

Универзитет у Београду
Електротехнички факултет

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата **мр Синише Стојковића, дипл. инж.** за израду докторске дисертације

Одлуком бр. 960/1 од 30. јуна 2015. године, а на основу закључка и записника са 787. седнице Наставно-научног већа Електротехничког факултета Универзитета у Београду одржане 23. јуна 2015. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата **мр Синише Стојковића, дипл. инж.**, за израду докторске дисертације и научне научне заснованости теме **„Нова метода за детекцију квара ротора високонапонских асинхронних мотора великих снага“**

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Мр Синиша Стојковић, дипл. инж., рођен је 19.11.1966. год. у Призрену. Основну и средњу школу смера машински конструктор техничар завршио је са одличним успехом у Призрену. Војни рок је одслужио 1.8.1986. год.

Електротехнички факултет Универзитета у Београду уписао је школске 1985/1986. год. Дипломирао је 12.6.1991. год. на Енергетском одсеку са просечном оценом 8,37 на тему „Обрада снимљених струја трофазног кратког споја помоћу рачунара“, који је одбрањен са оценом 10.

Последипломске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду на смеру Енергетски претварачи и погони уписао је школске 1991/1992. год. Одбранио је

магистарски рад на тему „Детекција квара роторског кавеза код асинхроних мотора“ 8.6.2000. год.

У периоду од јула 1991. год. до октобра 1995. год. био је запослен у ЈП Електровојводина, Електродистрибуција Панчево на пословима инжењера за развој.

У периоду од октобра 1995. год. до јуна 2010. год. био је запослен Електротехничком факултету Универзитета у Београду при Катедри за енергетске претвараче и погоне, као асистент на предметима Електромеханичко претварање енергије, Електричне машине наизменичне струје и Испитивање електричних машина.

Од јуна 2010. год. ангажован је у сопственом привредном предузећу Навитас Соларис д.о.о са седиштем у Димитровграду, специјализованом за пројектовање и извођење радова на инсталацијама малих соларних електрана. У досадашњем раду урађени су пројекти за 18 електрана а изведена је инсталација у пуштање у рад 13 соларних електрана укупне инсталисане снаге 580 kW.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Кандидат Синиша Стојковић уписао је последипломске студије на Електротехничком факултету у Београду школске 1991/92 године на смеру Енергетски претварачи и погони. Након што је положио све испите предвиђене наставним планом и програмом, магистарску тезу под насловом „Детекција квара роторског кавеза код асинхроних мотора“ одбранио је 8.6. 2000. године и стекао академски назив магистра електротехничких наука - област Енергетски претварачи и погони. Ментор при изради магистарског рада био је др Драган Петровић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Магистарски рад организован је у 5 поглавља и изложен на 80 страна. У раду је дат упоредни преглед досадашњих метода мерења и анализе несиметрија у ротору. То су методе које се у свету најчешће користе у циљу детекције квара у кавезу асинхроних мотора, а базиране су на снимању струја статора мотора, мерењу вибрација кућишта, мерењу промена брзине обртања вратила, мерењу момента и снимању и анализи расутог аксијалног флукса. Приступ у овом раду заснован је на анализи струје статора која се користи као сензор и која носи довољан број информација о постојању и врсти квара. С обзиром на то да се индикације више описаних кварова могу појавити на истим или сличним фреквенцијама у спектру струје, дат је допринос и побољшању диференцијалне дијагностике у смислу раздвајања квара на ротору (лома шипке или прстена кавеза) у односу на остале несиметрије у ваздушном зазору и кварове у механичком преносном систему.

Математички модели асинхроног мотора који су до сада развијени показали су да, чак и уз уважавање многих уобичајених упрошћења, не дају резултате који су довољно тачни за детекцију квара у раној фази. Узрок томе су многе несавршености приликом израде и монтаже мотора који могу имати већи утицај

него сам квару зачетку. Имајући то у виду, развијен је и приказан упрошћени математички модел који даје физичку слику процеса који се одвијају приликом квара.

Потенцијално велики практични значај за надгледање стања мотора има оригинално развијена метода амплитудне демодулације као метода која, иако без засад довољне осетљивости на врсту квара, недвосмислено указује на постојање оштећења.

У склопу истраживања изведена је серија експеримената на више различитих високонапонских мотора у различитим погонима у оквиру ЕПС-а у периоду од 1996. до 1999. год. У раду су приказани само мотори код којих је детектован квар и које је било могуће испитати пре настанка квара или после дефектаже. Експериментални подаци потврдили су основаност методологије развијене у раду.

Научноистраживачки рад из те области настављен је и после завршетка магистарског рада анализом претходних података са новим приступом, што је резултирало са два нова стручна рада.

Метода проистекла из магистарског рада добила је и примену у инжењерској пракси у оквиру радног задатка чији је кандидат био носиоц, спроведеног на Електротехничком факултету у Београду а који је анализирао горе описане појаве у ТЕ Обреновац Б на тракама 5 и 6 током 2006. године.

Даља мерења струја високонапонских асинхронних мотора спроведена су током 2007 и 2008. год. на коповима Западног поља у ЈП Колубара.

Последња мерења извршена су 2012. год. на ТЕ Зрењанин на моторима 3,15 MW.

Треба нагласити да су мерења уз услов сагласности субјеката и доступности мотора вршена на моторима на којима су већ уочени проблеми, те да даљим развојем методе постоји могућност да се третирају и мотори без симптома поремећаја, у оквиру мониторинга и раног откривања квара.

Планирано је да се у оквиру докторског рада изанализирају сви претходно снимљени подаци, као и нова мерења која буду доступна у будућем периоду.

Кандидат је осим научноистраживачког рада из ове области био ангажован и на више различитих истраживања из домена делатности Катедре. Одржао је курс из опште теорије електричних машина инжењерима Савезне управе за контролу лета 1997. год. Кандидат је објавио 3 рада на међународним конференцијама, 9 на домаћим конференцијама, 3 рада у домаћим часописима и учествовао у 10 студија и пројеката.

Кандидат мр Синиша Стојковић, дипл. инж., полагао је 01. јула 2015. године докторски испит на Електротехничком факултету Универзитета у Београду при чему је комисија у саставу:

1. др Слободан Вукосавић, редовни професор, Електротехнички факултет Универзитета у Београду

2. др Жељко Ђуровић, редовни професор, Електротехнички факултет Универзитета у Београду
3. др Жарко Јанда, научни сарадник, Електротехнички институт Никола Тесла у Београду

једногласно закључила да су кандидат и тема подобни за израду докторске дисертације на Електротехничком факултету Универзитета у Београду.

Међународне конференције (Категорија М33)

1. D. Petrović, S. Stojković, "*A Numerical Procedure for Identification of Parameters of Synchronous Machine from 3-Phase Circuit Test*", International Conference on the Evolution and Modern Aspects of Synchronous Machines, Zürich, 1991. god.
2. Z. Lazarević, D. Petrović, Ž. Janda, S. Stojković, "*The advanced method of rotor failure detection in large induction motors*", 38. Zasedanje CIGRE 2000, Pariz, 2000.god.
3. D. Petrović, V. Milosavljević, R. Albijanić, S. Stojković, "*The change of the rotor and stator forms of a hydrogenerator in the HE "Đerdap I" in the course of exploitation*", R 11-205, 2002 CIGRE Session, Pariz 2002. god.

Саопштења са домаћих скупова штампана у целини (Категорија М63)

1. S. S. Stojković, A. Veličković, S. R. Stojković, "*Definisane kratkospojnih karakteristika prekidača u uslovima asimetrije struje kvara*", 21. Savetovanje JUKO CIGRE, 1993.,
2. A. Veličković, S. R. Stojković, S. S. Stojković, "*Upoređivanje ispitnih kola za ispitivanje prekidača u uslovima bliskog kratkog spoja*", 21. Savetovanje JUKO CIGRE, 1993. god.
3. D. Petrović, S. Stojković, "*Numerička metoda određivanja parametara sinhronih mašina iz struje kratkog spoja*", XL konferencija ETRAN, jun 1996. god.
4. V. Milosavljević, D. Petrović, S. Stojković, "*Analiza mogućnosti oštećenja prigušnog namotaja kod hidrogeneratora*", 23. Savetovanje JUKO CIGRE, maj 1997. god.
5. V. Milosavljević, D. Petrović, B. Đikić, S. Stojković, "*Analiza oštećenosti limova u zoni spoja dva sektora jezgra statora hidrogeneratora*", R15-06, 24. Savetovanje JUKO CIGRE, Vrnjačka Banja, maj 1999. god.
6. D. Petrović, V. Milosavljević, S. Stojković, "*Analiza uzroka i posledica nejednakosti dužine međugvožđa kod hidrogeneratora*", 24. Savetovanje JUKO CIGRE, Vrnjačka Banja, maj 1999. god.
7. Z. Lazarević, D. Petrović, S. Stojković, Ž. Janda, "*Napredna metoda detekcije kvara u rotoru kod visokonaponskih motora*", R11-08, 25. Savetovanje JUKO CIGRE, Herceg Novi, 2001. god.
8. D. Petrović, V. Milosavljević, R. Albijanić, S. Stojković, "*Deformacija forme rotora i statora u toku eksploatacije hidrogeneratora hidroelektrane "Đerdap I"*", 26. Savetovanje JUKO CIGRE, Teslić, maj 2003. god.
9. D. Petrović, V. Milosavljević, S. Stojković, "*Jedan koncept monitoringa stanja hidrogeneratora*", 27. Savetovanje JUKO CIGRE, Vrnjačka Banja, maj 2005. god.

Радови објављени у домаћим часописима (Категорија М52)

1. S. S. Stojković, A. Veličković, S. R. Stojković, "*Definisanje kratkospojnih karakteristika prekidača u uslovima asimetrije struje kvara*", časopis Elektroprivreda 1-12. specijalni broj 1993. god.
2. Z. Ćirić, I. Stevanović, D. Petrović, S. Stojković, "*Određivanje reaktansi i vremenskih konstanti sinhronog generatora iz ogleda trolnog udarnog kratkog spoja*", časopis Elektroprivreda, br. 3, 1995. god.
3. V. Milosavljević, D. Petrović, S. Stojković, "*Analiza mogućnosti oštećenja prigušnog namotaja kod hidrogenatora*", časopis Elektroprivreda br 2, 1997. god.

Studije i projekti (Kategorija M80)

1. "*Analiza oštećenja prigušnog kaveza na generatorima proizvodnje "Rade Končar"-Zagreb na hidroelektrani "Đerdap" I*", studija Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, jun 1996. god.
2. "*Analiza povećanja snage na generatorima u HE "Piroć"*", studija Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, oktobar 1996. god.
3. "*Analiza oštećenja limova na sastavima sektora jezgra statora generatora "B" u HE Vrla IV*", studija Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, februar 1998. god.
4. "*Analiza uzroka i posledica nejednakosti dužine međugvožđa kod hidrogenatora*", studija Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, maj 1998. god.
5. "*Računarski upravljani pogon trolejbusa za prevoz putnika u gradskom saobraćaju*", Inovacioni projekat Ministarstva za nauku i tehnologiju, 1998. god.
6. "*Monitoring agregata u JP Đerdap sa elementima dijagnostike*", studija Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, maj 2002. god
7. "*Studija o mogućnostima povećanja snage motor-generatora posle izvršenog remonta u HE Bajina Bašta*", studija Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, oktobar 2003. god.
8. "*Preventivna dijagnostika visokonaponskih asinhronih motora u pogonima EPS-a*", studija Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, jun 2003. god.
9. "*Projekat o energetske efikasnosti -podgrupa "Pouzdanost rada hidrogenatora"*", Ministarstvo za nauku i tehnologiju, oktobar 2003.
10. "*Elaborat o opravdanosti uvođenja ON-LINE merenja za ocenu stanja izolacionog sistema namotaja statora generatora u TE Nikola Tesla*", studija Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, januar 2004. god.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

На основу резултата које је кандидат постигао у свом досадашњем стручном и научном раду, а од којих би издвојили следеће:

- одбрана магистарске тезе под називом „Детекција квара роторског кавеза код асинхроних мотора“, након полагања свих испита предвиђених наставним планом и програмом магистарских студија,
- публикавање наведених радова и учешће на пројектима и студијама,
- одбрана теме докторске дисертације на јавној усменој одбрани пред комисијом (проф. др Слободан Вукосавић, проф. др Жељко Ђуровић, др Жарко Јанда) формираном од стране Наставно-научног већа Електротехничког факултета Универзитета у Београду на својој седници бр. 787 од 23. 06. 2015. године,
- остварено практично искуство кроз мерење сигнала струја у периоду од последњих 19 година, а у области коју покрива предложена тема докторске дисертације као наставак истраживања после одбране магистарске тезе,

можемо закључити да кандидат мр Сениша Стојковић, дипл. инж., у сваком погледу испуњава услове који га квалификују да приступи изради докторске дисертације са предложеном темом.

2. Предмет и циљ истраживања

Предмет тезе је нови метод за детекцију квара ротора великих асинхроних мотора, који су основно покретачко средство у енергетици и индустрији.

Код електромоторних погона је веома важна брза и сигурна идентификација почетка настајања квара. Помоћу адекватних процедура детекције, квар се може детектовати још у фази настајања тако да се може предузети одговарајућа корективна акција пре него што дође до значајног оштећења. То је нарочито важно код електромоторних погона где је висок захтев сигурности и поузданости, било због високе цене изгубљених радних сати (електромоторни погони циркулационих пумпи, вентилатора свежег ваздуха и вентилатора димних гасова у термоелектрани, мотори млинова за угаљ, погони трачних транспортера, итд ...) или сигурности (расхладне колоне у хемијској индустрији, погони у експлозивној атмосфери, итд...). Упркос пословичној робусности кавезних мотора, која проистиче из његове једноставне и поуздане конструкције, ипак се у кавезном мотору, током животног века дешавају и специфични кварови.

Нарочито су карактеристични ломови шипки кавеза ротора и спојних прстенова, као и страдања лежајева и кварова везаних за статички и динамички ексцентрицитет ротора.

Директан разлог лома шипки кавеза ротора је тешко изоловати, и изгледа да се основни узрок квара мења од случаја до случаја. Међутим, вероватно да чести стартови мотора и преоптерећења, термичка напрезања и штедљиви дизајн кавеза уз недовољан квалитет израде доводе до овог типа квара кавеза. Такође, изгледа да код мотора највећих снага, са клизним лежајевима који нису део кућишта мотора, до проблема ове врсте може доћи ако се при монтажи грешком направи сувише велики статички ексцентрицитет ротора (у односу на осу статора).

Циљ предложене тезе је развој новог on-line метода за детекцију квара кавеза високонапонских синхроних мотора и диференцијалну дијагностику у односу на друге кварове предметних мотора. Предложена метода се заснива на праћењу одређених статистичких параметара који се процењују преко струје статора мотора у устаљеном радном стању (за детектовање оштећене шипке кавеза а потискујући утицај засићења и ексцентричности) или преко сигнала добијеног од аксијалног расипног флуksа (за детектовање међунавојних кратких спојева у статору или опет оштећења кавеза). Приступ се заснива на екстракцији анvelope обрађеног сигнала од интереса Хилбертовом трансформацијом, претходно помноженим са одговарајућим прозором ради смањења изобличења. Затим се примењује анализа употребом технике таласића (wavelet), која даље омогућава лакшу и тачнију диференцијалну дијагностику. На крају, на основу статистичке анализе сигнала добијених са исправних и неисправних мотора, обрађених на описани начин, даље се дефинишу вредности прагова на основу којих се врши одлучивање о постојању, врсти и интензитету квара мотора.

Kao jedna od osnovnih tehnika, Метод анализе спектра струје статора – motor current signature analysis, MCSA је добро разрађена техника детекције квара кавеза ротора и ослања се на употребу брзе Фуријеове трансформације (FFT) ради идентификације и евалуације величине субхармоника у спектру снимљене струје статора, који су директно повезани са оштећењем кавеза ротора. Ти субхармоници се налазе на фреквенцијама одређеним изразом $f_s(1 \pm 2ks)$, где је k природан број, s је клизање ротора и f_s је фреквенција напојног напона. Предности методе су проста инсталација опреме (користе се само струјни сензори) и релативна независност од параметара мотора.

Захваљујући томе, метод MCSA се користи као стандардни приступ у индустријском окружењу. Једини захтев који се поставља пред мотор који је предмет испитивања, јесте да постоји одговарајући ниво оптерећења. У идеалном случају мотор треба да буде приближно номинално оптерећен са теретом који нема осцилације отпорног момента, али је у пракси то често тешко постићи и испитивања се врше при парцијално оптерећеном мотору. На бази MCSA метода је развијен читав низ изведених метода који користе различите технике постпроцесирања снимљеног сигнала.

Релевантни библиографски извори:

Најзначајније референце у које је кандидат имао увид и које је користио у својим досадашњим истраживањима везаним за проблематику докторске дисертације су:

- [1] P.J.Tavner, J. Penman, "Condition monitoring of electrical mashines", Research Studies Press Ltd, England, 1987
- [2] W.Deleroy, "Broken bar in squirrel-cage rotor of an Induction motor, Part I: Description of superimposed fault-currents", Archiv fuer Electrotechnik 67, 1984.
- [3] H.A.Toliat, M.M.Rahimian, S.Bhattacharya, T.A. Lipo, "Transient analysis of induction machines under internal faults using winding functions", Third International Conference on electrical rotating machines - ELROMA '92, Bombay, India.
- [4] P.Vas, "Parameter estimation, condition monitoring, and diagnosis of electrical machines", Clarendon Press Oxford, 1993.
- [5] R.Wolf,D.Ban,M.Cettolo,Z.Kovačević, "Dijagnostička ispitivanja kaveza rotora asinhronog stroja", Elektrotehnika, ELTHB2 34, Zagreb, 1991.
- [6] C. Hargis, B. Gaydon, K. Kamash, "The detection of rotor defects in induction motors", Proc. of Int. Conf. of Electrical Machines, IEE London, July 1982.
- [7] Ž. Janda, D.Petrović, Z. Lazarević, "New approach for broken rotor bar detection in induction motors", ICEM 1994., Paris
- [8] Puche-Panadero, R.; Pineda-Sanchez, M.; Riera-Guasp, M.; Roger-Folch, J.; Antonino-Daviu, J.A.; Perez-Cruz, J., "Diagnosis of rotor bar breakages based on the Hilbert Transform of the current during the startup transient," *Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09. IEEE International* , vol., no., pp.1434,1440, 3-6 May 2009
- [9] Wang Xin; Zhao Zhike "Novel Adaptive Filter Method and Application in Broken Rotor Bar Fault Diagnosis of Induction Motor", *Digital Manufacturing and Automation (ICDMA), 2011 Second International Conference on*, On page(s): 780 - 783
- [10] K.Cho, J. Lang, S. Umans, "Detection of broken rotor bars in induction motors using state and parameter estimation", IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 28, No. 3, 1992.
- [11] M. Said, M. Bebouzid, A. Benchaib, "Extended Kalman filter-based rotor resistance indentification for sensorless induction motors broken bars monitoring", ICEM 1998.
- [12] I. Kerszenbaum, C. Landy, "The existence of large inter-bar currents in three phase squirrel cage motors with rotor-bar and/or end-ring faults.", IEEE Tren. on Power Apparatus and Systems, PAS-103(7), July 1984.
- [13] H.Toliat, T. Lipo, "Transient Analysis of Cage Induction Machines Under Stator, Rotor Bar and End Ring Faults", IEEE Vol.10, No.2, 1995.
- [14] S.Ho, "Condition monitoring of induction motors", Proc of 5th IEE International Conference on Electrical Machines and Drives, pp. 56-60, 1991.
- [15] Filippetti, F.; Bellini, A.; Capolino, G. "Condition monitoring and diagnosis of rotor faults in induction machines: State of art and future perspectives", *Electrical Machines Design Control and Diagnosis (WEMDCD), 2013 IEEE Workshop on*, On page(s): 196 – 209

- [16] S. Williamson, M. A. S. Abdel-Mageid, "Steady- state analysis of double-cage induction motors with rotor cage faults", IEE Proc., Pt. B. 134. 1987.
- [17] Riera-Guasp, M.; Antonino-Daviu, J.A.; Capolino, G.-A. "Advances in Electrical Machine, Power Electronic, and Drive Condition Monitoring and Fault Detection: State of the Art", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, On page(s): 1746 - 1759 Volume: 62, Issue: 3, March 2015
- [18] X. Luo, Y. Liao, H.A. Toliyat, A. El-Antalby, T.A. Lipo, "Multiple coupled circuit modeling on induction machines", IEEE Tran. on Industry Applications, Vol. 31. No.2, March/April 1995
- [19] J. A. Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp, J. Rogerfolch, and M. P. Molina, "Validation of a New Method for the Diagnosis of Rotor Bar Failures via Wavelet Transform in Industrial Induction Machines," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 42, 4, 990, Institute of Electrical and Electronics Engineers (2006)
- [20] C. E. Heil, D. F. Walnut, "Continuous and Discrete Wavelet transforms", SIAM Review, Vol. 31. No. 4, pp. 628-666., Dec. 1989
- [21] M.E.H. Benbouzid, H. Nejjari. "Induction motor faults detection using advanced spectral analysis technique, ICEM 1996. pp 1849-1854
- [22] S. Mallat, "A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation", IEEE Trans. on Pattern Anal. and Mach. Intell., Vol. 11, pp.674-693, July, 1989.
- [23] J. A. Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp, M. Pineda-Sanchez, and R. B. Perez, "A Critical Comparison Between DWT and Hilbert-Huang-Based Methods for the Diagnosis of Rotor Bar Failures in Induction Machines," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 45, 5, 1794, Institute of Electrical and Electronics Engineers (2009)
- [24] Ž. Janda, D. Petrović, B. Maoduć, Z. Lazarević, M. Demek, "Kvarovi u rotoru visokonaponskih asinhronih motora, njihova detekcija i saniranje", *Elektroprivreda*, br. 2, 1995.
- [25] G.A. Jimenez, A.O. Munoz, M.A. Durante-Mermoud, „Fault detection in induction motors using Hilbert and Wavelet transforms“, *Electrical Engineering* (2007) 89:205–220

Треба нагласити да је објављени рад који представља део истраживања у оквиру докторске тезе:

Z. Lazarević, D. Petrović, Ž. Janda, S. Stojković, "*The advanced method of rotor failure detection in large induction motors*", 38. Zasedanje CIGRE 2000, Pariz, 2000. god.

био веома запажен и приликом презентације на самој конференцији, не само због новог приступа анализи сигнала, већ и због тога што је у стручној литератури врло редак случај да се експерименти и испитивања не изводе у лабораторијским условима на нисконапонским моторима, већ у самом индустријском постројењу.

Тај рад је у два наврата цитиран у раду објављеном у часопису:

G.A. Jimenez, A.O. Munoz, M.A. Durante-Mermoud, „Fault detection in induction motors using Hilbert and Wavelet transforms“, *Electrical Engineering* (2007) 89:205–220 а који је даље цитиран 45 пута од стране других аутора.

3. Полазне хипотезе

Диференцијална дијагностика оштећења лежајева мотора (најчешћи квар у пракси) у односу на квар кавеза се не може лако извршити директном употребом FFT трансформације ради екстракције карактеристичних интерхармоника. Користећи исти алат, други аутори су покушали да изврше и дијагностику кварова ротора уз потискивање, односно раздвајање утицаја других ефеката, као што је утицај жлебних хармоника ротора, засићења мотора и постојање статичког и динамичког ексцентрицитета.

У овом истраживању се користе два истовремена снимка струја статора мотора који је делимично оптерећен у неколико степени, а врши се и снимање расутог флукса тако да је могуће вршити истовремену анализу вишеканалних снимака.

Полазне хипотезе су:

- могуће је направити довољно поуздан модел квара који се може идентификовати помоћу снимка две различите фазне струје статора,
- постоји корелација карактеристичних пикова у спектру инверзне компоненте струје и квара кавеза ротора,
- квар кавеза ротора генерише и више просторне хармонике и тако се може разликовати од оштећења лежајева и ексцентрицитета,
- постоји корелација карактеристичних пикова у спектру расутог флукса и клизања у случају квара кавеза.

4. Научне методе истраживања

Тренутно развијени методи захтевају велики број параметара, који су добијени после извршеног великог броја тестова на машини при различитим радним температурама. Други аутори предлажу методологију детекције на основу анализе расутог аксијалног флукса машине употребом FFT техника. Други аутори предлажу метод детекцију помоћу инверзне симетричне компоненте добијене декомпоновањем фазора струје статора у симетричне компоненте, и тај приступ даје боље практичне резултате. Међутим, други аутори су показали да ови резултати нису увек поуздани, пошто је инверзна компонента струје статора присутна и када постоји несиметрија напона напајања.

Метод истраживања биће:

- снимање струја статора, напона статора, расипног флукса и звука код оштећених и неоштећених мотора при разним нивоима оптерећења,
- обрада снимљених сигнала путем примене FFT технике, и утврђивање постојања корелација међу сигнаlima у случају постојања квара кавеза,
- обрада снимљених сигнала путем Хилбертове трансформације и примена технике таласића на тако добијене променљиве вредности амвелопе сигнала у времену,

- истраживање постојања корелација између расутог флуksа и несиметрије струја статора у случају постојања квара кавеза,

5. Очекивани научни допринос

Главни очекивани резултат ове тезе је предлог и верификација новог начина анализе релевантних сигнала снимљених на мотору помоћу ког се могу детектовати кварови електричних машина у почетном стадијуму.

Очекивани научни доприноси предложене дисертације су:

- преглед и компаративна анализа постојећих метода за дијагностику лома кавеза мотора,
- експериментална верификација различитих поступака за одређивање квара кавеза у раном стадијуму, заснованих на снимању две фазне струје, накнадном обрадом Хилбертовом трансформацијом ради добијања амплитуде ротационог вектора, или неке друге погодне величине као што је инверзна компонента струје. Обрадом тако добијеног сигнала методом таласића (Wavelet) повећава се осетљивост детекције појаве,
- повећање осетљивости диференцијалне дијагностике напред описаних поступака,
- развој и примена новог једноставног математичког модела квара кавеза мотора за потребе рачунарских симулација и верификације развијених метода,
- употреба Вејбулове расподеле у статистичкој анализи снимљених сигнала који носе информацију квара,
- унапређење поступка за процену стања великих асинхроних мотора у погону, која је ефикасна и при парцијалним променљивим оптерећењима.

Инжењерска пракса је кроз примену дела предложене методе у случају поменуте анализе стања високонапонских асинхроних мотора великих снага у ТЕ Обреновац верификовала описани приступ. Циљ кандидата је да то не остане једини случај већ да се научни допринос што боље и више индустријски примени.

6. План истраживања и структура рада

Рад ће детаљно обрадити све досад доступне снимке струја мотора на нов начин, уз напор да се у међувремену изврше додатна мерења и испитивања на новим високонапонским асинхроним моторима велике снаге, за шта већ постоје прелиминарни договори са субјектима који поседују такву врсту мотора

У раду ће се након увода у првом поглављу критички анализирати досадашњи приступи детекцији квара кавеза асинхроног мотора. У оквиру тог поглавља пажња ће бити посвећена основним начинима обраде сигнала струје, звука и расутог поља који се тренутно користе као и њихови недостаци.

Следеће поглавље садржи кратак приказ статистичких метода који је бити употребљени за обраду снимљених сигнала.

Затим, наредно поглавље обрађује теоријски Хилбертову трансформацију и даје основу за примену исте у овом проблему детекције квара, односно идентификације постојања модела квара, пошто је квар физичка појава чије утврђивање постојања је главни циљ ове тезе. Да би се боље обрадили резултати добијени Хилбертовом трансформацијом, уводе се још неке нелинеарне статичке трансформације и техника таласића.

У следећем поглављу се врши проширење претходно приказаних приступа на случај када постоје симултани снимци две фазне струје, што захтева модификацију Хилбертове трансформације за случај екстракције амплитуде обртног вектора струје статора.

Наредно поглавље обрађује начине екстраховања сигнала инверзне компоненте струје статора, при чему постоји више могућих приступа када је реч о садржају виших ротационих хармоника.

Затим следи поглавље са експерименталним резултатима и верификација предложених алгоритама за одлучивање о постојању, непостојању или степену квара кавеза. У поглављу Резултати и дискусија биће дати добијени резултати и они ће бити дискутовани у светлу теорије и праксе електричних машина и

електромоторних погона велике снаге, електромагнетике и математичке статистике.

У поглављу Закључак ће бити још једном истакнути најважнији постигнути резултати и извучени закључци релевантни за инжењерску праксу. У овом поглављу ће такође бити дате и смернице о пожељним усмерењима даљих истраживања у овој области, а која би се заснивала на резултатима постигнутим у овом раду.

7. Закључак и предлог

На основу свега наведеног, Комисија констатује да је предложени садржај теме докторске дисертације под насловом „**Нова метода за детекцију квара ротора високонапонских асинхронних мотора великих снага**“ актуелан у светлу даљег развоја проблематике раног детектовања кварова у ротору. Стога би резултати до којих би требало да се дође у току израде ове докторске дисертације имали значајан како научни, тако и практични допринос у тој области.

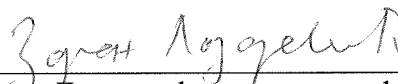
Кандидат мр Синиша Стојковић се током свог вишегодишњег стручног ангажовања веома често сусретао са овом проблематиком и показао је велики интерес за реализацију једног научноистраживачког приступа овој проблематици у

свом даљем раду. Комисија сматра да кандидат мр Синиша Стојковић испуњава све формалне и суштинске услове прописане Законом о високом образовању и Статутом Електротехничког факултета Универзитета у Београду за одобрење теме и приступање изради докторске дисертације под насловом „Нова метода за детекцију квара ротора високонапонских асинхронних мотора великих снага“.

Ужа научна област дисертације су **електромоторни погони**, за коју је Електротехнички факултет Универзитета у Београду матичан. Узимајући у обзир све поменуте чињенице, Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду да кандидату мр Синиши Стојковићу одобри израду докторске дисертације под горе наведеним насловом. За ментора израде докторске дисертације предлаже се **др Зоран Лазаревић**, редовни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет. Уз овај извештај се прилаже и списак радова предложеног ментора на одговарајућем формулару Универзитета.

У Београду, 02. јула 2015. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Зоран Лазаревић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Слободан Вукосавић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Жарко Јанда, научни сарадник,
Електротехнички институт Никола тесла



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