, садржај, листу слика,

листу табела, списак коришћене литературе, биографију аутора, изјаву о ауторству, изјаву о истовестности штампане и електронске верзије докторског рада и изјаву о коришћењу.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном поглављу приказан је значај предиктивног одржавања, као и преглед и историјат развоја техника одржавања постројења, са посебним освртом на естимацију стања ротационих актуатора, као најраспрострањенијих врста машина. Значај и предност коришћења акустичких сигнала у те сврхе су детаљно анализирани, заједно са проблемима и недостацима које они носе. Назначена је мотивација за истраживање вршено у оквиру ове докторске дисертације, као и доприноси који су из ње проистекли у виду конкретних алгоритама за предобраду сигнала, издвајање обележја и детекцију стања ротационих актуатора коришћењем сигнала звука. На крају укратко је описана и даља структура тезе.

У другом поглављу описане су карактеристике звучног сигнала и њихова примена. Првенствено, дат је кратки преглед особина звука, начина његовог настанка и простирања. С обзиром да је велики број постојећих техника за анализу звучног сигнала мотивисан начином на који људско ухо реагује на звук, у кратким цртама је дат опис начина на који људи врше аквизицију ових сигнала. Најпопуларније методе за обраду и анализу звучног сигнала су описане, а предложени су и начини на који могу да се издвоје корисне информације из сигнала у виду обележја после примене сваке од описаних трансформација. Методе као што су *Wavelet* анализа, Хилберт-Хуанг и Вигнер-Вил трансформације су споменуте приликом описа дводимензионалних техника анализе звука и оне су јавно често коришћене у предиктивном одржавању. Кепстрална анализа, са друге стране, као метода анализе у фреквенцијском домену, нема велику примену у индустрији; међутим, изузетно је коришћена приликом обраде и препознавања говора, тако да је и њен кратки опис дат у оквиру овог поглавља. Осим начина обраде звучног сигнала дат је и кратак осврт на историјат коришћења овог типа мерења у индустрији, а описан је и конкретан начин аквизиције звучног сигнала у термоелектрани Костолац А1 у околини вентилаторског млина. Ова студија случаја биће коришћена за тестирање свих даљих алгоритама који су предложени у овој тези.

Треће поглавље је посвећено алгоритмима који се тичу детекције контаминација у циљу робустификације метода естимације стања на бази сигнала звука. Ова област се углавном поклапа са облашћу детекције лоших података која се рапидно развијала у последњих десет година и односи се на детекцију злонамерних покушаја измене мерених података у циљу напада на инфраструктуру индустријских система. Преглед ових алгоритама је дат уз осврт на потенцијални начин њиховог коришћења у предиктивном одржавању. У овој глави су описани конкретни доприноси у виду нових алгоритама за детекцију контаминације и техника класификације нестационарног шума у циљу проширења примене алгоритама на анализу сценарија у индустријским окружењима. Посебно су приказане QQ криве као главни алат који се користи у овом поглављу. Дат је опис новог алгоритма за детекцију шума, као и опис алгоритама за класификацију контаминације Нојман-Пирсон тестом и методом носећих вектора. Осим описа ова три алгоритма која су развијена у оквиру докторске тезе, приказани су и њихови резултати на примеру вентилаторских млинова у термоелектранама, уз могућност проширења на било који актуатор који производи циклостационарне вибрације. Сигнали на којима су алгоритми тестирани делимично садрже реалне контаминације снимљене у самој термоелектрани, а делом вештачки додате контаминације, како би предложени алгоритми могли бити тестирани за различите вредности односа сигнал-шум.

Финални доприноси ове тезе у виду нових алгоритама за детекцију стања ротационих актуатора коришћењем акустичког сигнала предложени су у четвртном поглављу. Прво су

описане технике за претпроцесирање сигнала и издвајање обележја које су примењене на реалним сигнаlima млинова из термоелектране, али могу се користити за било који тип ротационог актуатора који има циклостационарни режим рада. Три методе естимације стања су даље приказане. Једна се базира на пробабилистичкој методи Бајесових мрежа. Овај приступ је адаптиван на промене и усложњавање самог система који се испитује; међутим, због компликоване имплементације овакве врсте праћења стања, овај алгоритам, иако је тестиран на реалним сигнаlima, није препоручљив за практичну имплементацију. Из тог разлога предложена су још два алгоритма која, користећи стандардне технике препознавања облика (редукцију димензија и кластеризацију) успевају, на рачунски једноставан начин, да процене стања ротационих актуатора. За финалну детекцију стања предложене су метрике које осликавају ниво истрошености елемената ротационих актуатора и, у складу са тим, омогућавају континуално праћење стања машине. Снимци који су коришћени за тестирање ових алгоритама су сакупљани у термоелектрани, периодично, у трајању од неколико месеци, како би се обезбедила довољно богата база података.

Последње, пето поглавље представља закључак где је још једном наглашено шта је све обухватило истраживање у оквиру ове тезе. Посебно су истакнути остварени научни доприноси, наведени добијени научни резултати, указано је на могућност практичне имплементације, као и могуће правце у даљем истраживању.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Данас се у индустрији све већи акценат ставља на развијање економичних поступака одржавања машина и благовремене детекције отказа. Ово није толико изненађујуће ако се узме у обзир процена да је чак једна трећина трошкова одржавања просечног индустријског постројења последица сувишног или неефикасног одржавања. Модерне технике предиктивног одржавања су се развиле управо са циљем продужења животног века машина, благовремене детекције истрошености компоненти и, самим тим, уштеде финансијских ресурса. Ове методе се заснивају на аквизицији одговарајућих сигнала (мерење вибрације, термографских снимака и сл.), њиховој обради и анализи и, на крају, доношењу одлуке о стању машине и процени неопходности ремонта.

Ротациони актуатори су најзаступљеније врсте машина у индустрији. Стога је детекција стања у коме се налазе и индикација одговарајућег тренутка за ремонт од суштинског значаја. У прилог томе говори чињеница да је велики број радова у савременој литератури посвећен управо детекцији отказа и процени истрошености ротирајућих елемената. До сада је тај проблем најчешће решаван визуелном инспекцијом. Алтернативно, алгоритми за детекцију који јесу развијани у литератури за примену у индустрији готово искључиво користе сигнале вибрације у сврху дијагностике. Такође, они обављају дискретну детекцију у две или више класа и креирани су само за специфичне типове ротационих актуатора. Акустички сигнали, иако је показано да носе одговарајуће информације о стању машине, и даље нису наишли на практичну примену у индустрији због њихове велике подложности околном шуму. Оригиналност ове докторске дисертације се огледа у томе што су предложене методе које обезбеђују примену акустичких сигнала у реалном окружењу, лако се могу генерализовати на широки спектар ротационих актуатора и врше континуалну детекцију нивоа истрошености радних кола.

Коришћење акустичких сигнала у реалном индустријском окружењу се обезбеђује иновативним алгоритмима за детекцију контаминација који користе статистичке методе (првенствено QQ криву) за процену девијације снимљеног сигнала од очекиваног понашања. Алгоритми предложени за те сврхе се базирају на истраживању из области детекције лоших података која се бави детекцијом лоших мерења и малициозних напада на сензорске системе. Ова област је доживела рапидни пораст са увођењем умрежених елемената у индустријске системе са којима је порасла и опасност од мрежних напада на постројења. Иновативност алгоритама за детекцију контаминације развијаних у оквиру ове тезе је у начину на који се детектује одступање зашумљених сигнала од очекиваног понашања. За разлику од већине других алгоритама који захтевају егзактан модел сигнала, овде је неопходно само проценити његово статистичко понашање. Адаптивност алгоритама на промене у номиналном режиму и применљивост ових техника у сврхе робустификације метода за детекцију стања коришћењем сигнала звука додатно сведочи о оригиналном приступу решавању проблема детекције зашумљених мерења.

Сама естимација истрошености елемената у ротационим актуаторима је проблематика изучавана задњих неколико деценија. Међутим, и даље се на годишњем нивоу објављује по неколико стотина радова на ову тему. Оно што издваја методе предложене у оквиру ове дисертације од оних које се могу наћи у литератури је у томе што их је могуће применити на велики број различитих врста ротационих актуатора. Ово је обезбеђено издвајањем обележја који су карактеристични за све циклостационарне сигнале, а звучни сигнал снимљен у околини ротационог актуатора је најчешће такав. Такође, овде се врши континуална процена истрошености елемената машине, а не дискретна класификација, као што је то најчешће случај. Најзад, алгоритми предложени у оквиру ове тезе су рачунски изузетно једноставни за имплементацију, тако да их је могуће реализовати на јефтином микроконтролерском уређају.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У оквиру докторске дисертације наведено је 119 библиографских јединица из области предиктивног одржавања, коришћења сигнала вибрације и звука код ротационих актуатора, детекције лоших података, издвајања обележја и естимације стања машина. Списак литературе коју је кандидат навео указује да је детаљно анализирана постојећа литература и да су наведене све значајне референце из реномираних часописа, зборника, монографија и уџбеника.

Пошло се од стандардних наслова, добро утемељених у литератури, који указују на значај предиктивног одржавања и благовремене детекције квара и истрошености машина [1-2]. Затим су описани новији радови који се тичу специфичне тематике детекције стања ротационих актуатора [3-4]. Посебан осврт је дат на коришћење сигнала вибрације у те сврхе који су прво споменути у [5], затим дефинитивно утемељени као стандард у [6], и имплементирани у новијој литератури [7]. Коришћење акустичких сигнала у циљу детекције отказа ротационих актуатора је уведено радовима који су обавили компаративну анализу са сигнаlima вибрације [8-9]. Такође, споменути су и радови који су иницирали истраживање о утицају истрошености елемената на звучни сигнал [10], као и они који користе модерне технике за имплементирање ових алгоритама [11].

Алгоритми за детекцију лоших података се муњевито развијају у задњих неколико година, тако да су наведени радови који најактуелније показују тренутно стање у овој области [12-13]. Због природе алгоритама који су предложени у овој дисертацији, споменут је и рад који уводи графички статистички алат познат као QQ крива [14]. Такође, споменут је и начин на који се у литератури најчешће врши класификација аудио садржаја [15] и који је, у модификованој форми, служио за класификацију различите врсте контаминација у оквиру

ове тезе. Проблематика издвајања обележја је изузетно важна за генерализацију предложених алгоритама, па је морала бити детаљно анализирана у оквиру дисертације, почевши од радова [16-17]. Из области статистичког препознавања облика, редукције димензија и класификације коришћени су уџбеници [18-19], док је алгоритам кластеризације који је коришћен настао нешто скорије и анализиран је помоћу изворног рада на ту тему [20].

- [1] R. K. Mobley, *An introduction to predictive maintenance*, Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2002.
- [2] G. Vachtsevanos, F. Lewis, M. Roemer, A. Hess, B. Wu, “*Intelligent fault diagnosis and prognosis for engineering systems*,” Hoboken, NJ, USA: Wiley. 2006.
- [3] Y. Lei, J. Lin, Z. He, and M. J. Zuo, “A review on empirical mode decomposition in fault diagnosis of rotating machinery,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 35, no. 1, pp. 108 – 126, 2013.
- [4] A. Heng, S. Zhang, A. C. Tan, and J. Mathew, “Rotating machinery prognostics: State of the art, challenges and opportunities,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 23, no. 3, pp. 724 – 739, 2009.
- [5] C. S. Sunnersjö, “Varying compliance vibrations of rolling bearings,” *Journal of sound and vibration*, vol. 58, no. 3, pp. 363 – 373, 1978.
- [6] W. J. Wang and P. D. McFadden, “Early detection of gear failure by vibration analysis—i. calculation of the time-frequency distribution,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 7, no. 3, pp. 193 – 203, 1993.
- [7] C. Scheffer and P. Girdhar, *Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance*, 2nd ed. Oxford, UK: Elsevier, 2004.
- [8] N. Tandon and A. Choudhury, “A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings,” *Tribology International*, vol. 32, no. 8, pp. 469 – 480, 1999.
- [9] N. Baydar, A. Ball, A comparative study of acoustic and vibration signals in detection of gear failures using Wigner-Ville distribution, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 15, No. 6, pp. 1091-1107, 2001.
- [10] E. Weller, H. M. Schrier, and B. Weichbrodt, “What sound can be expected from a worn tool?” *Journal of Engineering for Industry*, vol. 91, no. 3, pp. 525 – 534, 1969.
- [11] D. Baccar and D. Soffker, “Wear detection by means of wavelet-based acoustic emission analysis,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 60, pp. 198 – 207, 2015.
- [12] R. Madani, J. Lavaei, R. Baldick, and A. Atamturk, “Power system state estimation and bad data detection by means of conic relaxation,” in *Proceedings of the 50th Hawaii International Conference on System Sciences*, 2017, pp. 3102 – 3111.
- [13] K. G. Boroojeni, M. H. Amini, and S. S. Iyengar, “Bad data detection,” in *Smart Grids: Security and Privacy Issues*. Springer International Publishing, Cham, 2017, pp. 53 – 68.
- [14] J. J. Filliben, “The probability plot correlation coefficient test for normality,” *Technometrics*, vol. 17, no. 1, pp. 111 – 117, 1975.
- [15] G. Guo and S. Z. Li, “Content-based audio classification and retrieval by support vector machines,” *IEEE transactions on Neural Networks*, vol. 14, no. 1, pp. 209 – 215, 2003.
- [16] H. Liu and L. Yu, “Toward integrating feature selection algorithms for classification and clustering,” *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 17, no. 4, pp. 491 – 502, April 2005.

- [17] L. Lu, J. Yan, and C. W. de Silva, "Dominant feature selection for the fault diagnosis of rotary machines using modified genetic algorithm and empirical mode decomposition," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 344, no. 0, pp. 464 – 483, 2015.
- [18] K. Fukunaga, *Introduction to statistical pattern recognition*, San Diego, CA, USA: Academic Press Professional Inc., 1990.
- [19] S. Theodoridis and K. Koutroumbas, *Pattern Recognition*, 4th ed. Academic Press, 2008.
- [20] S. L. Chiu, "Fuzzy model identification based on cluster estimation," *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 2, no. 3, pp. 267 – 278, 1994.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Истраживање у оквиру ове дисертације представља комбинацију различитих експерименталних и теоријских метода које су реализоване помоћу неколико корака:

- Преглед литературе из области детекције стања ротационих актуатора са посебним освртом на коришћење звучних сигнала у индустријском окружењу, обраде и анализе циклостационарних сигнала и детекције лоших података. После анализе великог броја предложених метода, имајући у виду особине звучних сигнала ротационих машина, као и њихову подложност шуму, изабран је приступ заснован на подацима који користи статистичке параметре сигнала за детекцију контаминације и метрике у виду статистичких или еуклидских дистанци за детекцију стања. У реализацији прегледа литературе коришћене су познате научне методе анализе и генерализације.
- Спровођење великог броја експеримената који би обухватили рад система у различитим условима (различита стања ротационих машина, ситуације када има и када нема контаминације, присуство различитих контаминација и различитог положаја акустичког сензора). Сви експерименти су вршени на реалном систему у термоелектрани Костолац А1 у околини вентилаторског млина за млевење угља док је он у функцији. Снимање се вршило периодично у трајању од неколико месеци, како би се обезбедила богата база снимака млинова у свим стадијумима истрошености радног кола. Приликом спровођења ових експеримената коришћене су научне методе анализе и генерализације.
- Детаљна анализа снимљених података обавила се са циљем детекције релевантних обележја код естимације стања и информативних статистичких параметара при детекцији контаминације. Приликом детекције релевантних обележја водило се рачуна о томе да она буду универзална за широку фамилију ротационих актуатора, како би се омогућила једноставна генерализација алгорита. С тим у виду, предложени су параметри у временском домену који указују на стандардно понашање сигнала, а у фреквенцијском домену амплитуде на учестаностима које примарно указују на ротациони аспект машина. У случају детекције контаминације, усвојено је посматрање статистичког момента првог и другог реда, како би се добио рачунски једноставан алгоритам који је способан да робустификује даљу естимацију стања. У реализацији ових корака примењене су научне методе анализе, апстракције и генерализације.
- Развијање, обучавање и тестирање алгорита који у номиналним условима (када нема контаминације) успева да детектује стање ротационог актуатора применом техника за препознавање облика (класификација на бази матрица расејања или суптрактивна кластеризација). И овде је један од примарних захтева био рачунски једноставан алгоритам, тако да су предложене две континуалне метрике за два различита приступа

у детекцији стања. У случају коришћења редукције димензије на бази матрице расејања користи се метрика у виду статистичке дистанце мерених података од обучавајућег скупа здравих радних кола у дводимензионалном простору. У случају примене суптрактивне кластеризације, статистичка дистанца је мање информативна, тако да се користи однос еуклидских дистанци као довољно егзактна метрика. За спровођење ових корака коришћене су научне методе синтезе, конкретизације и спецификације.

- Развијање, обучавање и тестирање алгорита који из дугачке секвенце акустичког снимка, статистичком анализом, успева да детектује и класификује тип контаминације. У циљу детекције контаминације користи се метод који не захтева познавање математичког модела сигнала, већ естимира статистичке параметре у номиналном режиму и, користећи QQ криву, детектује одступање од очекиваног понашања. С обзиром да се очекује функционисање алгорита у јако дугом временском периоду, он је реализован тако да буде адаптиван, односно тако да се прилагођава променама номиналног режима. Такође, предложена је и могућност класификације контаминације коришћењем методе потпорних вектора. За спровођење ових корака коришћене су научне методе синтезе, конкретизације и спецификације.
- Комбиновање методе детекције контаминације и естимације стања у једну целину која, у делу предобrade, од дугачке секвенце акустичног снимка прави више краћих секвенци у којима се не налази контаминација, а у делу детекције естимира стање машине користећи обележја издвојена из ових краћих секвенци. Приликом овог спајања две методе обезбедила се робустификација алгоритама за детекцију стања, и тиме је отворен простор за коришћење акустичких сигнала у реалним индустријским окружењима. Реализација ове здружене методе обухватала је научне методе синтезе, анализе и апстракције.
- Предлагање начина генерализације добијеног алгорита на широк спектар ротационих актуатора и његове имплементације на једноставан микроконтролерски уређај. Кључну улогу у овој генерализацији има начин издвајања обележја који је применљив на све машине које имају циклостационарно понашање у кратким временским интервалима, као и адаптивност предложених метода на промене у номиналном функционисању постројења. У реализацији ових корака примењене су научне методе синтезе, апстракције и генерализације.

3.4. Применљивост остварених резултата

Истраживања спроведена у оквиру ове дисертације показују да се коришћењем акустичких сигнала може успешно детектовати стање ротационих актуатора у реалном индустријском постројењу и да комбинација детекције контаминација коришћењем статистичких параметара и естимације стања помоћу обележја у временском и фреквенцијском домену обезбеђује реализацију једног адаптивног алгорита који је робустан на контаминацију. Томе у прилог говоре експерименти који су спроведени у околини вентилаторског млина у термоелектрани, у различитим стадијумима истрошености радних кола и са различитим интензитетом контаминација. На тај начин се омогућава коришћење акустичких сигнала за детекцију отказа или стања у различитим индустријским условима, а то повлачи са собом могућност коришћења неинвазивних, јефтиних сензора који се једноставно постављају и који могу да се анализирају у реалном времену на неком једноставном микроконтролерском уређају. Практичност оваквог једног уређаја се огледа у изузетно ниској цени и великој

применљивости због могућности прилагођења на велики број различитих проблема и његовој способности да се користи за више различитих врста ротационих актуатора.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат Сања Вујновић је кроз реализацију дисертације је у потпуности демонстрирала све релевантне способности за научно-истраживачки рад. Обављајући активности које обухватају систематични преглед актуелне литературе, самостално истраживање области детекције лоших података и статистичког препознавања облика, затим развијање иновативних метода за детекцију стања коришћењем различитих техника показала је систематичност, креативност, упорност, зрелост и могућност примене резултата из различитих научних области. Првенствено, кандидат је врло зрело предвидео и препознао актуелност, атрактивност и значај изабране теме. Проблем којим се кандидат бавио у оквиру ове дисертације је актуелан, а предложени методи употпуњују литературу кориговањем постојећих недостатака и проширивањем области примене познатих метода. Оригинални научни доприноси који су остварени у овом истраживању потврђују способност кандидата за оригиналан научно-истраживачки рад, за самостално праћење актуелне и референте научне литературе и за практичну реализацију предложених метода.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Оригинални научни доприноси који су остварени у тези су следећи:

- Прегледом постојеће литературе извршена је анализа постојећих алгоритама који се баве предиктивним одржавањем, коришћењем акустичких сигнала у индустријском окружењу, детекцијом стања ротационих актуатора и робусном предобрадом сигнала. Овакав преглед омогућио је детаљан увид у област естимације стања и детекције контаминације, као и у све проблеме везане за коришћење акустичких сигнала.
- Извршена је детаљна анализа података снимљених у околини вентилаторског млина у условима различитог нивоа истрошености радних плоча и у присуству различитих врста и интензитета контаминација. Ова анализа је обезбедила јасан увид у то која су обележја релевантна у временском и фреквенцијском домену за детекцију стања и који статистички параметри су значајни за детекцију контаминације. Овај закључак се може генерализовати не само на остале вентилаторске млинове, већ и на разне друге циклостационарне процесе.
- Предложени су нови алгоритми за предобладу акустичних сигнала у циљу робустификације естиматора стања. Ови алгоритми примењују приступ коришћен у области детекције малициозних напада на сензорске системе и модификују га за потребе детекције контаминације. Користе се статистички параметри снимака за детекцију и класификацију шума, а сам предложен алгоритам је адаптиван на промене у номиналном режиму рада и проширује могућност коришћења акустичких сигнала за примену у реалним индустријским условима.
- Предложен је нови приступ естимацији стања ударних плоча који, уместо класификације стања у неколико дискретних класа, користи континуалну метрику која осликава ниво истрошености ударних плоча млинова, односно радних кола

ротационих актуатора. Такође, реализација овог алгоритма је рачунски једноставна, тако да је омогућена његова имплементација на једноставном микроконтролерском уређају.

- Развијан је јединствен функционални алгоритам који обједињује детекцију контаминације и естимацију стања коришћењем неконтаминираних акустичких снимака и тиме елиминише главну препреку за коришћење сигнала звука у предиктивном одржавању индустријских машина.
- Коначно, дата је експериментална анализа ефикасности предложених алгоритма на расположивим подацима из термоелектране Костолац А1, уз јасан предлог генерализације предложених метода за широк спектар ротационих актуатора и предлог имплементације алгоритма на једноставном хардверском уређају, ради повећања економичности.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Сагледавањем циљева истраживања, постављених хипотеза и остварених резултата, Комисија са задовољством може да констатује да је кандидат успешно одговорио на сва битна питања и дилеме које суштински произилазе из проблематике којом се дисертација бави. Набројани научни доприноси значајни су за две стручне области: за детекцију контаминације сигнала у реалним индустријским условима и за процену стања елемената.

Алгоритам за детекцију контаминације развијен у оквиру ове дисертације употпуњује област детекције лоших података тако што спроводи статистичку анализу номиналног понашања. На тај начин се уклања потреба за познавањем егзатног модела сигнала, што је до сада било неопходно за већину сличних метода. Даље, адаптивност предложене технике за детекцију контаминације омогућава проширење примене акустичких сигнала на реалне индустријске услове, што до сада није био случај. Овом приликом омогућена је и робустификација свих алгоритама који се баве естимацијом стања, а који параметре издвајају из акустичких сигнала. Развијање метода које не само детектују већ и класификују контаминације уводи и могућност увођења процедура за амбијенталну анализу у индустријска постројења.

У области детекције истрошености елемената ротационих актуатора, методе предложене у оквиру ове дисертације омогућавају континуално праћење стања, за разлику од дискретних подела присутних у литератури. Приликом анализе релевантних обележја сигнала у циљу естимације стања, предложене су методе које се једноставно могу генерализовати на све циклостационарне процесе, па самим тим и на широку фамилију ротационих актуатора. Такође, рачунска једноставност ових алгоритама их чини једноставним за практичну имплементацију на микроконтролерском уређају, па су самим тим и резултати истраживања практичног карактера и могу да резултују конкретним комерцијалним производом који је применљив за широк спектар индустријских делатности.

4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси верификовани су следећим радовима:

Kategorija M21:

1. **S. Vujnović**, Ž. Đurović, G. Kvašćev, Fan mill state estimation based on acoustic signature analysis, *Control Engineering Practice*, Vol. 57, pp. 29-38, 2016, (**IF=2.602**), (ISSN: 0967-0661) (DOI: 10.1016/j.conengprac.2016.08.013)

Kategorija M33:

1. **S. Vujnović**, G. Kvašćev, B. Kovačević, L. Cokić, Acoustic Noise Detection and Classification Based on Support Vector Machines, *Proceedings of 4th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering (IcETRAN 2017)*, pp. AUI2.4.1-5, Kladovo, Serbia, 2017, (ISBN 978-86-7466-692-0)
2. **S. Vujnović**, A. Al-Hasaeri, P. Tadić, G. Kvašćev, Acoustic noise detection for state estimation, *Proceedings of 3rd International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2016)*, pp. AUI4.6.1-5, Zlatibor, Serbia, 2016, (ISBN 978-86-7466-618-0) *Best Section Paper Award*

Kategorija M51:

1. **S. Vujnović**, A. Marjanović, Ž. Đurović, P. Tadić, G. Kvašćev, Toward acoustic noise type detection based on QQ plot statistics, *Facta Universitatis - Series: Electronics and Energetics*, Vol. 30, No. 4, pp. 571-584, 2017, (ISSN: 0353-3670) (DOI: 10.2298/FUEE1704571V)

Kategorija M53:

2. **S. Vujnović**, P. Todorov, Ž. Đurović, A. Marjanović, The use of Bayesian Networks in Detecting the States of Ventilation Mills in Power Plants, *Electronics*, Vol. 18, No. 1, pp. 16-22, 2014, (ISSN: 1450-5843) (DOI: 10.7251/ELS1418016V)
3. E. Kisić, V. Petrović, **S. Vujnović**, Ž. Đurović, M. Ivezić, Analysis of the condition of coal grinding mills in thermal power plants based on the T2 multivariate control chart applied on acoustic measurements, *Facta Universitatis - Series: Automatic Control and Robotics*, Vol. 11, No. 2, pp. 141-151, 2012, (ISSN: 1820-6417) (UDC: 621.311.22)

Kategorija M63:

1. **S. Vujnović**, P. Todorov, B. Kovačević, Korišćenje Bajesovih mreža za detekciju stanja mlinova u termoelektranama, *Zbornik Radova 57. Konferencije ETRAN*, pp. AU2.3.1-5, Zlatibor, Srbija, 2013, (ISBN 978-86-80509-68-6)
2. **S. Vujnović**, V. Papić, P. Todorov, Ispitivanje stanja mlinova u termoelektranama na osnovu akustičkih merenja, *Zbornik Radova 56. Konferencije ETRAN*, pp. AU3.3.1-4, Zlatibor, Srbija, 2012, (ISBN 978-86-80509-67-9)

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

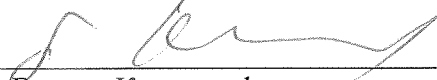
На основу свега изложеног, Комисија сматра да дисертација кандидата Сање Вујновић испуњава све законске, формалне и суштинске услове, као и све критеријуме који се уобичајено примењују приликом вредновања докторске дисертације. Узимајући у обзир све наведене научне доприносе, предложене иновативне технике за детекцију контаминације акустичких сигнала и естимацију стања ротационих актуатора, примењивост добијених оригиналних резултата на реалне индустријске системе, показану зрелост кандидата и његову способност за самосталан научно-истраживачки рад, Комисија сматра да докторска дисертација Сање Вујновић садржи оригиналне научне доприносе који имају доказану практичну применљивост у области аутоматике. Према томе, Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под називом „Детекција стања ротационих актуатора заснована на анализи акустичких сигнала“ кандидата Сање Вујновић, прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду,
дана 26.10.2017.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Жељко Ђурђевић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



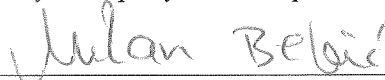
др Бранко Ковачевић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



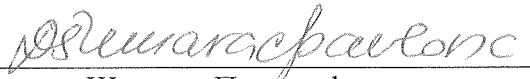
др Зоран Перић, редовни професор
Универзитет у Нишу – Електронски факултет



др Горан Квашчев, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Милан Бебић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Драгана ШумарацПавловић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет