

**ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА
УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ**

**НАСТАВНО НАУЧНОМ ВЕЋУ
ФАКУЛТЕТА ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА У КРАГУЈЕВЦУ**

ПРЕДМЕТ: Извештај Комисије за оцену писаног дела и усмену јавну одбрану докторске дисертације кандидата Христоса Тсиафиса, мастер инжењера машинства

Одлуком Већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу, број IV-04-350/8 од 16.05.2018. године, а на предлог Наставно-научног већа Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, број 01-1/1238-10 од 19.04.2018. године именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Христоса Тсиафиса, мастер инжењера машинства, под насловом:

**„ДЕТЕКЦИЈА ОТКАЗА КОТРЉАЈНИХ ЛЕЖАЈЕВА ПРИМЕНОМ
НАПРЕДНИХ ВРЕМЕНСКО-ФРЕКВЕНЦИЈСКИХ МЕТОДА АНАЛИЗЕ
СИГНАЛА ВИБРАЦИЈА“**

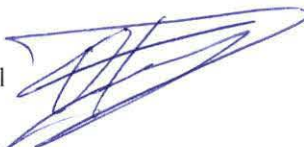
На основу увида у приложену докторску дисертацију и Извештаја о подобности кандидата и теме за докторску дисертацију, која је одобрена за израду одлуком Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, број 01-1/3260-23 од 17.09.2015. године, а на основу Правилника о пријави, изради и одбрани докторске дисертације Универзитета у Крагујевцу, Комисија подноси Наставно-научном већу следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Значај и допринос докторске дисертације са становишта актуелног стања у одређеној научној области

Докторска дисертација кандидата Христоса Тсиафиса, маст. инж. маш. под називом „Детекција отказа котрљајних лежајева применом напредних временско-фреквенцијских метода анализе сигнала вибрација“ представља резултат научно-истраживачког рада кандидата у актуелној научној области која се односи на испитивање могућности примене напредних метода дигиталне обраде сигнала у циљу ране детекције отказа котрљајних лежајева.

Резултати истраживања приказаних у докторској дисертацији реализовани су у оквиру међународног ФП7 пројекта „*Innovation through Human Factors in Risk Analysis and Maintenance (InnHF)*“ на коме је кандидат учествовао у својству младог истраживача на Факултету инжењерских наука, Универзитета у Крагујевцу. Предмет докторске

1 

дисертације инспирисан је реалним проблемима, случајевим и искуствима кандидата. У дисертацији су приказани резултати истраживања која су спроведена на Факултету инжењерских наука, затим током реализације студијске праксе у предузећу Тетрапак доо из Горњег Милановца, као и на Аристотеловом универзитету у Солуну.

Овакав приступ организацији и реализацији истраживања подразумевао је паралелан рад кандидата на више независних истраживачких праваца који су успешно обједињени и представљени у докторској дисертацији.

Кандидат је на основу разматрања великог броја радова из ове области, о чему сведочи 73 цитираних литературних извора, извршио критичку анализу и систематизацију постојећих знања искустава и научних резултата из области истраживања ове докторске дисертације. На основу спроведене анализе до сада коришћених приступа у овој области и утврђених предности и недостатака, кандидат предлаже и образлаже оригинални, сопствени приступ и метод, који представља предмет истраживања докторске дисертације и спроводи даља теоријска разматрања, лабораторијска истраживања, као и истраживања у реалном индустријском окружењу са постављеним циљем, да се спроведе евалуације предложене метода и потврде могућности њеног коришћења у пракси.

Са аспекта истраживачке области и добијених резултата, ова дисертација представља оригинални научни рад при чему предложени метод, резултати његове евалуације и дефинисани закључци могу имати и општи научни значај и утицај на будућа истраживања.

Главни значај и допринос истраживања у оквиру докторске дисертације јесте предлог примене модификоване CEEMDAN (енгл. Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise) методе за детекцију и дијагностику отказа у котрљајним лежајевима. У поређењу са стандардним методама за обраду сигнала, брзом Фуријеовом трансформацијом (FFT) или са новијим методама, на пример анализом таласићима (енгл. wavelet analysis), CEEMDAN метода предложена у овом истраживању има две значајне компаративне предности. Прво, применљива је за обраду нестационарних и нелинеарних сигнала обзиром да је заснована на локалним карактеристикама сигнала у временском домену. Друго, у потпуности је адаптивна и базирана на подацима, обзиром да не постоји потреба за било каквим претходним избором параметара или неке основе за даљу анализу сигнала, као на пример основног таласића у случају анализе таласићима.

У поређењу са методама заснованим на EMD-у (енгл. Empirical Mode Decomposition), CEEMDAN метода допуњује комплетност EMD-а што је значајно унапређење. Тиме грешка реконструкције постаје безначајна, а такође решен је и проблем различитог броја модова за различите реализације сигнала са шумом. Крајњи резултат предложене методе јесте декомпозиција сигнала слична оној са која се добија применом методе анализе таласићима, а која приказује учестаности почев од виших ка нижим чиме се наглашава померање спектра ка нижим фреквенцијама како ред IMF-ова расте. Међутим, велика разлика између предложене CEEMDAN методе и анализе таласићима



јесте та да се резултату почетних модова и резидуала генерално може дати спектрално значење.

2. **Оцена да је урађена докторска дисертација резултат оригиналног научног рада кандидата у одговарајућој научној области**

Комисија сматра да докторска дисертација кандидата Христоса Тсиафиса, магистар инжењерских наука под називом „**Детекција отказа котрљајних лежајева применом напредних временско-фреквенцијских метода анализе сигнала вибрација**“ представља резултат оригиналног научног рада. Обрађена тема је актуелна и значајна за развој науке у области одржавања ротационих машина, имајући у виду да је велики број отказа поменуте групе техничких система узрокован отказом котрљајних лежајева.

Кандидат је тему посматрао и обрадио са више аспеката полазећи од идеје да обухвати релевантне утицајне елементе и да, у оквиру дисертације, да одређени конкретни научни допринос бољем разумевању и примени предложених метода.

Оригиналност научног рада, истраживања и резултата остварених у оквиру докторске дисертације се огледају у следећим елементима:

- Прегледом и анализом научно-стручне литературе из области примене савремених метода одржавања и тренутних тенденција кандидат указује на следеће чињенице. Машине и механизми који су у употреби постају све комплекснији, а самим тим изложени вишим нивоима оптерећења. Ротационе машине спадају у класу најчешће коришћених техничких система, за које се често захтева комплетна и прецизна документација о вибрационим карактеристикама, укључујући мерења неопходна како би се извршила анализа вибрација вратила, кућишта и котрљајних лежајева. Котрљајни лежајеви, редуктори и ротори су кључне и неизоставне компоненте ротационих машина. Самим тим, стање ових кључних компонената уједно одређује и стање саме ротационе машине. Имају улогу да повежу непокретне и покретне механичке елементе као што су вратила. Котрљајни лежајеви примају оптерећења које се стварају приликом рада машине и преносе их на непокретне делове као што су кућишта редуктора, фундаменти итд. У индустрији, котрљајни лежајеви су основни делови свих обртних машина. Истраживања показују да између 40 % и 50 % свих отказа код ротационих машина настаје као последица проблема на котрљајним лежајевима. Тиме кандидат указује на значај коришћења избора одговарајуће методе техничке дијагностике чијом применом би било могуће идентификовати рану фазу отказа котрљајних лежајева.
- У истраживањима која су доступна у литератури у којима су анализирана стања котрљајних лежајева примењиване су различите методе и технике. Као најчешће коришћени извор информација о стању котрљајног лежаја користи се сигнал вибрација у којем је садржана информација о оштећењу у структури лежаја. У основи, користи се анализа сигнала вибрација у временском домену,

фреквенцијском домену и од скора у временско-фреквенцијском домену за издвајање корисне информације о постојању локализованог оштећења.

- Кандидат предлаже методу детекцију оштећења котрљајних лежајева тзв. метода комплетне ансамбалске емпиријске декомпозиције на модове са адаптивним шумом (енг. Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise – CEEMDAN) која је део унапређене Хилберт-Хунагове трансформације (енг. Hilbert-Huang transformation – ННТ). Филтрирање у фреквенцијском домену се веома тешко примењује у случају нестационарних и нелинеарних сигнала. Ово је претежно последица чињенице да се при фреквенцијској анализи нелинеарних и нестационарних сигнала генеришу хармоници у широком опсегу, тако да било какво филтрирање у фреквенцијском домену елиминише неке од хармоника и потенцијално може да изазове деформацију таласног облика основних модова, уколико се они налазе изван опсега филтрирања.

Анализа сигнала се састоји од два дела. У првом делу се коришћењем CEEMDAN методе сигнал разлаже на серију структурних компонената, познатих као функције сопствених модова, односно IMF-ова (енг. Intrinsic Mode Function – IMF). IMF се дефинише као било која функција која има исти број нула и екстремних вредности, као и симетричну обвојницу дефинисану локалним максимумом и минимумом, респективно.

Други део методе је Хилбертова спектрална анализа (енг. Hilbert Spectral Analysis – HSA) заснована на IMF-овима издвојеним помоћу CEEMDAN методе. На овај начин, спектар се конструише помоћу IMF-ова, чиме се обезбеђује поглед на разматрани проблем из додатне перспективе. Амплитуде и тренутне фреквенције, као и комбинације података из вишеструких IMF-ова се овако добијају у виду једног јасног спектра. Маргинална спектрална анализа се примењује на тачно одређене IMF-ове са фокусом на карактеристичне фреквенције које су неопходне за идентификацију узрочника отказа код котрљајних лежајева. Поред претходно поменуте методе, кандидат предлаже коришћење и тестира погодност коришћења ZAM расподеле (ZAMD) за откривање оштећења лежајева.

- У оквиру истраживачког рада на докторској дисертацију развијен је модел ротационе машине на којој је тестирана примена претходно предложене методе за анализу сигнала вибрација. Истраживања на пробном столу су извршена на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.
- Део експерименталних истраживања, која су се односила на одређивање утицаја ослањања ротационе машине на модове осциловања, кандидат је спровео на Аристотеловом универзитету у Солуну, Грчка под менторством Проф. Томаса Ксеноса. Резултати тих истраживања указују на значајно поклапање учестаности модова осциловања добијених применом ФЕМ анализе и експерименталним истраживањима на реалном моделу.



- Предложену методологију испитивања стања котрљајних лежајева кандидат је спровео на изабраном техничком систему – ламинатору, који спада у једну од најкритичних машина у производном процесу Тетрапака доо из Горњег Милановца. Том приликом кандидат је користио мерну опрему која је била доступна у фабрици (SKF Microlog и софтвер за анализу SKF @plitude Analyst). На основу приказаних резултата кандидат је закључио да је могуће идентификовати учестаности оштећења при примени предложених метода, што нам дозвољава да закључимо да се предложеном методом могуће детектовати оштећења на котрљајним лежајевима из лако читљивих спектра, које могу да разумеју не само квалификоване особе већ и искусни оператори на машинама.

3. Преглед остварених резултата рада кандидата у одговарајућој научној области

Христос Тсиафис (Χρίστος Τσιάφης), маг. инж. маш. рођен је 26.1.1983. године у Солуну, Грчка. Школске 2001/2002. године уписао је академске студије првог степена на „Department of Mechanical Engineering, STA, Technological Education Institute of Central Macedonia“, у граду Серес, Грчка. Овај ниво студија завршава 7.5.2007. године на студијском програму машинског инжењерства са оценом 10 код ментора Проф. др Константино Давида.

Школске 2007/2008. године уписао је мастер студије на „School of Mechanical Engineering, Aristotle University of Thessaloniki“ у Солуну, Грчка на студијском програму машинско инжењерство, а завршио их је дана 30.4.2012. године са мастер радом који је оцењен оценом 10. Ментор је био Проф. др Габриел Мансоур.

У децембру 2013. године укључује се на међународни пројекат FP7, Marie Curie ITN „*INNHF – Innovation through human factors in risk analysis and management*“, као млади истраживач („*early stage researcher*“). У исто време, Христос Тсиафис уписује и докторске студије на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.

Израда докторске дисертације под називом „**Детекција отказа котрљајних лежајева применом напредних временско-фреквенцијских метода анализе сигнала вибрација**“ одобрена је 17.09.2015. године.

У досадашњем научно-истраживачком раду Христос Тсиафис је, као аутор или коаутор, објавио **15 научних радова**, од чега су **3 рада** у научним часописима са рецензијом са SCI листе (један категорије M21 и два категорије M23),

Рад у истакнутом међународном часопису (M21)

- Sasa Randjelovic, Branko Tadic, Petar M. Todorovic, Djordje Vukelic, Danijela Miloradovic, Milan Radenkovic, **Christos Tsiafis**, Modelling of the ball burnishing process with a high-stiffness tool, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.81, No.9-12, pp. 1509-1518, ISSN 0268-3768, Doi 10.1007/s00170-015-7319-4, 2015.

Рад у међународном часопису (M23)

- **Tsiafis Ch.**, Zaharis Z., Xanthopoulou M., Skeberis Ch., Tsiafis I., Todorovic Petar, Xenos Th., Detection of Non-Linear Signal Distortions Due to External Impulse Stimulations in Rolling Bearing Experimental Device, Journal of the Balkan Tribological Association, Vol.21, No.1, pp. 233-245, ISSN 1310-4772, 2015.
- **Tsiafis Ch.**, Tsiafis I., Xanthopoulou M, Todorovic P., Fault Detection and Determination in Ball Bearings Based on EMD and Marginal Spectrum Analysis, Journal of the Balkan Tribological Association, Vol.21, No.4, pp. 982-990, ISSN 1310-4772, 2015.

4. Оцена о испуњености обима у односу на пријављену тему

Докторска дисертација кандидата Христоса Тсиафиса, маг. инж. маш., под насловом „Детекција отказа котрљајних лежачева применом напредних временско-фреквенцијских метода анализе сигнала вибрација“, по обиму и садржају је усклађена са темом одобреном од стране Наставно-научног већа Факултета инжењерских наука и Стручног већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу. У одређеним елементима кандидат је дошао и до додатних сазнања и идеја које је материјализовао кроз проширење обима и опсега спроведених истраживања, што за последицу има и додатне резултате презентоване у дисертацији.

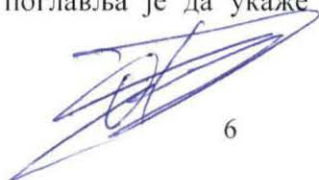
Највећим делом дисертација је проистекла из теоријских и експерименталних истраживања аутора и обраде тако добијених резултата, уз примену информација и практичних сазнања из индустрије, одакле су произашли одговарајући закључци тако да су у целини испуњени сви научни, стручни и законски услови да ова дисертација буде прихваћена.

Резултати истраживања су у писаном делу докторске дисертације изложени на укупно 113 страна. Докторска дисертација садржи 81 слику и 10 табела. Рад чини седам поглавља, тако разврстаних да буду међусобно повезана и представљају једну целину. Према томе, наведена поглавља су сложена према следећем редоследу:

1. Увод
2. Опис проблема
3. Методологија
4. Експериментална истраживања
5. Резултати и дискусија
6. Индустијска примена
7. Закључци

Литература

У првом поглављу је кроз преглед литературе указано на предмет и значај истраживања. Циљ овог поглавља је да укаже на захтеве који сте стављају пред



савремене производне системе, а који доводе до тога да су они све комплекснији и да раде на све већим радним брзинама. Указује се да су котрљајни лежајеви готово најкритичнији елементи савремених, пре свега ротационих машина. Такође се указује на значај примене савремених метода одржавања, пре свега превентивног одржавања према стању, које подразумева примену савремених дијагностичких метода заснованих на мерењу и анализи вибрација. То се потврђује чињеницом да су у сигналу вибрација присутна обележја која могу да укажу на оштећење присутно у котрљајном лежају. У швом поглављу се дате и полазне хипотезе.

У другом поглављу је изложена теоријска основа. Почев од описа метода одржавања и дијагностике, до котрљајних лежајева и њихових особина како би се разумела важност успостављања техника за праћење стања лежајева у свим фазама, од монтаже до замене.

Треће поглавље даје приказаних научне метода које су коришћене у докторској дисертацији. То су Хилберт–Хуангова трансформација (ННТ) и Зао – Атлас – Маркова расподела (енг. Zhao-Atlas-Marks Distribution – ZAMD).

У четвртом поглављу је описана експериментална опрема и начин аквизиције података. У петом поглављу су дати резултати и закључци добијени на основу примене сваке методе.

У шестом поглављу је приказана индустријска примена изложене методе, како би се оценила способност примене у реалним индустријским условима.

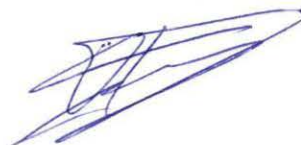
У седмом поглављу су наведени основни закључци до којих је кандидат дошао током теоријских разматрања, као и експерименталних истраживања која су спроведене у лабораторијским условима и реалном индустријском окружењу.

5. Научни резултати докторске дисертације

Кандидат Христос Тсиафис, маг. инж. маш., је у оквиру докторске дисертације извршио систематизацију постојећих теоријских знања и практичних искустава, а везано за рану детекцију отказа котрљајних лежајева применом напредних временско-фреквенцијских метода анализе сигнала вибрација. У току израде докторске дисертације, кандидат је дошао до закључака који имају свој значај и место у научно-истраживачком смислу, о чему сведоче три рада, директно везана за тему доктората, објављена у часописима са СЦИ листе.

Најважнији научни резултати докторске дисертације су:

- Развој и реализација модела ротационе машине који пружа могућност лаке измене котрљајних лежајева који се испитују, задавања жељене вредности радијалног оптерећења, као и варирање броја обртаја у широком опсегу применом одговарајућег типа управљања.



- Предлог примене модификоване CEEMDAN методе за детекцију и дијагностику отказа у котрљајним лежајевима. У поређењу са стандардним методама за обраду сигнала, брзом Фуријеовом трансформацијом (FFT) или са новијим методама, на пример анализом таласићима, CEEMDAN метода предложена у овом истраживању има значајне компаративне предности. Пре свега, применљива је за обраду нестационарних и нелинеарних сигнала обзиром да је заснована на локалним карактеристикама сигнала у временском домену. Поред тога, у потпуности је адаптивна и базирана на подацима, обзиром да не постоји потреба за било каквим претходним избором параметара или неке основе за даљу анализу сигнала, као на пример основног таласића у случају анализе таласићима.
Захваљујући декомпозицији сигнала на структурне компоненте, кандидат је утврдио да су EMD и Хилбертова спектрална анализа поуздани алати за обраду нелинеарних и нестационарних сигнала, будући да омогућавају изучавање сигнала локално, чиме пружају комплетну слику о природи сигнала. Поређење Хилбертових спектра омогућује да се на једноставан начин идентификује развој грешке (потенцијалног оштећења који би довео до отказа) унутар система и да се пређе на деловање у складу са планом и програмом одржавања. CEEMDAN метода доводи до занемарљиве грешке реконструкције сигнала, и способна је за решавање проблема различитих бројева модова или различитих реализација сигнала са шумом.
- Предложена метода обраде сигнала вибрација је верификована на критичном техничком систему – ламинатору у компанији Тетрапак доо из Горњег Милановца.

6. Применљивост и корисност резултата у теорији и пракси

Резултати докторске дисертације кандидата Христоса Тсиафиса, маг. инж. маш., под насловом „Детекција отказа котрљајних лежајева применом напредних временско-фреквенцијских метода анализе сигнала вибрација“, осим теоријског и научног доприноса пружају могућност за директну примену у индустрији у циљу ране детекције отказа код котрљајних лежајева. Инспирација за читаво истраживање проистекла је из директног и непосредног контакта са индустријом и практичног рада кандидата на текућим проблемима у прехранбеној индустрији.

Узимањем, у самом старту, у обзир реалних индустријских проблема, потреба и специфичности, а касније и тестирање предложене методе у реалном индустријском окружењу, учињен је значајан корак у циљу обезбеђивања директне применљивости добијених резултата.



7. Начин презентирања резултата научној јавности

Значајан део научних резултата, који су резултат истраживања добијених израдом ове докторске дисертације већ је презентован објављивањем 3 научна рада у часописима са СЦИ листе. Кандидат је такође објавио и презентовао 5 радова на међународним научним скуповима који су директно везани за истраживања обављеним у оквиру дисертације.

Практични аспекти реализованог научно-истраживачког рада представљени су домаћој и међународној научној и стручној јавности и кроз реализацију међународног пројекта ("*Innovation Through Human Factors in Risk analysis and management*", InnHF-FP7-PEOPLE-2011-ITN-289837), финансираног од стране Европске комисије кроз *Marie Curie* програм.

Комисија сматра да истраживања и резултати докторске дисертације пружају обиман и користан материјал за даље публикување у високо ранжираним међународним научним часописима и на скуповима, који се баве проблематиком, како одржавања, тако и обрадом сигнала вибрација у циљу детекције ране фазе отказа котрљајних лежајева.

На основу свега изложеног Комисија доноси следећи:

ЗАКЉУЧАК

Докторска дисертација кандидата Христоса Тсиафиса, мастер инжењера машинства, у потпуности, како по обиму тако и по квалитету, одговара теми пријављене дисертације, одобрене одлуком број 01-1/3260-23 од 17.09.2015. године, од стране Наставно-научног већа Факултета инжењерских наука у Крагујевцу.

Кандидат је током истраживања користио уобичајену и стандардизовану стручну терминологију, а структура докторске дисертације и методологија излагања су у складу са универзитетским нормама.

Кандидат је показао да влада методологијом научноистраживачког рада и да поседује способност системског приступа, закључивања и коришћења литературе. При томе је, користећи своје професионално образовање и искуство, показао способност да овој сложеној проблематици приступи свеобухватно, у циљу дефинисања закључака и добијања конкретних и у пракси применљивих резултата.

Докторска дисертација је резултат самосталног рада, а добијени резултати представљају веома значајан допринос знањима везаним за рану детекцију стања котрљајних лежајева, а у циљу успешног одржавања производне опреме.



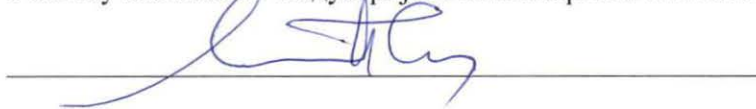
На основу свега изнетог, Комисија за преглед и оцену писаног дела и усмену јавну одбрану докторске дисертације кандидата **Христоса Тснафиса**, мастер инжењера машинства, једногласно је закључила да докторска дисертација под насловом:

„Детекција отказа котрљајних лежајева применом напредних временско-фреквенцијских метода анализе сигнала вибрација”

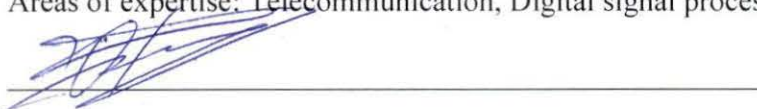
по квалитету, обиму и резултатима истраживања у потпуности испуњава све научне, стручне и законске критеријуме за израду докторске дисертације. Стога Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, да овај Извештај у потпуности прихвати и закаже јавну усмену одбрану наведене дисертације.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ:

1. Др Иван Мачужић, ванредни професор – председник комисије
Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Ужа научна област: Индустрijско инжењерство и инжењерски менаџмент



2. PhD Xenos Thomas, professor – члан
Professor of Electrical and Computer Engineering of the Polytechnic School Aristotle University of Thessaloniki, Greece
Areas of expertise: Telecommunication, Digital signal processing



3. Др Слободан Митровић, редовни професор – члан
Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Ужа научна област: Производно машинство



4. Др Стеван Миљисављевић, ванредни професор – члан
Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду
Ужа научна област: Квалитет, ефективност и логистика



5. Др Фатима Живић, доцент – члан
Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Ужа научна област: Производно машинство



У Солуну, Новом Саду и Крагујевцу,
4. 07. 2018. године