

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Павла Степанића за израду докторске дисертације "Детекција отказа на котрљајућим лежајевима применом анализе сигнала вибрација".

Одлуком бр. 927/1 од 11.06.2013. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Павла Степанића за израду докторске дисертације и научне заснованости теме "Детекција отказа на котрљајућим лежајевима применом анализе сигнала вибрација".

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Кандидат Павле Степанић рођен је 15.07.1978. године у Лозници, где је завршио основну и средњу школу. Дипломирао је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду 2006. године на одсеку електроника, телекомуникације и аутоматика – смер за аутоматику. Школске 2009/2010. године уписан је на докторске студије на модулу Управљање системима и обрада сигнала, под менторством проф. др Жељка Ћуровића.

Од 1. новембра 2006. године запослен је у ЈОЛА Институту на одељењу Рачунарско управљачки системи. Своје научно–истраживачке и стручне активности обавља у областима: препознавање облика, вештачка интелигенција и неуралне мреже, дигитална обрада сигнала, системи аутоматског управљања и електромоторни погони. На научном већу ЈОЛА Института од 21.06.2010. године изабран је у звање истраживач-сарадник.

Као резултат сарадње са привредом до сада је учествовао у реализацији осам пројеката индустријских процеса и система аутоматизације, што је подразумевало израду новог или адаптацију постојећег електро пројекта и остале техничке документације, израду PLC апликативних програма, SCADA и HMI система, израду управљачких хардверских система, као и система мерења, управљања, као и заштите регулисаних и нерегулисаних електромоторних погона.

Од 27. децембра 2012. године поседује лиценцу одговорног пројектанта телекомуникационих мрежа и система број 353 L863 12 издату од Инжењерске коморе Србије.

1.2. Сечено научноистраживачко искуство

У току трајања докторских студија кандидат Павле Степанић је до сада положио следеће испите предвиђене планом и програмом о докторским студијама на модулу Управљање системима и обрада сигнала:

1. Технике обраде и препознавања говорног сигнала
2. Класификација и естимација сигнала
3. Обрада слике
4. Неуралне мреже

5. Одабране методе обраде физиолошких сигнала
6. Увод у научни рад
7. Вештачка интелигенција
8. Надгледање стања електричних машина у погону
9. Праћење покретних циљева
10. Оптимални и адаптивни стохастички системи

Активно је учествовао у реализацији научно истраживачких пројеката које је финансирао Министарство за науку и технолошки развој Републике Србије:

1. 2008-2010 "Истраживање и развој 3-Д софтвера и управљачке јединице мерне машине". Евиденциони број пројекта ТР-12006.
2. 2008-2010 "Развој управљачке јединице отворене архитектуре за управљање машинама алаткама и индустријским роботима". Евиденциони број пројекта ТР-14202.
3. 2011-2014 "Развој уређаја за тренинг пилота и динамичку симулацију лета борбених авиона и то 3-осне центрифуге и 4-осног уређаја за просторну дезоријентацију пилота". Евиденциони број пројекта ТР-35023.

Између осталог, Павле Степанић је и првопотписани коаутор рада објављеног у истакнутом међународном часопису (M22, IF=1.128):

1. Stepanic P., Latinovic I.V., Djurovic Z.: *A new approach to detection of defects in rolling element bearings based on statistical pattern recognition*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 45, No. 1-2, 2009, pp. 91-100.

Према бази података "Web of Science" и "Scopus" рад је, без аутоцитата, цитиран 12 пута.

Павле Степанић је учествовао у припреми већег броја радова који су саопштени на међународним и домаћим конференцијама штампани у целини или изводу:

1. Stepanić P., Krošnjар A.: *Detekcija oštećenja kotrljajućih ležajeva primenom ID3 stabla odlučivanja*, 9. Međunarodna konferencija o dostignućima elektrotehnike, mašinstva i informatike, DEMI 2009 Zbornik Radova, Banja Luka-BIH 2009, str. 323-328.
2. Stepanić P., Đurović Ž., Krošnjар A., Pavašović A.: *Comparison of techniques for detection of failure rolling element bearings*, 10th Anniversary International Conference on Accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology, Proceedings DEMI 2011, Banja Luka-BIH 2011, pp. 93-98.
3. Stepanic P., Kvrđić V., Misic N., Dancuo Z., Lazarevic I.: *Methods of fault detection in rolling element bearings*, Proceedings of 7th BALKANTRIB'11 International Conference on Tribology, Thessaloniki-GR 2011, pp. 179-188.
4. Stepanić P., Vukotić R., Krošnjар A., Katić D., Milovanović G.: *Razvoj i realizacija sistema radio daljinskog upravljanja na električnim mostnim dizalicama*, Zbornik radova sa III Savjetovanja Crnogorskog Komiteta CIGRE, Pržno-MNE 2013, rad R-B3-02.
5. Ferenc G., Lutovac M., Kvrđić V., Stepanić P.: *A Proposed Approach to the Classification of Bearing Condition Using Wavelets and Random Forests*, Proceedings of 2nd Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Budva-MNE 2013, pp. 140-143.
6. Pavlović M., Stepanić P., Krošnjар A., Đurđević S., Mededovic S., Randelović D.: *Heart rate and R-R interval response of students - pilots on coriolis reaction and +Gz*

acceleration, 17th Congress of the Balkan Military Medical Committee, Belgrade-SRB 2012, Abstract Book: Balkan Military Medical Review, Vol. 15, No. 3, pp. 132-133.

7. Pavlović M., Stepanić P., Krošnjar A., Đurđević S., Mededovic S., Randelović D.: *Vestibular illusion training and motion sickness*, 17th Congress of the Balkan Military Medical Committee, Belgrade-SRB 2012, Abstract Book: Balkan Military Medical Review, Vol. 15, No. 3, pp. 246-247.
8. Pavlović M., Stepanić P., Krošnjar A., Đurđević S., Mededovic S., Randelović D.: *Selection of Cadets-Pilots and Heart Rate Variability in Coriolis Reaction and +Gz Acceleration*, 18th Congress of the Balkan Military Medical Committee, Istanbul-TR 2013, Abstract Book: Balkan Military Medical Review, Vol. 16, Supplement, pp. 139.
9. Stepanić P., Krošnjar A.: *Jedan pristup dijagnozi oštećenja kotrljajućih ležajeva*, Zbornik radova sa 53. konferencije ETRAN, Vrnjačka Banja 2009, rad VI1.5-1-4.

У оквиру стеченог научно-истраживачког искуства неопходно је поменути и техничка и развојна решења у којима је Павле Степанић као коаутор учествовао. У питању су битно побољшани постојећи производи или технологија (такозвана категорија резултата M84):

1. Павасовић А., Мурар Ж., Степанић П., Крошњар А., Димић З., Ракић А.: *Аутоматизација управљања радом центрифуге за физиолошку тренажу пилота*, Година реализације техничког решења 2009. Корисник: Ваздухопловно Медицински Институт, Земун.
2. Павасовић А., Мурар Ж., Степанић П., Крошњар А., Димић З., Ракић А.: *Аквизиција и приказ биомедицинских сигнала из кабине центрифуге*, Година реализације техничког решења 2009. Корисник: Ваздухопловно Медицински Институт, Земун.
3. Павасовић А., Мурар Ж., Крошњар А., Степанић П., Ракић А., Мишић Н.: *Истраживање и развој 3-Д софтвера и управљачке мерне јединице*, Резултат пројекта ТР-12006 "Истраживање и развој 3-Д софтвера и управљачке јединице мерне машине". Година реализације техничког решења 2009. Корисник: CORUN d.o.o., Ужице.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Током писања овог Извештаја, Комисија је узела у обзир све претходно наведене чињенице и резултате досадашњег рада кандидата Павла Степанића. Такође су са посебном пажњом размотрена искуства која је кандидат стекао, како кроз образовни, тако и истраживачки процес. Од посебног је значаја период од 2006. године који је кандидат провео у Институту Лола, у коме је био ангажован на различитим истраживачким и развојним пројектима. Ови су пројекти, по правилу, представљали затворену софтверско-хардверску целину који су, са становишта наручиоца, били по систему кључ у руке. Овакви пројекти су подразумевали ангажовање Павла Степанића и на реализацији хардверских компоненти, изради софтверских решења али и решавању сложених технолошких проблема и задовољавање захтева наручиоца. Овакво искуство је учинило да кандидат постане комплетан инжењер са завидним способностима и у домену анализе, пројектовања и истраживања. Узимајући у обзир све наведене компоненте које чине истраживачки профил кандидата за докторску дисертацију, Комисија је стекла увид у способности кандидата за научно-истраживачки рад, као и његове могућности, да током израде предложене докторске дисертације, оствари резултате који могу бити приказани и валоризовани од стране међународне научне заједнице. Став Комисије је позитиван и након детаљног образложења саме теме предложиће да она буде усвојена, а кандидату дата могућност да настави са израдом докторске дисертације.

2. Предмет и циљ истраживања

Праћење и предикција стања индустријских система и процеса у току рада представљају активности чији је значај последњих година све већи, с обзиром да се на њима заснива концепт одржавања система према стању. Благовремено сазнање о некој неисправности омогућава кориснику да настали проблем отклони за време редовног ремонта, чиме се избегава додатни, непланирани и често веома скупи застој услед изненадног отказа. Рана детекција отказа значи дуг временски период упозорења, а самим тим и дужи временски период за адекватне корективне акције и рационално планирање поправке система. То значи директну уштеду у новцу и времену, а истовремено омогућава повећање продуктивности целокупног процеса.

Уопштено говорећи, под отказом се подразумева престанак способности система да извршава пројектоване активности, односно да остварује пројектовану функцију. Одржавање према стању (енг. *Condition Based Maintenance* - CBM) је такав скуп радњи који коришћењем разноврсних алата (тј. метода) за праћење стања, анализира тренутно стање свих компоненти система и кроз њихово разумевање предузима одговарајуће превентивне акције [1,2]¹. Према томе, анализом тренутног стања система изводи се предикција и процена карактеристичних параметара и одређује ниво деградације. Процењено тренутно стање система и предиктивно одржавање се обавља да би пронашли поремећај у систему пре него што он постане неповратан процес. На пример, у случају да је установљен неизбалансиран ротор турбине применом метода анализе вибрација, то не мора да значи да је тај проблем неповратан и да води ка отказу система, већ можда може бити исправљен употребом супротног баланса за уравнотежење ротора. На основу свега горе наведеног може се дефинисати систем за одржавање и надзор као систем који коришћењем разних метода праћења стања одређује списак превентивних акција аутономно или у интеракцији са другим системима или људима.

Дијагноза отказа је једна од најважнијих фаза у систему одржавања према стању. Дијагностика се бави детекцијом отказа, њиховом изолацијом и идентификацијом када се деси. Котрљајући лежајеви су главне компоненте ротационих (обртних) машина. Мерењем вибрација помоћу сензора и уређаја за кондиционирање сигнала добијају се сигнали који представљају карактеристичне "потписе" лежајева и описују њихово оперативно стање. Анализа карактеристика (тј. обележја) измереног сигнала вибрација има велики утицај на класификацију стања рада машине [3]. Ако је извршена ефикасна анализа сигнала, односно издвајање обележја из сигнала за успешну дијагнозу ће бити потребан мање комплексан класификатор. Много различитих метода за детекцију отказа је развијено. Ове методе се могу сврстати у три групе: статистички приступ, примена вештачке интелигенције и технике засноване на моделу. У докторској дисертацији је извршена детекција отказа котрљајућих лежајева применом усавршене технике издвајања карактеристичних обележја и резултата из статистичког препознавања облика [4].

Ротационе машине као претварачи енергије, који електричну енергију претварају у механичку и обратно, имају веома битну улогу у широком опсегу примена, као нпр. код алатних машина у производној индустрији, различитих врста пумпи у процесној индустрији, турбина и генератора у производњи електричне енергије, итд. Котрљајући лежајеви (куглични, ваљкасти, бачвасти, игличасти лежајеви) и зупчаници су део скоро сваке обртне машине. Котрљајући лежајеви су критични елементи у машинама јер подржавају ротирајуће

¹ 1. Jardine, A.K.S., Lin, D., Banjevic, D.: *A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance*. Mechanical Systems and Signal Processing Vol. 20, 2006, pp. 1483-1510.
2. Kothamasu, R., Huang, S.H., VerDuin, W.H.: *System health monitoring and prognostics - a review of current paradigmes and practices*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 28, 2006, pp. 1012-1024.
3. Renwick, J.T., Babson, P. E.: *Vibration analysis-a proven techniques as a productions maintenance tool*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 21, No. 2, 1985, pp. 324-332.
4. Fukunaga, K.: *Introduction to Statistical Pattern Recognition*. Academic Press, London, 1990.

структуре и већина енергије за време рада се преноси преко лежајева. Откази на лежајевима воде ка другим већим и скупљим отказима на машини. Због тога, се на већини машина редовно одржавају и замењују лежајеви као рутинска ствар, како би се предупредили већи откази. Са друге стране, честа, сувишна расклапања и склапања машине могу такође узроковати отказ. Из овога се може видети значај концепције одржавања према стању, где се врши праћење и контрола одговарајућих техничких параметара стања (нпр. вибрација, звук, итд.) и интервенише се само онда ако су параметри стања изван прописаних граница [5]². На тај начин се повећава време ефективног рада целокупног система и елиминишу непотребни застоји.

Карактеристичне величине техничких параметара стања, које обично карактерише промену стања посматраног система, јесу физичке величине које се могу мерити и пренети. Сви механички системи који садрже покретне делове генеришу механичке силе за време трајања уобичајених операција и осцилације које при томе настају представљају вибрације. Вибрације на машинама се јављају при ротационом и претварању ротационог кретања у транслаторно кретање. Такође, вибрације се јављају као одзив механичког система на ударе проузроковане дефектима структуре [6,7]. Сигнали вибрација се често користе за детекцију отказа ротационих машина, с обзиром да носе информацију о динамичком стању механичких елемената машине. Ови механички сигнали садрже комбинације природних учестаности са компонентама и хармоницима у ускопојасном опсегу учестаности. Већина ових сигнала су директно повезани са обртањем ротационог система, пошто се енергија вибрација повећава када је механички елемент оштећен или похабан. Међутим, сигнали вибрација су обично зашумљени, јер поред вибрација од интереса долази до интерференције са другим изворима вибрација. Један од кључних корака у "хватању" информације о дефекту је повећање односа сигнал-шум и то је тешко урадити без примене обраде сигнала вибрација [8].

Огроман број објављених радова на тему детекције отказа лежајева су доказ њихове важности. На пример, у спроведеним истраживањима отказа електричних мотора, у 44% случајева се ради о отказу лежајева, у 26% случајева је квар статора, квар ротора 8% и остало 22% [9]. С обзиром да се откази лежајева углавном манифестују повећавањем нивоа вибрација, праћење вибрација је постало једна од основних и најчешће примењиваних метода за детекцију отказа лежајева. Међутим, коришћени метод праћења вибрација и вероватноћа детекције отказа у великој мери зависи од изабране технике обраде сигнала вибрација. У докторској дисертацији се проучава издвајање важних података из сигнала вибрација и њихово спајање у циљу постизања што тачнијег резултата детекције отказа. Поред тога, дисертација се бави пројектовањем, развојем и применом процедуре аутоматске детекције отказа котрљајућих лежајева. Експериментални резултати развијених метода детекције отказа су вршени на посебно пројектованој лабораторијској станици за испитивање котрљајућих лежајева.

3. Полазне хипотезе

Током израде докторске дисертације кренуће се од детаљне анализе постојећих теоријских и практичних решења која се могу пронаћи у оквиру доступне литературе а са циљем стварања

² 5. Tavner, P., Ran, L., Penman, J., Sedding, H.: *Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines*. The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2008.

6. Clarence W. de Silva: *Vibration and Shock Handbook*. Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, 2005.

7. Harris, C.M., Piersol, A.G.: *Harris' Shock and Vibration Handbook*. Fifth Edition, McGraw-Hill Handbooks, 2002.

8. Shin, K., Hammond, J.K.: *Fundamentals of Signal Processing for Sound and Vibration Engineers*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, 2008.

9. Tallam, R.M., Lee, S.B., Stone, G.C., Kliman, G.B., Yoo, J., Habetler, T.G., Harley R.G.: *A Survey of Methods for Detection of Stator-Related Faults in Induction Machines*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 43, No. 4, 2007, pp. 920-933.

детаљног преглед техника одржавања према стању. Предуслов за успешно испитивање система јесте компаративна анализа теоријских и емпиријских резултате у циљу постизања поузданих закључака [10]³. Као резултат овакве анализе процес предиктивног одржавања биће организован у форми три кључне фазе: прикупљање (аквизиција) података, обрада података, и коначно, доношење одлуке о стању система. Свака од наведених фаза биће разматрана са дужном пажњом.

Да би процену стања система учинили поузданом основни услов је правилно мерење физичких величина процеса. Мерење би требало најпре да буде у узајамној вези са условним стањем посматраног система. Следећа фаза је обрада прикупљених таласних облика сигнала (у овом случају сигнала вибрација) и издвајање обележја које има за циљ да изврши конвертовање посматраног сигнала у неки тип параметарске репрезентације погодне за даљу анализу. Оно што се жели постићи је да издвојена обележја буду осетљива на машинске отказе и робусна на променљиве режиме рада и шум окружења. Технике издвајања обележја су у литератури подељене на три групе [11-13]:

- временска анализа (описни статистички параметри, методе на бази филтрирања, методе на основу ауторегресивног модела, итд.),
- фреквенцијски домен (брза Фуријеова трансформација, кепстрална анализа, итд.),
- временско-фреквенцијски домен (краткотрајна Фуријеова трансформација, анализа теоријом таласића, итд.).

Издвојени скуп обележја из сигнала у ствари представља случајни вектор, док свака компонента чини случајну променљиву. Ако је димензија случајног вектора велика, у циљу смањења сложености израчунавања током формирања алгоритма за класификацију стања котрљајућих лежјаева, врши се редукција димензија. Различите методе редукције димензија директно утичу на тачност примењеног класификатора. Технике редукције димензија које се углавном користе су [14]: анализа главних компоненти (енг. *Principal Component Analysis* - PCA), анализа независних компоненти (енг. *Independent Component Analysis* - ICA), линеарна дискриминантна анализа (енг. *Linear Discriminant Analysis* - LDA), итд. Последњи корак у програму одржавања према стању је доношење одлуке о стању надзиране компоненте. Ова фаза се може поделити на два главна дела: дијагностика и прогноза. Као што је речено дијагностика се бави детекцијом отказа, њиховом изолацијом и идентификацијом када се деси. Детекција отказа има за задатак да укаже да ли нешто није у реду у посматраном систему, задатак изолације отказа је да пронађе која је компонента у систему неисправна док идентификација треба да утврди природу грешке када се детектује. Прогноза, међутим, покушава да предвиди квар пре него што до њега дође. У блоку за прогнозу се на основу прогностичких модела и алгоритама процењује преостали функционални односно радни век (енг. *Remaining Useful Life* - RUL) посматраних делова система [15]. Према томе, дијагноза отказа представља анализу после догађаја, док прогноза отказа представља анализу пре догађаја. Очигледно је да је прогноза отказа ефикаснија и супериорнија над дијагностиком отказа. Међутим, дијагноза отказа је неопходна у случајевима када је предикција прогнозе

³ 10. Bengtsson, M.: *Condition Based Maintenance Systems – An Investigation of Technical Constituents and Organizational Aspects*. Mälardalen University Licentiate Thesis No. 36, 2004.

11. Alfredson, R.J., Mathew J.: *Frequency domain methods for monitoring the condition of rolling element bearings*. Mechanical Engineering Transactions - Institution of Engineers Australia, Vol. 10, No. 2, 1985, pp. 108-112

12. McFadden, P.D., Smith J.D.: *The vibration produced by multiple point defects in a rolling element bearing*. Journal of Sound and Vibration, Vol. 98, No. 2, 1985, pp. 263-273.

13. Tse, P.W., Yangb, W., Tam, H.Y.: *Machine fault diagnosis through an effective exact wavelet analysis*. Journal of Sound and Vibration, Vol. 277, 2004, pp. 2560-2574.

14. Pandian, A., Ali, A.: *A review of recent trends in machine diagnosis and prognosis algorithms*. International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications, Vol. 2, 2010, pp. 320-328.

15. Heng, A., Zhang, S., Tan, A.C.C., Mathew, J.: *Rotating machinery prognostics: State of the art, challenges and opportunities*. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 20, 2009, pp. 724-739.

отказа била неуспешна и када се отказ десио. Прогноза отказа никада у потпуности не може заменити дијагностику, јер у пракси увек постоје грешке и кварови који нису предвидиви.

4. Научне методе истраживања

Процес дијагнозе оштећења лежајева у ствари представља проблем препознавања и класификације облика [16]⁴. Методологија која се предлаже у овој дисертацији је да се врши издвајање обележја и у временском и у фреквенцијском домену. Спајањем обележја у временском и фреквенцијском домену биће формиран вектор обележја који садржи две врсте особина сигнала чиме се добија потпунија информацију о измереном сигналу [17]. За издвајање обележја у временском домену биће коришћене статистичке величине. Издвајање обележја у фреквенцијском домену ће бити извршено применом технике анализе анvelope на изворни сигнал вибрација и применом класичних метода спектралне анализе на добијени сигнал анvelope. Редукција димензија применом линеарне дискриминантне анализе која води рачуна о сепарабилности класа ће бити искоришћен као алат у случају да вектор обележја буде претерано велике димензије. Посебна пажња ће бити посвећена пројектовању одговарајућих класификатора. Овакви поступци најчешће подразумевају чињење компромиса између нумеричке једноставности и ефикасности, односно тачности класификације. У том смислу ће предложена анализа кренути од најједноставнијих класификатора типа линеарних и квадратних класификатора, а по потреби ће у обзир бити узети и класификатори засновани на тестирању хипотеза или вештачкој интелигенцији. На основу експерименталних резултата извршиће се компаративна анализа са осталим познатим техникама детекције отказа котрљајућих лежајева.

5. Очекивани научни допринос

Очекивани научни доприноси ове докторске дисертације могу бити систематизовани на следећи начин:

1. Прегледом одговарајуће литературе извршиће се детаљна анализа постојећих техника детекције отказа које су засноване на статистичком приступу, примени вештачке интелигенције и техникама заснованим на моделу. Ова анализа ће узети у обзир примењивост најчешће коришћених критеријума за евалуацију ових приступа, као што су благовременост детекције, осетљивост на ране манифестације отказа, ниво лажног аларма, ниво пропуштене детекције и некоректност у идентификацији, као и са становишта њихове сложености, поузданости и примењивости за поједине типове процеса.
2. На основу реалних података и мерења која су добијена са станице за испитивање котрљајућих лежајева, извршиће се пројектовање система за аутоматску детекцију отказа. Кључни корак у току пројектовања система за детекцију биће издвајање карактеристичних обележја и одговарајућа редукција димензија. За добијене облике који представљају одређене отказе примениће се технике класификације као што су линеарни и квадратни класификатор на бази жељеног излаза.
3. Биће предложена нова техника за детекцију отказа која ће бити својеврсни компромис између техника постојећих у литератури. На основу добијених експерименталних мерења са лабораторијске станице за испитивање котрљајућих лежајева, извршиће се поређење са другим савременим техникама за детекцију отказа.

⁴ 16. Widodo, A., Yang, B.S.: *Support vector machine in machine condition monitoring and fault diagnosis*. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 21, 2007, pp. 2560–2574.

17. Stepanic, P., Latinovic, I.V., Djurovic, Z.: *A new approach to detection of defects in rolling element bearings based on statistical pattern recognition*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 45, No. 1-2, 2009, pp. 91-100.

4. Биће анализирана примењивост, предности и недостаци развијеног приступа за детекцију отказа котрљајућих лежајева у односу на друге технике и смернице за даљи научно-истраживачки рад у овој области. При томе ће анализа обухватити и постојеће технике као и новопредложено решење у овој тези. Велики раскорак између теоријских резултата објављених у еминентним научним часописима и индустријске праксе лежи у томе да истраживачи нису свесни или свесно не желе да узму у обзир ограничења која индустрија безусловно поставља (финансијски ефекти-профит, ниво безбедности по материјална средства и људство у окружењу, поузданост и расположивост система, извршавање алгоритама у реалном времену, ограничени меморијски и рачунарска капацитети микропроцесорских јединица које воде процесе, стално присуство изразитог мерног шума, стално присуство поремећаја различитог интензитета и томе слично).
5. Иако је најважнији допринос ове докторске тезе пројектовање система за аутоматску детекцију отказа котрљајућих лежајева који је осетљив на отказе и робусан на променљиве режиме рада и шум окружења, посебна пажња ће бити посвећена компаративној анализи развијене методе у односу на класичне технике за детекцију отказа. Резултат ове анализе се такође може сматрати значајим доприносом тезе.
6. Коначно, добијени резултати ће бити стављени у шири контекст превентивног одржавања са циљем спречавања предхваријских стања са циљем смањења трошкова редовног одржавања и застоја у великим индустријским системима.

6. План истраживања и структура рада

План истраживања у оквиру ове дисертације се састоји из следећих корака:

- преглед стратегија одржавања према стању (CBM програм) и приступи надгледања стања електро-машинских погона, карактеристичне величине техничких параметара система и опис њиховог мерења помоћу различитих сензора;
- преглед литературе која се бави детекцијом отказа, издвајање прегледних радова, систематизација постојећих решења, издвајање предности и недостатака једних метода у односу на друге, подробно упознавање са техникама које се заснивају статистичком приступу, примени вештачке интелигенције и технике засноване на моделу;
- проучавање теорије вибрација, моделовање сигнала вибрација са лежаја, механизми отказа и карактеристични откази котрљајућих лежајева, технике издвајања обележја из сигнала вибрација
- рад на лабораторијској станици за испитивање котрљајућих лежајева, аквизиција сигнала вибрација са лежајева и примена метода анализе сигнала вибрације, анализа анvelope;
- примена изабраних техника детекције отказа лежајева на реалним подацима као и развој нових техника за детекцију отказа, анализа резултата добијених применом различитих приступа, пројектовање параметарских класификатора, стабала одлучивања, скривених Марковљевих модела;
- анализа добијених резултата, успостављање квалитативних и квантитативних критеријума за поређење различитих приступа у детекцији отказа и могућности идентификације отказа, издвајање ограничења у примени испројектованог приступа.

Структура саме тезе ће у великој мери пратити предложене фазе истраживања. Осим уводног поглавља предвиђена су два поглавља прегледног типа од којих ће прво бити посвећено техникама одржавања према стању, док ће друго прегледно поглавље представити најважније резултате у области детекције и идентификације отказа. Остатак тезе ће бити посвећен што експерименталном, што истраживачком делу рада и зависно од добијених

результата садржаће експерименталне резултате у примени и анализи различитих техника за детекцију и идентификацију отказа као и компаративну анализу различитих приступа.

7. Закључак и предлог

Током писања овог Извештаја Комисија је узела у обзир све релевантне чињенице које формирају слику о подобности теме и кандидата за реализацију предвиђених истраживања. Имајући у виду резултате досадашњег рада кандидата Павла Степанића показане у току докторских студија као и у фази истраживања у оквиру докторске дисертације, његових стручних резултата и његовог истраживачког искуства у оквиру рада у научно-развојном институту, Комисија је стекла неспорни утисак да кандидат јесте способан за научно-истраживачки рад као и за реализацију предвиђених истраживања. Са друге стране, анализирајући предложену тему под називом "Детекција отказа на котрљајућим лежајевима применом анализе сигнала вибрација", стављајући је у контекст савремених, актуелних научних истраживања, сагледавајући наведене непосредне циљеве, очекиване резултате и доприносе, Комисија је у потпуности сагласна да оваква тема задовољава све услове подобности за докторску дисертацију. При томе Комисија констатује да ова тема припада ужој научној области Аутоматика, да Електротехнички факултет Универзитета у Београду јесте матичан за ову научну област, и при томе за ментора рада предлаже проф. др Жељка Ђуровића запосленог на Електротехничком факултету у Београду. У контексту овог предлога, уз Извештај је приложен списак радова проф. Жељка Ђуровића који га квалификују за ментора.

Коначно, у закључку овог Извештаја, а имајући у виду све напред наведено, Комисија има част да Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду предложи да прихвати тему докторске дисертације "Детекција отказа на котрљајућим лежајевима применом анализе сигнала вибрација" и да кандидату Павлу Степанићу омогући да приступи њеној изради.

у Београду,
дана 04.11.2013.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

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

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

др Владимир Стевановић, редовни професор
Универзитет у Београду – Машински факултет