

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА
УНИВЕРЗИТЕТА У КРАГУЈЕВЦУ

Бр. 01-1/1048

30.03.2023 год.
КРАГУЈЕВАЦ

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

Предмет: Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидаткиње Љиљане Брзаковић, дипломираног инжењера машинства

Одлуком Већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу број IV-04-653/26 од 14.09.2022. године, на предлог Наставно-научног већа Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу (одлука бр. 01-1/2585-17 од 25.08.2022. године), именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидаткиње Љиљане Брзаковић, дипломираног инжењера машинства, под насловом:

**„РАЗВОЈ МЕТОДЕ ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ КИНЕМАТСКОГ КОЕФИЦИЈЕНТА ТРЕЊА
ДИНАМИЧКИ ОПТЕРЕЂЕНИХ КОНТАКАТА“**

На основу увида у приложену докторску дисертацију и Извештаја комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације, која је одобрена за израду Одлуком Наставно-научног већа Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу бр. 01-1/2424-17 од 26.08.2021. године и одлуком Већа за техничко-технолошке науке бр. IV-04-680/27 од 14.09.2021. године, на основу Правилника о пријави, изради и одбрани докторске дисертације Универзитета у Крагујевцу, Комисија подноси Наставно-научном већу следећи:

ИЗВЕШТАЈ

1. Опис докторске дисертације

Докторска дисертација кандидаткиње Љиљане Брзаковић, дипл. инж. маш. под насловом „**Развој методе за одређивање кинематског коефицијента трења динамички оптерећених контаката**“, под менторством др Слободана Митровића, редовног професора, представља резултат оригиналног научно-истаживачког рада кандидаткиње у области трибологије а односи се на развој трибометријских метода квантификовања параметара трења на бази диференцијалних једначина кретања.

У оквиру дисертације развија се метода која се односи на одређивање кинематског коефицијента трења преко динамичке једначине кретања при обртању тела, при чему активна сила на обртно тело делује само у тренутку иницирања кретања, док статичку и динамичку компоненту жељеног оптерећења контакта типа "рукавац-лежај" обезбеђују масе тела, концентрично и ексцентрично распоређене у односу на осу обртања. Развијени теоријски модел подразумева експериментално одређивање зависности промене угла обртања тела у функцији времена. На основу динамичке једначине кретања и експериментално одређене зависности промене угла обртања тела у функцији времена, могуће одредити тренутне вредности коефицијента трења у читавом периоду времена, од иницирања кретања до тренутка престанка обртања тела.

У дисертацији су изложени резултати теоријских и експерименталних анализа везаних

за кинематски коефицијент трења котрљајног лежаја у условима мануелног (ручног) иницирања обртног кретања и при иницирању кретања динамичком ударном силом. Након иницирања кретања и престанка дејства спољашње силе (ударног импулса) кретање се наставља, при чему оптерећени лежај (зона лежаја у којој дејствују силе отпора трења) пролази читав спектар брзина, од максималне брзине у тренутку иницирања кретања, до њене нулте вредности при заустављању кретања, при чему се, за разлику од конвенционалних метода, читав мерни систем своди на мерење две основне физичке величине, тојест, на мерење пута и времена. У циљу верификације теоријског модела изведен је обимни програм експерименталних истраживања. Експериментална испитивања изведена су на два наменски развијена уређаја, применом развијеног софтвера, ротационог енкодера и одговарајуће ардуино електронике. Добијени резултати недвосмислено указују на занемарљива одступања од теоријског модела и јачину везе блиске физичком закону. Резултати истраживања приказани у дисертацији компатибилни су са резултатима добијеним применом конвенционалних трибодијагностичких метода и указују на јаку физичку везу коефицијента трења и угаоног убрзања.

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

Развој методе подразумева развој теоријске базе методе, развој прототипа уређаја, развој софтвера и експерименталну верификацију методе. Добијени резултати указују на предности у области могуће примене предложене методе у односу на постојеће, у свету развијене методе, одређивања кинематског коефицијента трења. Метода се разматра у условима динамички оптерећених контаката, који спадају у најкомплексније видове оптерећења, са аспекта дијагностике реалних вредности трибометријских величина. Метода се заснива на одређивању кинематског коефицијента трења преко динамичке једначине кретања при обртању тела, при чему активна сила на обртно тело делује само у тренутку иницирања кретања, док статичку и динамичку компоненту жељеног оптерећења контакта, обезбеђују масе тела, концентрично и ексцентрично распоређене у односу на осу обртања. Поред тога, овом методом је, на основу експериментално одређене зависности угла обртања у функцији времена, могуће одредити и тренутне величине угаоних брзина и угаоних убрзања, тј. угаоних успорења, насталих као последица деловања отпорне силе трења у читавом периоду обртања тела. Такође, могуће је и успоставити зависности између кинематског коефицијента трења и брзина и убрзања у зони самог контакта и пратити њихове промене, што омогућава знатно комплекснију анализу, а што не омогућавају постојеће методе.

Због свега наведеног, Комисија сматра да резултати и закључци ове дисертације отварају простор и правце за даља истраживања у овој научној области.

3. Оцену да је урађена докторска дисертација резултат оригиналног научног рада кандидата у одговарајућој научној области

Докторска дисертација кандидаткиње Љиљане Брзаковић, дипломираног инжењера машинства, под насловом „**Развој методе за одређивање кинематског коефицијента трења динамички оптерећених контаката**” представља резултат оригиналног научно-истраживачког рада у актуелној научној области.

У докторској дисертацији је представљен развој нове методе за одређивање кинематског коефицијента трења преко динамичке једначине кретања при обртању, у оквиру

које је и развој теоријске базе методе, развој прототипа уређаја, развој софтвера и експериментална верификација методе.

Кандидаткиња је детаљно анализирила доступне литературне изворе из разматране области и мада се наводи да је *Euler* још 1748. године публиковао прва теоријска истраживања у вези са одређивањем кинематског коефицијента трења преко динамичке једначине кретања тела низ стрму раван, може се рећи да ова метода до данас није доживела ширу експанзију, како у сфери науке, тако и у сфери технологије пројектовања савремене трибо-дијагностичке опреме.

Метода одређивања кинематског коефицијента трења на бази диференцијалних једначина кретања је у суштини везана за мерење три основне јединице *SI* система мера (маса, времена и дужине), што у теоријском, експерименталном и технолошком смислу представља веома значајну предност.

На основу детаљног прегледа и анализе научних радова из области докторске дисертације може се закључити да постоје значајне разлике у односу на друга научна истраживања, па је у том смислу докторска дисертација оригинална.

Такође, имајући у виду да је:

- са аспекта оригиналности, дисертације позитивно оцењена у Оцени ментора и извештају о провери оригиналности докторске дисертације од 06.03.2023. године,
- и да је кандидаткиња из садржаја и теме дисертације до сада објавила 2 рада у часописима категорије M20,

може се закључити да је дисертација резултат оригиналног научног рада кандидаткиње Љиљане Брзаковић, дипломираног инжењера машинства.

4. Преглед остварених резултата рада кандидата у одређеној научној области

4.1. Биографија кандидаткиње

Кандидаткиња Љиљана Брзаковић, дипломирани инжењер машинства, рођена је 19.11.1968. године у Крушевцу. Основно образовање стекла је у основној школи „Миодраг Чајетинац Чајка“ у Трстенику као носилац дипломе "Вук Караџић", а средњошколско образовање у „Образовном центру Прва петолетка“ у Трстенику на математичко-техничком смеру, са одличним успехом.

Школске 1987/1988. године уписала је академске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду и завршила их на смеру Аутоматско управљање са општим успехом 8,34 (осам и 34/100), а са оценом 10 на дипломском испиту из предмета Биоаутоматика код проф. др Ђуре Коруге.

Школске 2015/2016. године уписала је докторске академске студије машинског инжењерства на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу на смеру Производно машинство. Испите на докторским академским студијама положила је са општим успехом 9,33 (девет и 33/100).

Од 1996. до 2007. била је предузетница – сувласник предузећа за производњу, трговину и услуге "Графопласт" и радила на пословима унутрашњег књиговодства, набавке материјала, продаје, маркетинга.

Од 2007. до 2011. радила је у Техничкој школи у Трстенику као професор машинске групе предмета.

Пред комисијом за полагање испита за лиценцу Министарства просвете, науке и технолошког развоја, 2014. године, положила је испит за дозволу за рад наставника, васпитача

и стручних сарадника (лиценцу) и стекла право да самостално обавља образовно-васпитни рад у оквиру своје струке.

Од 2016. године ангажована је, најпре као сарадник а затим као асистент, у настави на Високој техничкој машинској школи струковних студија у Трстенику, чији се званични назив мења 2020. године у Академија струковних студија Шумадија, Одсек Трстеник.

Као аутор или коаутор објавила је велики број научних радова у научностручним часописима и на међународним и домаћим конференцијама.

4.2. Референце кандидаткиње

Објављени радови кандидаткиње су:

M22 Рад у истакнутом међународном часопису

1. Djordje Vukelić, Branko Tadić, Dragan Džunić, Vladimir Kočović, **Ljiljana Brzaković**, Milutin Živković, Goran Šimunović, Analysis of ball-burnishing impact on barrier properties of wood workpieces, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, ISSN: 0268-3768, Vol.92, pp. 129–138, <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0134-3>, 2017.
2. Vladimir Kočović, Dragan Džunić, Sonja. Kostić, **Ljiljana Brzaković**, Branko Tadić, Miljana Prica, Djordje Vukelić, Investigation into the Effects of Roller Pressing on Hardness, Roughness and Elastic Modulus of Wooden Workpieces, Applied Sciences, Vol.12, No.11, pp. 5575, ISSN: 2076-3417, <https://doi.org/10.3390/app12115575>, 2022.

M23 Рад у међународном часопису

1. **Ljiljana Brzaković**, Vladimir Kočović, Slobodan Mitrović, Nina Busarac, Branko Tadić, A method for determining of kinetic friction coefficient under dynamic loading conditions, Romanian Journal of Physics, Vol.67, No.9-10, 905, pp. 1-14, ISSN 1221-146X, https://rjp.nipne.ro/2022_67_9-10/RomJPhys.67.905.pdf, 2022.
2. **Ljiljana BRZAKOVIC**, Vladimir MILOVANOVIC, Vladimir KOCOVIC, Goran SIMUNOVIC, Djordje VUKELIC, Branko TADIC, Relation between Kinetic Friction Coefficient and Angular Acceleration during Motion Initiated by Dynamic Impact Force, Tehnički vjesnik - Technical Gazette, Vol.29, No.5, pp. 1622-1628, ISSN 1330-3651(Print), ISSN 1848-6339 (Online), <https://doi.org/10.17559/TV-20220408155435>, 2022.

M24 Рад у националном часопису међународног значаја

1. Branko Tadić, Vladimir Kočović, Marija Matejić, **Ljiljana Brzaković**, Milomir Mijatović, Djordje Vukelić, Static Coefficient of Rolling Friction at High Contact Temperatures and Various Contact Pressure, Tribology in Industry, ISSN: 0354-8996 (Print); ISSN: 2217-7965 (Online), Vol. 38, No. 1, pp. 83-89, <http://www.tribology.rs/journals/2016/2016-1/9.pdf>, 2016.
2. Milutin Živković, Marija Matejić, Drago Miljanić, **Ljiljana Brzaković**, Vladimir Kočović, Influence of the Previous Preheating Temperature on the Static Coefficient of Friction with Lubrication, Tribology in Industry, ISSN: 0354-8996 (Print); ISSN: 2217-7965 (Online), Vol. 38, No. 4, pp. 585-589, <https://www.tribology.rs/journals/2016/2016-4/15.pdf>, 2016.

M52 Рад у истакнутом националном часопису

1. Branko Tadić, Marija Matejić, Vladimir Kočović, Bekir Novkinić, **Ljiljana Brzaković**, Goran Šimunović, Djordje Vukelić, Development a group fixture systems for machining centers, Journal of Production Engineering, ISSN: 1821-4932, Vol. 19, No. 1, pp. 69-74, http://www.jpe.ftn.uns.ac.rs/papers/2016/no1/13-Tadic_JPE_19_No1.pdf, 2016.

M63 Саопштење са скупа националног значаја штампано у целини

1. Milomir Mijatović, **Ljiljana Brzaković**, Nikola Kostić, Ekološko energetski aspekti izbora elektromotornih pogona, Naučna konferencija sa međunarodnim učešćem ETIKUM-2016, Novi Sad, Srbija, 23-25 jun, 2016, str. 13-16, ISBN 978-86-7892-826-0, http://www.dpm.ftn.uns.ac.rs/predmeti/Etikum/ETIKUM_2016_Proceedings_Online.pdf.

5. Оцену о испуњености обима и квалитета у односу на пријављену тему

Докторска дисертација кандидаткиње Љиљане Брзаковић, дипломираног инжењера машинства, под насловом „**Развој методе за одређивање кинематског коефицијента трења динамички оптерећених контаката**” одговара по садржају теми прихваћеној од стране Наставно-научног већа Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу бр. 01-1/2424-17 од 26.08.2021. године и Већа за техничко-технолошке науке бр. IV-04-680/27 од 14.09.2021. године. Наслов докторске дисертације, урађена истраживања, као и циљеви проучавања су у складу са онима који су наведени у пријави теме.

Дисертација је написана на 146 страна, садржи 51 слику и 10 табела, а цитирано је 64 библиографских јединица.

Дисертација је организована у 10 поглавља, литература и прилог односно:

1. Уводна разматрања;
 2. Трибологија као наука и технологија;
 3. Теоријске основе предложене методе;
 4. План и програм експерименталних испитивања;
 5. Пројектовање прототипа уређаја;
 6. Развој наменског софтвера;
 7. Резултати експерименталних истраживања;
 8. Статистичка обрада и анализа резултата експерименталних истраживања;
 9. Дискусија;
 10. Закључци;
- Литература;
Прилог.

Поглавље 1 дефинише предмет и циљеве дисертације, као и основне хипотезе од којих се полази. Поред тога, објашњен је научни допринос рада, као и основне предности предложене методе.

У поглављу 2 је приказано текуће стање истраживања у области трибometriје, назначено је да се развојем савремене трибодијагностичке опреме баве многи светски институти и специјализовани произвођачи и да су истраживања усмерена на развој нових решења и усавршавање и стандардизацију постојећих. У овом поглављу је описан и преглед постојеће литературе и описане су претходне студије о испитивању трења контактних површина.

У поглављу 3 су дате теоријске основе предложене методе.

Идеја предложене методе своди се на чињеницу да се познавањем (праћењем и мерењем) промене угла обртања у функцији времена, преко диференцијалне једначине кретања тела при обртању око непомичне осе, могу одредити тренутне вредности кинематског коефицијента трења у читавом спектру брзина обртања кроз које тело пролази од тренутка иницирања кретања до тренутка престанка обртања.

У овој докторској дисертацији разматрају се само два од већег броја могућих случајева

иницирања кретања и постизања динамичког оптерећења клизних или котрљајних контактних парова. Први разматрани случај се односи на мануелно (ручно) иницирање кретања. У овом случају разматра се контакт, типа „рукавац – лежај“. Статичку и динамичку компоненту жељеног оптерећења контакта, обезбеђују масе тела, концентрично и ексцентрично распоређене у односу на осу обртања. Други разматрани случај односи се на могућност одређивања кинематског коефицијента трења котрљања у условима иницирања обртног кретања динамичком ударном силом. Након иницирања кретања и престанка дејства спољашње силе (ударног импулса), кретање се наставља, при чему оптерећени лежај (зона лежаја у којој дејствују силе отпора трења) пролази читав спектар брзина, од максималне брзине у тренутку иницирања кретања, до њене нулте вредности при заустављању кретања.

У четвртном поглављу је представљен план и програм експерименталних испитивања. Пројектована су и реализована два прототипа уређаја при чему је омогућено извођење обимног програма експерименталних истраживања која су реализована кроз више од 60 независних експеримената и то:

- При ручном иницирању кретања изведено је укупно 10 независних експеримената,
- При иницирању кретања мањом енергијом импулсне силе удара (Слободни пад масе од 0,048 kg са висине 0,21 m) изведено је укупно 30 независних експеримената,
- При иницирању кретања већом енергијом импулсне силе удара (Слободни пад масе од 0,048 kg са висине 1.21 m) изведено је укупно 20 независних експеримената.

У оквиру петог поглавља су описани реализовани прототипови два уређаја.

Поглавље 6 описује развој наменског софтвера који треба да посредством *arduino* електронике омогући добијање и обраду нумеричких вредности промене угла, угаоне брзине, угаоног убрзања и коефицијента трења у функцији услова оптерећења контаката. Приказан је алгоритам тока софтверске подршке мерном систему уређаја.

Резултати ових истраживања приказани су у оквиру седмог поглавља.

Поглавље 8 приказује статистичку обраду и анализу резултата експерименталних истраживања.

Поглавље 9 се бави дискусијом добијених резултата.

У поглављу 10 су дата закључна разматрања резултата добијених у оквиру ове докторске дисертације, као и правци будућих истраживања.

У завршном поглављу представљен је списак литературе која је коришћена при изради докторске дисертације.

Као прилог је дат комплетан приказ наменски развијеног софтвера.

На основу свега наведеног, Комисија сматра да докторска дисертација по обиму истраживања и квалитету добијених резултата у потпуности испуњава постављене циљеве и одговара пријављеној теми дисертације.

6. Научни резултати докторске дисертације

Кандидаткиња Љиљана Брзаковић, дипломирани инжењер машинства је у оквиру своје докторске дисертације под називом „Развој методе за одређивање кинематског коефицијента трења динамички оптерећених контаката” систематизовала постојећа знања везана за предметну проблематику и верификовала предложену методу одређивања кинематског коефицијента трења динамички оптерећених контаката засновану на диференцијалној једначини кретања тела при обртању око непомичне осе. Верификација теоријског модела изложеног у оквиру трећег поглавља рада изведена је реализацијом обимног програма експерименталних истраживања изведеним на два наменски развијена уређаја са софтверском подршком и одговарајућом мерном и управљачком електроником. Нивои разлика теоријски дефинисаних и експериментално добијених вредности параметара трења (коефицијента трења и енергије расуте у процесу трења) су занемарљивог реда величине. То недвосмислено указује на јачину теоријски дефинисане везе ранга физичког закона и физички јаку везу угаоног убрзања и коефицијента трења. При чему се коефицијент трења може дефинисати као производ константе и угаоног убрзања, што је у раду и показано низом примера.

Ова чињеница даје посебну научну димензију овој дисертацији и отвара широк простор за даља истраживања и имплементацију методе у сфери развоја савремене трибодијагностичке опреме.

7. Примењивост резултата у теорији и пракси

Резултати докторске дисертације кандидаткиње применљиви су и корисни како у области теоријских истраживања тако и у области развоја савремене трибодијагностичке опреме. Теоријски дефинисана и експериментално верификована веза коефицијента трења и угаоног убрзања отвара широк простор за имплементацију предложене методе при квантификавању трења на реалним индустријским трибомеханичким паровима типа рукавац/лежај, што може бити веома значајан искорак у области трибометрије и трибодијагностике на реалним индустријским трибомеханичким системима преноса снаге и кретања.

8. Начин презентовања резултата научној јавности

Део научних резултата кандидаткиње, већ је верификован објављивањем научно-стручних радова у међународним и националним научним часописима. Кандидаткиња је као непосредни резултат рада на дисертацији објавила два рада у међународним часописима категорије M23:

1. **Ljiljana Brzaković**, Vladimir Kočović, Slobodan Mitrović, Nina Busarac, Branko Tadić, A method for determining of kinetic friction coefficient under dynamic loading conditions, Romanian Journal of Physics, Vol.67, No.9-10, 905, pp. 1-14, ISSN 1221-146X, https://rjp.nipne.ro/2022_67_9-10/RomJPhys.67.905.pdf, 2022.
2. **Ljiljana BRZAKOVIC**, Vladimir MILOVANOVIC, Vladimir KOCOVIC, Goran SIMUNOVIC, Djordje VUKELIC, Branko TADIC, Relation between Kinetic Friction Coefficient and Angular Acceleration during Motion Initiated by Dynamic Impact Force, Tehnički vjesnik - Technical Gazette, Vol.29, No.5, pp. 1622-1628, ISSN 1330-3651(Print), ISSN 1848-6339 (Online), <https://doi.org/10.17559/TV-20220408155435>, 2022.

У овим радовима кандидаткиња је приказала део методологије, која је развијена у оквиру дисертације.

Комисија сматра да истраживања и још необјављени резултати ове докторске дисертације пружају обиман и користан материјал за даље објављивање у међународним и водећим националним часописима и скуповима.

ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ КОМИСИЈЕ

Докторска дисертација кандидаткиње Љиљане Брзаковић, дипломираног инжењера машинства, под насловом „Развој методе за одређивање кинематског коефицијента трења динамички оптерећених контаката”, под менторством др Слободана Митровића, редовног професора, одговара прихваћеној теми од стране Наставно-научног већа Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.

Кандидаткиња је у приказу свог рада користила одговарајућу стандардизовану стручну терминологију, а структура докторске дисертације и методологија излагања су у складу са универзитетским нормама.

Докторска дисертација по квалитету, обиму и приказаним резултатима истраживања у потпуности задовољава законске услове и универзитетске норме прописане за израду докторске дисертације.

Кандидаткиња је показала да влада методологијом научно-истраживачког рада и поседује способности системског приступа и коришћења литературе. При томе је, користећи своје професионално образовање, показала способност да сложеној проблематици приступи свеобухватно, у циљу добијања конкретних и применљивих резултата.

С обзиром на актуелност проблематике која је обрађена и остварене резултате, чланови Комисије сматрају да кандидаткиња Љиљана Брзаковић, дипломирани инжењер машинства, и поднета докторска дисертација, испуњавају све услове, који се у поступку оцене писаног дела докторске дисертације захтевају Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Крагујевцу и Статутом Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.

На основу свега наведеног, Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидаткиње Љиљане Брзаковић, дипломираног инжењера машинства, предлаже Наставно-научном већу Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу и Већу за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу да докторску дисертацију кандидаткиње под називом:

**„РАЗВОЈ МЕТОДЕ ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ КИНЕМАТСКОГ КОЕФИЦИЈЕНТА
ТРЕЊА ДИНАМИЧКИ ОПТЕРЕЂЕНИХ КОНТАКАТА“**

прихвате као успешно урађену и да кандидаткињу позову на јавну одбрану докторске дисертације.

У Крагујевцу и Новом Саду, март 2023. године.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

1.



др Ђорђе Вукелић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, уже научне области: Метрологија, квалитет, еколошко инжењерски аспекти, алати и прибори, **председник Комисије**

2.



др Бранко Тадић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Универзитет у Крагујевцу, уже научне области: Производно машинство и индустријски инжењеринг, **члан Комисије**

3.



др Владимир П. Миловановић, ванредни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Универзитет у Крагујевцу; уже научна област: Експериментална механика, **члан Комисије**