

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Емилије Кисић**.

Одлуком бр. 5038/09-3 од 29.03.2016. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Емилије Кисић** под насловом

„Примена T^2 контролних дијаграма и скривених Марковљевих модела на предиктивно одржавање техничких система“

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

На јесен 2009. године Емилија Кисић уписала је докторске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на студијском модулу 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.

Кандидат Емилија Кисић је у току школске 2013/2014. године користила статус мировања.

Под менторством др Жељка Ђуровића, редовног професора, кандидаткиња је започела истраживачки рад у вези са предиктивним одржавањем система, детекцијом отказа и статистичком обрадом сигнала. Тему докторске дисертације под насловом „Примена T^2 контролних дијаграма и скривених Марковљевих модела на предиктивно одржавање техничких система“ Емилија Кисић пријавила је 2.7.2015.

Комисија за студије трећег степена је 6.7.2015. године разматрала предлог теме за израду докторске дисертације и упутила је Наставно – научно већу на усвајање предлог за именовање Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације.

У складу са Законом о високом образовању, односно Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета у Београду, Наставно-научно веће је одлуком од 15.9.2015. године (број одлуке: 5038/09-2), на предлог Комисије за студије трећег степена, именovalo Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације кандидата Емилије Кисић у саставу:

1. др. Бранко Ковачевић, редовни професор, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет,
2. др. Драган Денић, редовни професор, Универзитет у Нишу, Електронски факултет,
3. др. Слободан Вукосавић, редовни професор, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет,
4. др. Горан Квашчев, доцент, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет.

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

Дана 16.09.2015.године Емилија Кисић је полагала испит о подобности теме и кандидата (докторски испит). Одбрана је почела у 13:00, а завршена је у 15:00уз присуство свих чланова Комисије. Члан Комисије проф. др Драган Денић био је присутан путем видео-конференцијске везе. Одбрана је укључила презентацију предмета, циљ и значај предложене теме, уз навођење полазних хипотеза, коришћених научних метода и очекиваних доприноса. Након презентације уследила су питања чланова Комисије на која је кандидаткиња успешно одговорила. Оцена Комисије је да је кандидаткиња Емилија Кисић “задовољила“ на том испиту.

Наставно-научно веће је на седници одржаној 20.10.2015. године усвојило Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације кандидата Емилије Кисић.

Веће научних области техничких наука је 23.11.2015. дало сагласност на предлог теме докторске дисертације Емилије Кисић под насловом „Примена T^2 контролних дијаграма и скривених Марковљевих модела на предиктивно одржавање техничких система“.

Емилија Кисић је 07.03.2016. предала на преглед и оцену докторску дисертацију под насловом „Примена T^2 контролних дијаграма и скривених Марковљевих модела на предиктивно одржавање техничких система“. Комисија за студије трећег степена потврдила је 15.03.2016. испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета за именовање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације. У складу са Законом о високом образовању, односно Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета у Београду, Наставно-научно веће Факултета је на својој седници одржаној 22.03.2016. на предлог Комисије за студије трећег степена, донело одлуку (датум одлуке: 29.03.2016.; број одлуке: 5038/09-3)о именовањуКомисије за преглед и оцену урађене докторске дисертације у саставу:

1. др Жељко Ђуровић, редовни професор, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет,
2. др Бранко Ковачевић, редовни професор, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет,
3. др Драган Денић, редовни професор, Универзитет у Нишу, Електронски факултет,
4. др Горан Квашчев, доцент, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет,
5. др Предраг Тадић, доцент, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет.

1.2. Научна област дисертације

Научна област дисертације под насловом „Примена T^2 контролних дијаграма и скривених Марковљевих модела на предиктивно одржавање техничких система“ кандидаткиње Емилије Кисић је Електротехника и рачунарство, а ужа научна област је Управљање системима и обрада сигнала. За наведене области матичан је Електротехнички факултет Универзитета у Београду.

Дисертација је урађена под менторством др Жељка Ђуровића, редовног професора Електротехничког факултета у Београду. Ментор има научне резултате из уже научне области која је предмет дисертације кандидата. Поред тога, ментор предаје више предмета на 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

Емилија Кисић је рођена 15. априла 1984. године у Београду. Основну школу и Гимназију је завршила у Београду, 1998. и 2002, респективно.

Основне студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду је завршила 2007. године, на одсеку Сигнали и системи, са просеком 8,17. Дипломирала је код проф. др Жељка Ђуровића са оценом 10, са темом „Препознавање вокала применом формантне анализе и неуралних мрежа“.

Мастер студије на Електротехничком факултету, Универзитета у Београду је завршила 2009. године, на одсеку Сигнали и системи, са просеком 10,00. Мастер рад одбранила је код проф. др

Жељка Ђуровића са оценом 10, са темом „Систем за препознавање говора из ограниченог речника применом неуралних мрежа“.

Уписала је докторске студије 2009. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, студијски модул Управљање системима и обрада сигнала. Положила је све испите на докторским студијама са просечном оценом 10,00.

Током студирања похађала је курс „*International 2013 EECI Graduate School on Control-Control of Nonlinear Delay Systems and PDEs*“, и одржала је предавање под називом „*Predictive maintenance based on control charts diagrams: case study of coal mills*“ у оквиру једнодневне радионице „*RObust Decentralised Estimation fOr large-scale systems (RODEO), Work-in-Progress Meeting, Computer Center of the School of Electrical Engineering*“ у Београду, 2014.

У Високој школи електротехнике и рачунарства струковних студијау Београду је почела да ради септембра 2009. године као хонорарни сарадник, док је од 2012. примљена у радни однос са пуним радним временом у звању асистента. Ангажована је на студијском програму Аутоматика и системи управљања возилима на предметима Аутоматско управљање 1, Аутоматско управљање 2, Дигитални системи управљања, Основи информатике и рачунарства, Електротехнички материјали и компоненте. У оквиру наставе ангажована је на рачунским вежбама и лабораторијским вежбама. Учествовала је на унапређењу постојећих вежби, увођењем у наставу нових хардверских и софтверских материјала. У оквиру наставног процеса стекла је и наставне референце у виду коауторства на приручницима за лабораторијске вежбе и публикованих радова из области Статистичке обраде сигнала, Предиктивног одржавања и Детекције отказа.

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 150 страна куцаног текста латиничним писмом и садржи 30 слика, 2 табеле и 178 библиографских јединица. 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, страницу са посветом, садржај, седам поглавља, списак коришћене литературе, биографију аутора, изјаву о ауторству, изјаву о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и изјаву о коришћењу. Поглавља дисертације су следећа: 1. Увод, 2. Предиктивно одржавање, 3. Контролни дијаграми, 4. Скривени Марковљеви модели, 5. Опис нове технике предиктивног одржавања, 6. Резултати и 7. Закључак.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном поглављу приказан је значај области предиктивног одржавања у данашњој индустрији. Објашњено је зашто је предиктивно одржавање боље од планираног одржавања, у смислу исплативости, одрживости и могућих материјалних уштеда. Дат је историјат области и неколико примера катастрофалних отказа који су се јавили као последица недостатка предиктивног одржавања. Дат је опис предложене иновативне технике предиктивног одржавања на конкретном проблему одржавања у термоелектрани. Дате су научне претпоставке на којима се ово истраживање заснива и указано је у чему се огледа иновативност предложене методе представљене у овој тези која представља компромис између већ понуђених решења која се могу пронаћи у литератури.

У другом поглављу детаљно је описан развој области Предиктивног одржавања. Објашњена су три основна корака предиктивног одржавања, и наведен је велики број примера из литературе где су коришћени различити приступи и алати у сваком од ових корака. Посебан осврт дат је на трећи корак, односно на прогнозу отказа која је у овој тези коришћена у доношењу одлуке код предиктивног одржавања. Објашњена су три различита прогностичка приступа, а највише пажње

посвећено је предикцији заснованој на подацима надгледања стања. Извршен је преглед постојећих решења у литератури, и наглашене су предности и мане сваког од ових приступа. Посебна пажња посвећена је техници покретних података (eng. *data-driven*), пошто је она коришћена у овој тези. Посебно поглавље посвећено је сензорима у предиктивном одржавању, пошто сензори и стратегије њиховог постављања, одржавања и правилног избора чине основну базу у сваком систему предиктивног одржавања. Дат је кратак опис сензора који се најчешће користе и анализирани су различити приступи за њихово оптимално постављање. На крају поглавља дата су ограничења и могућности за побољшање постојећих метода предиктивног одржавања, са великим бројем примера из литературе.

Треће поглавље посвећено је контролним дијаграмима. На почетку поглавља дат је осврт на развој области статистичке контроле процеса. Затим је, са посебном пажњом, уведена основна статистика која се примењује у теорији контролних дијаграма. Дат је опис опште теорије контролних дијаграма, а последње поглавље посвећено је T^2 контролним дијаграмима. Постепено је развијена форма Hotelling-ове T^2 статистике од увођења појма статистичке дистанце, преко претпоставки које се уводе о „нормалности“, а све кроз велики број једначина и илустрација. Дата су детаљна објашњења у вези са својствима расподеле T^2 статистике. Приказани су и алтернативни естиматори коваријационе матрице, са примерима из литературе. Дат је и осврт на примену $Q-Q$ дијаграма (eng. *quantile-quantile plot*) у процени узорачке расподеле T^2 статистике. На крају поглавља детаљно је описано како се развијају контролне границе у фази I и у фази II контроле процеса, и поменуте су процедуре које не зависе од расподеле.

Четврто поглавље посвећено је скривеним Марковљевим моделима. На почетку поглавља описан је историјски развој ових модела од првобитне примене у обради и препознавању говора, па до примене у различитим областима, све до данас. Најпре су описани дискретни Марковљеви процеси, а затим је извршена екстензија ка скривеним Марковљевим моделима. Детаљно је приказана општа структура скривеног Марковљевог модела, а затим су дефинисана три проблема која се јављају приликом њихове имплементације. На крају поглавља дат је детаљан приказ решења за ова три проблема.

Поглавље пет је посвећено опису нове технике предиктивног одржавања која је предложена у овој тези. На почетку поглавља дат је детаљан опис подсистема за млевење угља у термоелектрани. Објашњен је проблем који се јавља планираним одржавањем ударних плоча млина, односно како се ударне плоче млина временом троше и да их је потребно мењати након одређеног броја радних сати. У зависности од квалитета угља и самих плоча ова замена је некада потребна раније или касније. Због тога, долази до великих материјалних губитака када замена није била потребна, јер да би се иста обавила потребно је зауставити цео подсистем за млевење угља. Након описа проблема, приказани су детаљно сви кораци предложене иновативне методе предиктивног одржавања. Описано је како су снимљени акустички сигнали док је подсистем за млевење угља у функцији, а затим како су издвојени корисни параметри у временско-фреквенцијском домену помоћу спектрограма (eng. *spectrogram*). Највише пажње посвећено је трећем кораку, односно доношењу одлуке у одржавању. Објашњено је да је за технику прогнозе отказа изабран приступ заснован на покретним подацима, због доступности података надгледања стања. Дат је опис примене контролних дијаграма на издвојене параметре у фреквенцијском домену, а затим је показано како су одбирци са контролних дијаграма кодирани да буду улазне опсервације за скривени Марковљев модел. На крају поглавља приказан је предложени алгоритам за предиктивно одржавање како би се јасно дефинисао редослед свих операција. Овај алгоритам представља централни део докторске тезе, пошто је помоћу њега у потпуности описана иновативна техника предиктивног одржавања.

Шесто поглавље представља експерименталне резултате добијене применом предложеног алгоритма. Најпре је показано да се примена контролних дијаграма на издвојене параметре из фреквенцијског домена показала као јако ефикасна. Како су се ударне плоче млина трошиле, све више тачака се налазило изнад горње контролне границе. Такође, да би се оправдала примена хи-квадрат контроле границе приказан је $Q-Q$ дијаграм који потврђује да је граница правилно изабрана. Дата је табела са тачним бројем тачака које су изнад горње контролне границе, за све

снимљене акустичке сигнале. Након тога приказане су естимирани функције густине вероватноће за акустичке сигнале снимљене две, пет и осам недеља након замене млина где се веома јасно види да се T^2 статистика мења како се стање ударних плоча млина мења. На крају је објашњена изабрана структура скривеног Марковљевог модела и дата је секвенца опсервација скривеног Марковљевог модела на основу које се види да у моменту када су се ударне плоче млина потрошиле, да скривени Марковљев модел улази у „треће стање“, односно стање које представља потрошеност ударних плоча млина које је потребно заменити. Анализом добијених резултата показано је да је предложена иновативна техника за предиктивно одржавање ефикасна, односно да се применом ове технике добија информација о стању ударних плоча млина.

Последње, седмо поглавље, представља закључак где је још једном наглашено шта је све обухватило истраживање у оквиру ове тезе. Посебно су истакнути остварени научни доприноси, добијени оригинални научни резултати, као и могући правци у даљем истраживању.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

У данашњој индустрији, где је са развојем напредних технологија готово све аутоматизовано, технички системи су све комплекснији, а самим тим велики је изазов одржавати их правилно. Предиктивно одржавање има кључну улогу како би се обезбедила стабилност и поузданост техничких система, како би се редуковали непотребни материјални трошкови и како би се смањио број катастрофалних отказа који често за последицу имају угрожавање животне средине и безбедности људи.

О савремености ове области сведоче заиста многобројни радови, техничка решења и књиге, чији је пораст, нарочито у последњој деценији веома приметан. Такође, савременост области предиктивног одржавања најбоље одсликавају конференције које су посвећене овој теми и на које долазе научници и инжењери из целог света сваке године. Већ годинама уназад се одржава конференција: „IEEE International Conference on Prognostic and Health Management“ (последња конференција одржана је у Тексасу, 2015. године), као и „World Congress on Engineering Asset Management“ (последњи конгрес одржан је у Финској 2015. године).

У овој тези коришћено је неколико метода. За обраду података, као основни оквир из кога су формиран сетови података коришћен је спектрограм (eng. *spectrogram*), који свакако представља савремену методу која је заснована на брзој Фуријеовој трансформацији (eng. *Fast Fourier Transform*). За прогнозу отказа у оквиру доношења одлуке у одржавању, изабрана је метода која се заснива на покретним подацима (eng. *data-driven*). Због тога што се не тражи познавање модела система, већ је само потребна доступност података надгледања стања система, различите методе покретних података се већ годинама успешно користе код прогнозе отказа и свакако представљају савремену методу која је веома популарна. У оквиру приступа који је заснован на покретним подацима коришћени су скривени Марковљеви модели-СММ (eng. *Hidden Markov Model*) и контролни дијаграми (eng. *control chart*). Иако су СММ најпре нашли своју примену у обради и препознавању говора, са наглим развојем технологије, ова методологија је прихваћена у многим другим областима, укључујући и примену у детекцији отказа и предиктивном одржавању. До данас, СММ су примењени на различите проблеме који се јављају у индустријској пракси, а веома су популарни због тога што могу да испрате динамику система и нестационарне процесе и могу да дају информацију о стању у коме се систем налази. У склопу прогнозе отказа имају веома пожељну особину комбиновања података надгледања стања и података догађаја. Већ годинама уназада развија се статистичка контрола процеса (eng. *Statistical Process Control*) и у оквиру ње примена контролних дијаграма у детекцији отказа. Контролни дијаграми се веома успешно примењују у индустријској пракси, а због тога што представљају статистички алат за обраду сигнала, имају корисну особину комбиновања са другим алатима, што их свакако чини популарном и савременом методом.

Оригиналност дисертације огледа се у избору технике прогнозе отказа која је заснована на покретним подацима. По први пут до сада, колико је на основу доступне литературе познато, примењени су контролни дијаграми на издвојене параметре из фреквенцијског домена снимљених акустичких сигнала, а затим су одбирци са контролних дијаграма кодирани да буду опсервације за СММ. Предложена метода представља компромис између већ понуђених решења која се могу пронаћи у литератури и по својој структури је свакако оригинална.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У овој докторској дисертацији коришћена је обимна литература која броји 178 библиографских јединица из области предиктивног одржавања, контролних дијаграма и скривених Марковљевих модела. Пошло се од основних референци, како би се омогућила потпуна слика тематике, а затим су наведене најновије референце из реномираних часописа, зборника радова и књига.

Од велике важности била је литература која се односи на преглед до сада већ постојећих техника из области предиктивног одржавања [1-3], као и књиге у којима је област предиктивног одржавања детаљно описана [4-5]. Такође, дате су и референце са самог почетка настанка ове области [6-7]. Издвојени су новији радови из области са новим идејама и решењима, који сведоче о популарности и актуелности области предиктивног одржавања [8-14]. Такође, издвојен је рад који представља компаративну анализу између сигнала вибрације и акустичких сигнала, који је био од значаја код постављања хипотезе да акустички сигнали могу бити једнако информативни као сигнали вибрације [15].

Из области контролних дијаграма издвојене су две књиге, прва у којој су описани сви типови контролних дијаграма [16], и друга у којој су детаљно анализирани T^2 контролни дијаграми [17]. Дат је и преглед радова у којима су понуђена решења за проблеме на које се наилази приликом пројектовања контролних дијаграма [18-19].

Из области СММ-а најпре је издвојен Rabiner-ов рад који је зачетник ове области [20], а затим су приказани радови где се СММ-и користе у области предиктивног одржавања [21-23]. Такође, дат је и приказ радова где су коришћени СММ-и и контролни дијаграми заједно у области детекције отказа и предиктивног одржавања, како би се показало да у овој тези поменути алати примењени на другачији и иновативан начин [22].

- [1] A. K. S. Jardine, D. Lin, and D. Banjevic, "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, no. 7, pp. 1483–1510, 2006.
- [2] A. Heng, S. Zhang, A. 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.
- [3] A. Rosmaini and K. Shahrul, "An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application," *Journal of Computers & Industrial Engineering*, vol. 63, no. 1, pp. 135-149, 2012.
- [4] G. Vachtsevanos, F. Lewis, M. Roemer, A. Hess, and B. Wu, *Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis For Engineering Systems*, Wiley, Hoboken, NJ, 2006.
- [5] R. K. Mobley, *An Introduction to Predictive Maintenance*, Elsevier Science, USA, 2002.
- [6] I. Bazovsky, *Reliability Theory and Practice*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1961.
- [7] A. K. S. Jardine, *Maintenance, replacement and reliability*, Wiley, New York, 1973.
- [8] K. Le Son, M. Fouladirad, A. Barros, E. Levrat, and B. Iung, "Remaining useful life estimation based on stochastic deterioration models: A comparative study," *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 112, pp. 165-175, 2013.
- [9] S. Sankararaman, "Significance, interpretation, and quantification of uncertainty in prognostics and remaining useful life prediction," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 52-53, pp. 228-247, 2015.

- [10] S. Asadzadeh and A. Azadeh, "An integrated systemic model for optimization of condition based maintenance with human error," *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 124, pp. 117-131, 2014.
- [11] H. C. Pusey and M. J. Roemer, "An assessment of turbomachinery condition monitoring and failure prognosis technology," *The Shock and Vibration Digest*, vol. 31, no. 5, pp. 365-371, 1999.
- [12] D. Chelidze and J. Cusumano, "A dynamical systems approach to failure prognosis," *Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 126, no. 5, pp. 2-8, 2004.
- [13] M. Schwabacher, "A survey of data-driven prognostics," in *Proceedings of the AIAA Infotech@Aerospace Conference*, Arlington, Virginia, 2005.
- [14] L. Ma, "Condition monitoring in engineering asset management," in *Proceedings of Asia-Pacific Vibration Conference*, Sapporo, Hokkaido, Japan, 2007.
- [15] N. Baydar and 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.
- [16] D. Montgomery, *Introduction to Statistical Quality Control*, Fifth Edition, John Wiley & Sons, New York, 2005.
- [17] R. Mason and J. Young, *Multivariate Statistical Process Control with Industrial Applications*, ASA-SIAM, 2002.
- [18] J. H. Sullivan and W. H. Woodall, "A comparison of multivariate control charts for individual observations," *Journal of Quality Technology*, vol. 28, no. 4, pp. 398-408, 1996.
- [19] Y. M. Chou, R. L. Mason, and J. C. Young, "The control chart for individual observations from a multivariate non-normal distribution," *Communications in Statistics - Theory and Methods*, vol. 30, no. 8-9, pp. 1937-1949, 2001.
- [20] L. R. Rabiner, "A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition," *Proceedings of the IEEE*, vol. 77, no. 2, pp. 257-286, 1989.
- [21] H. Ertunc, K. Loparo, and H. Ocak, "Tool wear condition monitoring in drilling operations using hidden Markov models," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 41, no. 9, pp. 1363-1384, 2001.
- [22] A. Tai, W. Ching, and L. Chan, "Detection of machine failure: hidden Markov model approach," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 57, no.2, pp.608-619, 2009.
- [23] D. Tobon-Mejia, K. Medjaher, N. Zerhouni, and G. Tripot, "Hidden Markov models for failure diagnostic and prognostic," in *Prognostics and Health Management Conference*, Shenzhen, China, 2011.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Кандидаткиња је у раду успешно користила неколико метода. Најпре је извршен детаљан преглед литературе из области предиктивног одржавања, са посебним освртом на постојеће методе које се користе за прогнозу отказа. Утврђено је да сваки од предложених приступа има одређене предности и недостатке. С обзиром на доступност података надгледања стања (снимљених акустичких сигнала) изабран је приступ заснован на покретним подацима који не захтева познавање модела. Предложени алгоритам за предиктивно одржавање прати три кључна корака у предиктивном одржавању: сакупљање података, обраду података и доношење одлуке у одржавању. Сваки од ових корака заснован је на опште-прихваћеним научним методама. Први корак представља сакупљање података, односно снимање акустичких сигнала које је извршено усмереним микрофоном на дистанци од неколико милиметара док је подсистем за млевање угља у функцији. Други корак, односно обрада података извршена је издвајањем параметара из снимљених акустичких сигнала који су представљени у временско-фреквенцијском домену помоћу спектрограма који се заснива на брзој Фуријеовој трансформацији. У оквиру трећег корака, односно доношења одлуке у одржавању изабрана је метода заснована на покретним подацима, односно примењени су контролни дијаграми и СММ. T^2 контролни дијаграми примењени су на издвојене фреквенцијске компоненте из спектрограма. У циљу карактеризације опсервација које су коришћене за СММ извршена је квантизација одбирака са T^2 контролних дијаграма. Коришћена је *k-means* кластеризација помоћу које је добијен дискретан сет опсервација за СММ са одговарајућим вероватноћама појављивања. Финалну фазу у предложеном алгоритму

за предиктивно одржавање, представља формирање СММ. Помоћу научно прихваћених метода приступило се решавању проблема скривених Марковљевих модела који се јављају приликом њихове имплементације. Нова техника пројектована је у програмском пакету MATLAB и тестирана на снимљеним акустичким сигнаlima у Термоелектрани „ТЕКО“ Костолац на блоку А1. Извршена је анализа добијених резултата и донет је закључак да је предложени алгоритам ефикасан у процени процене вероватноће колико дуго ће ударне плоче млина радити до следеће инспекције, када је потребна њихова замена.

3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати које је кандидаткиња Емилија Кисић остварила и приказала у овој тези имају и научни и практичан значај.

Пре свега, предложено је практично решење проблема који се јавља планираним одржавањем подсистема за млевење угља у термоелектрани „ТЕКО“ Костолац на блоку А1. Анализом добијених резултата може се закључити да је предложена метода ефикасна у процени стања ударних плоча млина, односно да се предложена метода може реализовати у реалном времену и на тај начин би се могла побољшати енергетска ефикасност термоелектране. Добијени резултати потврђују да је предиктивно одржавање, када је успешно имплементирано, боље од планираног одржавања, што је и био један од циљева овог истраживања. Такође, добијени резултати потврђују да су акустички сигнали информативни када је у питању потребна информација о стању ударних плоча млина, што има и научни и практичан значај, с обзиром да се до сада у литератури углавном давала предност сигнаlima вибрације, у односу на акустичке сигнале. Добијени резултати могу послужити као инспирација за будућа истраживања у области предиктивног одржавања, посебно када је у питању анализа акустичких сигнала и примена контролних дијаграма и СММ у овој проблематици.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидаткиња Емилија Кисић је кроз ангажовање на систематичном прегледу актуелне литературе из области предиктивног одржавања, кроз самостално истраживање области која се бави контролним дијаграмима, кроз развијање нове методе за предиктивно одржавање комбиновањем различитих техника показала упорност, креативност, истрајност, научну зрелост и могућност примене и повезивања резултата из различитих научних области. 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, као и за предлагање и реализовањенових истраживања са научним доприносом.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Оригинални научни доприноси ове докторске дисертације су следећи:

- Извршен је исцрпан преглед литературе која се бави предиктивним одржавањем, издвојени су прегледни радови, систематизована су постојећа решења, издвојене су предности и недостаци различитих техника предиктивног одржавања у односу на друге. Сачињени преглед представља детаљан увод у област предиктивног одржавања техничких система, и као такав представља веома значајан садржај који може бити полазна тачка у сваком будућем истраживању у овој области.
- Предложена је нова техника за одржавање по стању заснована на приступу који је базиран на покретним подацима јер не тражи познавање модела, а нестационарност процеса је покривена увођењем СММ-а који дефинисањем различитих стања подразумева динамички

модел и нестационарност опсервација. Опсервације које улазе у СММ нису директно мерени подаци са објекта, већ параметризоване статистике из контролних дијаграма које су примењене на издвојене параметре из акустичких сигнала у фреквенцијском домену. Другим речима, предложени поступак издваја најбоља својства већ постојећих приступа и сједињује их у структуру која је иновативна.

- Предложена техника примењена је на конкретан проблем који се јавља планираним одржавањем ударних плоча које међу угла у једном од кључних подсистема термоелектране „ТЕКО“ Костолац, на блоку А1. Другим речима предложена техника представља практично решење проблема.
- Допринос ове тезе је експериментална анализа предложеног решења, као и преглед предности и недостатака истог. Добијени резултати потврдили су хипотезе које су постављене на почетку, односно да ће предложена комбинација контролних дијаграма и СММ-а бити ефикасна у предиктивном одржавању. Такође, добијени резултати потврдили су предност предиктивног одржавања у односу на планирано одржавање.
- Добијени резултати потврдили су да су акустички сигнали информативни када је у питању информација о стању ударних плоча млина. Потврда о информативности акустичких сигнала је важан допринос, пошто се у литератури углавном даје предност сигнаlima вибрације за чију је аквизицију потребно инсталирати скупљу и комплекснију сензорску опрему.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

У литератури се може наћи примена СММ-а и контролних дијаграма код предиктивног одржавања, али у овој тези поменути алати су примењени на другачији и иновативан начин. До сада су ови алати примењивани на различите типове сигнала, укључујући и сигнале вибрације, али колико је познато, акустички сигнали нису коришћени. У литератури се могу наћи различите технике за прогнозу отказа, и свака од њих има неке предности и недостатке. У овој дисертацији направљен је компромис између већ понуђених техника, како би се издвојила њихова најбоља својства, а иновативност предложене методе огледа се у потпуно оригиналној структури.

Предложена метода има неколико предности. Као прво, метода није инвазивна и не захтева заустављање целог подсистема за млевење угља за снимање података надгледања стања, односно акустичких сигнала који се снимају док је подсистем за млевење угља у функцији. Софтверска реализација предложеног алгоритма није много сложена и није временски захтевна када се СММ једном адекватно обучи, што је од значаја за примену оваквог начина предиктивног одржавања у реалном времену. Додатна предност предложене методе јесте што се заснива на обради акустичких сигнала који су јефтинији за снимање и једноставнији за обраду од сигнала вибрације. Иако се предложена метода предиктивног одржавања заснива на подацима надгледања стања, могло би се рећи да се на неки начин користе и подаци догађаја с обзиром да имамо информацију када су замењене ударне плоче млина, колико времена је прошло од последње замене, итд. Комбиновање података надгледања стања и података догађаја је свакако најбољи приступ у прогнози отказа, па је ово свакако још једна предност предложене методе. Такође, може се рећи да је предност предложене методе други приступ прогнози отказа, односно то је процена вероватноће колико дуго ће ударне плоче радити до следеће инспекције млина, када је потребна њихова замена (није у питању класична процена преосталог корисног живота). Овај приступ прогнози отказа свакако има велике предности, јер је за било који систем на који се примењује предиктивно одржавање од велике важности информација о процени вероватноће колико ће систем добро радити до следеће инспекције.

Предложена метода има и недостатке, а главни је тај што се акустички сигнали снимају у присуству буке која је неизбежна у термоелектрани, па присуство шума може утицати на тачност добијених резултата. Филтрација сигнала није вршена, како не би дошло до губитака важних информација. У даљим истраживањима у овој области било би сврсисходно проверити у којој мери би овакав систем требало прилагођавати особеностима неког другог енергетског

постројења. Другим речима, било би захвално проанализирати генералност и примењивост понуђеног решења на читав спектар извршних органа који захтевају периодично сервисирање хабајућих делова. Оваква анализа је временски захтевна, те стога није могла бити реализована у оквиру ове докторске дисертације.

У сваком случају добијени резултати представљају практично решење конкретног проблема који се јавља у термоелектрани, а њиховом анализом потврђене су научне хипотезе које су постављене на почетку овог истраживања, чиме су постигнути оригинални научни доприноси у области предиктивног одржавања.

4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси дисертације верификовани су следећим радовима:

Категорија М23:

1. Kisić, E., Đurović, Ž., Kovačević, B., Petrović, V.: Application of T² Control Charts and Hidden Markov Models in Condition-Based Maintenance at Thermoelectric Power Plants, *-Shock and Vibration*, vol. 2015, Article ID 960349, pp. 1-11, 2015 (IF₂₀₁₅=0.722)(DOI: 10.1155/2015/960349); M23(ISSN1875-9203)

Категорија М33:

1. Kisić, E., Matijević, D., Petrović, V.: Application of control charts on analysis of conditions for inflammation of the air-fuel mixture in the cylinders of the gasoline internal combustion engine, *Presented at 2nd IcETRAN 2015*, Silver lake, Serbia, June 8-11. pp.AUI2.2.1-6; M33 (ISBN 978-86-80509-71-6)

Категорија М50:

1. Kisić, E., Petrović, V., Jakovljević, M., Đurović, Ž.: Fault Detection in Electric Power System Based on Control Charts, *-SJEE*, vol. 10, no. 1, pp.73-90, 2013(DOI: 10.2298/SJEE1301073K); M51 (ISSN 2217-7183)
2. Kisić, E., Petrović, V., Vujnović, S., Đurović, Z., Ivezić, M.: Analysis of the condition of coal grinding mills in thermal power plants based on the T² multivariate control chart applied on acoustic measurement, *- Facta Universitatis-Series Automatic Control and Robotics*, vol. 11, no. 2, pp. 141-151, 2012; M53(ISSN 1820-6417)

Категорија М63:

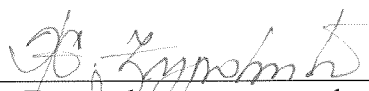
1. Драшковић, С., Ђуровић, Ж., Кисић, Е.: Applied statistics in process control and monitoring, *Зборник радова са конференције Математичке и информационе технологије – МИТ2013*. Врњачка бања, Србија, 05-09. септембар 2013. пп. 329-334; М63 (ISBN 978-86-80795-20-1 (ПМФ))
2. Кисић, Е., Петровић, В., Драшковић, С.: Примена T² мултиваријабилних контролних дијаграма и скривених Марковљевих модела на испитивање стања млинова у термоелектранама, *Електронски зборник радова 57. конференције ЕТРАН 2013*, Златибор, 3-6. јун 2013. пп. АУ 2.4.1-5; М63 (ISBN 978-86-80509-68-6)
3. Кисић, Е., Петровић, В., Јаковљевић, М.: Примена контролних дијаграма у детекцији отказа у електро-енергетским системима, *Електронски зборник радова 56. конференције ЕТРАН 2012*, Златибор, 11-14. јун 2012. пп. АУ3.1-1-4; М63 (ISBN 978-86-80509-67-9)
4. Кисић, Е., Ђуровић, Ж.: Примена контролних дијаграма у управљању и надгледању процеса, *Електронски зборник радова 55. конференције ЕТРАН 2011*, Бања Врућица, 6-9. јун, 2011. пп. АУ3.2-1-4; М63 (ISBN 978-86-80509-66-2)

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ


На основу свега изложеног, Комисија сматра да дисертација 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, предложену иновативну технику за предиктивно одржавање, примењивост добијених оригиналних резултата на реалне индустријске системе, показану зрелост кандидата и његову способност за самосталан научно-истраживачки рад, Комисија сматра да докторска дисертација кандидата Емилије Кисић 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 „Примена T^2 контролних дијаграма и скривених Марковљевих модела на предиктивно одржавање техничких система“ кандидата Емилије Кисић, прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду,
Дана 05.04.2016.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



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



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



др Драган Денић, редовни професор
Универзитет у Нишу – Електронски факултет



др Ђоран Квашчев, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Предраг Тадић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет