

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ФАКУЛТЕТА ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА
ВЕЋУ ЗА ТЕХНИЧКО-ТЕХНОЛОШКЕ НАУКЕ
УНИВЕРЗИТЕТА У КРАГУЈЕВЦУ

На седници Наставно-научног већа Факултета инжењерских наука у Крагујевцу одржаној 18. 03. 2021. године (број одлуке: 01-1/734-24) и на седници Већа за техничко-технолошке науке одржаној 14. 04. 2021. године (број одлуке: IV-04-275/18) одређени смо за чланове Комисије за подношење извештаја за оцену научне заснованости теме и испуњености услова кандидата за израду докторске дисертације: „Развој методе за одређивање кинематског коефицијента трења динамички оптерећених контаката“ која припада научној области Машинско инжењерство кандидата Љиљане Брзаковић, дипл. инж. маш. На основу података којима располажемо достављамо следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Научни приступ проблему предложеног нацрта докторске дисертације и процена научног доприноса крајњег исхода рада

Истраживања на тему докторске дисертације припадају трибологији као интердисциплинарној науци и технологији, посвећеној интеракцији контактних површина при релативном кретању и последицама које се могу разматрати од нано и микро нивоа, па све до нивоа националних економија.

Метода се разматра у условима динамичких оптерећења контакта, која спадају у најкомплексније видове оптерећења, са аспекта дијагностике реалних вредности трибометријских величина. Наиме, кинематски коефицијент трења се, генерално посматрано, у свим условима оптерећења контакта, може одредити другачијим методама у односу на постојеће методе које се заснивају на мерењу нивоа оптерећења контакта и мерењу силе трења. Метода која се предлаже односи се на одређивање кинематског коефицијента трења преко динамичке једначине кретања при обртању, 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. Ако се експерименталним путем одреди зависност промене угла обртања тела у функцији времена, онда је на основу динамичке једначине кретања могуће одредити тренутне вредности коефицијента трења у читавом периоду од иницирања кретања до тренутка престанка обртања тела. 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.

Имајући у виду приказ проблема проучавања, полазне хипотезе и предложене научне методе истраживања, приказани нацрт докторске дисертације садржи све елементе који су потребни да би се у изради докторске дисертације дао научни допринос, значајан за даљи развој научних истраживања у домену одређивања кинематског коефицијента трења у широком распону нивоа динамичких оптерећења.

Веза са досадашњим истраживањима

Трибологија као наука и технологија данас доживљава пуну експанзију у области трибо-дијагностике и развоја савремених мерних система. Разлози су првенствено у чињеници да су за анализу и квантификовање сложених триболошких процеса неопходни поуздани мерни уређаји и машине. Трибологија је, као наука и технологија, управо због сложености процеса који се одвијају у зонама контаката, великим делом заснована на експерименталним методама истраживања. Савремене методе експерименталних истраживања, поред захтева поузданости мерних система, постављају и низ других сложених захтева и ограничења. Све то намеће сталну потребу за развојем нових и усавршавањем постојећих мерних уређаја и машина, не само у ужој области мерног система и пратећег софтвера, већ и у области самих принципа, односно физике процеса. Триболошка истраживања експерименталног типа у садашње време нису само потреба истраживачких институција, већ и великог броја производних предузећа која увиђају да им је то неопходно за опстанак на светском тржишту. Велики број предузећа, па чак и националних истраживачких и образовних институција, не поседује савремене мерне уређаје неопходне за триболошка испитивања (квантификовање основних триболошких карактеристика или комплекснија истраживања). Факултет инжењерских наука у Крагујевцу је већ дуги низ година језгро триболошких истраживања, не само на нивоу Србије, већ и на нивоу старе Југославије, па и много шире. Велики број истраживача, велики број објављених радова у врхунским светским часописима и на иностраним и домаћим конференцијама, као и велики број успешно реализованих пројеката, представљају битан предуслов за успешну реализацију предстојећих истраживања. На Факултету инжењерских наука у Крагујевцу у последњих 20 година реализован је већи број сложених трибометара. Не мали број реализованих трибометара пласиран је на домаћем и иностраном тржишту.

Развој савремене мерне опреме за трибо-дијагностику је комплексна и интердисциплинарна област истраживања. У принципу, напредну трибо-дијагностичку опрему реализују специјализоване институције и произвођачи иза којих стоје године теоријског и експерименталног рада, не само у области трибологије, већ и у многим областима тангентним са проблематиком савремених мерних система. Проблематиком развоја трибометара и остале трибо-дијагностичке опреме данас се у свету баве истраживачки тимови који поседују висок ниво теоријских знања из многих области трибологије, као и експерименталног знања и искуства из области трибометрије и трибо-дијагностике; висок ниво знања из базичних наука, као што су: динамика сложених система, термодинамика, електроника, конвенционални и савремени материјали и друге науке, али и висок ниво специјализованог знања и искуства из области пројектовања сложених мерних система, савремених давача за мерење сила, померања температура и других физичких величина; висок ниво знања из области програмирања и развоја савремених софтверских пакета. Такође, истраживачки

тимови у свету поседују и неопходни софтвер и лабораторијску опрему, велики број информација о трендовима и достигнућима у области развоја савремене трибодиагностичке опреме, креативни дух и организационе способности које могу ујединити енергију већег броја компетентних истраживача и исту усмерити према жељеном циљу.

Истраживањима у области развоја савремене трибодиагностичке опреме баве се многи светски институти и специјализовани произвођачи. У најкраћим цртама, истраживања су усмерена на усавршавање и стандардизацију постојећих решења и развој нових решења.

Велики број постојећих светских решења трибометара је стандардизован (ASTM и ISO стандарди) према условима остваривања контаката, као на пример трибометри: TE 53 Multi-Purpose Friction and Wear Tester, TE 54 Mini Traction Machine, TE 55 Lubricity Test Machine, TE 56 Multi-Station Block on Ring Machine, TE 57 Pressurized Lubricity Tester и многи други трибометри. Ове конструкције трибометара се и данас усавршавају, највише у погледу софтверских решења и побољшања техничких карактеристика (повећање нивоа оптерећења, повећање брзина клизања и котрљања, повећање радних температура, вакуумских комора и др.). У великом броју случајева из већ стандардизованих решења трибометара настају трибометри високо побољшаних перформанси који су намењени истраживањима у знатно ширем опсегу оптерећења, брзина клизања и котрљања, радних температура, услова подмазивања, присуства абразива и сл. Присутан је и одређени број решења трибометара који покривају више типова контаката. Та решења су универзалнијег карактера и врло често су пројектована по систему модуларног пројектовања. Постоји такође велики број специјалних решења (конструкција) трибометара намењених триболошким испитивањима зупчастих парова, тврдих превлака, пластичних маса и других материјала. У свету је развијен и велики број трибометара намењених испитивању триболошких карактеристика материјала у вакууму, као и трибометара намењених за испитивања у условима екстремно високих температура и притисака контактних парова. Развој нанотрибометрије, као посебне области трибологије, иницирао је развој великог броја високо софистицираних решења нанотрибометара.

Развој нових решења трибометара је у великом делу инициран је развојем нових материјала и превлака, посебним условима оптерећења, агресивном средином и другим специфичним условима.

Феномен трења и закон о одржању енергије представљају фундаменталне проблеме у физици, са широком применом у многим областима инжењерства. Ипак, показало се да и у индустријски развијеним земљама постоје потешкоће у суштинском сагледавању феномена трења^{1,2,3,4,5,6}. То указује на потребу да се анализа сила и трансформације и

¹ Besson, U., Borghi, L., De Ambrosis, A., Mascheretti, P., How to teach friction: Experiments and models, American Journal of Physics, ISSN 0002-9505, Vol. 75, No. 12, pp. 1106-1113, 2007. doi: 10.1119/1.2779881

² Logman, P. S. W. M., Kaper, W., Ellermeijer, T., Evaluation of the learning process of students reinventing the general law of energy conservation, Eurasia Journal of Mathematics Science and Technology Education, ISSN 1305-8215, Vol. 11, No. 3, pp. 479-504, 2015. doi: 10.12973/eurasia.2015.1323a

расипања енергије употпуни демонстрирањем везе између познатих теоријских знања и резултата који се добијају путем експеримента. Аутори са универзитета широм света предлажу и развијају у својим лабораторијама разноврсна решења за овај проблем, примењујући различите приступе анализи феномена трења.

Rabinowicz⁷ је још 50-их година применио једноставну методу, базирану на кретању тела низ стрму раван, како би измерио енергију коју једно тело треба да преда другом телу да би се оно покренуло. Утврђена је критична почетна удаљеност, на којој метална кугла треба да буде постављена у односу на металну коцку на стрмој равни, при којој, након удара кугле у коцку, долази до иницирања кретања металне коцке. Затим је успостављена веза између критичне почетне удаљености кугле и коцке и граничне вредности микро померања коцке, при којој је статички коефицијент трења још увек довољно већи од кинетичког коефицијента трења, односно при којој је спречено кретање коцке низ стрму раван. Употребом оптерећења од 1 kg и различитих металних површина, утврђено је да статички коефицијент трења при граничним вредностима микро померања коцке већим од реда величине 10⁻⁴ cm постепено опада, достижући вредности које одговарају кинематском коефицијенту трења.

Mungan⁸ је развио једноставан модел за предвиђање коефицијента трења котрљања беспогонских лабораторијских колица која се крећу низ стрму раван. За одређивање односа између силе трења и нормалне силе развио је универзалну једначину и утврдио да је код лабораторијских колица тај однос једнак коефицијенту трења котрљања, услед малог удела масе точкава у укупној маси колица. Са друге стране, при котрљању објеката у облику цилиндра или сфере, трење котрљања неће бити доминантно у односу на статичко трење, услед значајног деловања статичке силе трења. Поједини експерименти базирају се на проучавању убрзања које беспогонска лабораторијска колица добијају при кретању уз и низ стрму раван⁹, док други користе принцип очувања енергије за предвиђање удаљености на којој ће се објекат зауставити након

³ Solbes, J., Guisasola, J., Tarín, F., Teaching energy conservation as a unifying principle in physics. *Journal of Science Education and Technology*, ISSN 1059-0145, Vol. 18, No. 3, pp. 265-274, 2009. doi: 10.1007/s10956-009-9149-3

⁴ De Ambrosis, A., Malgieri, M., Mascheretti, P., Onorato, P., Investigating the role of sliding friction in rolling motion: a teaching sequence based on experiments and simulations, *European Journal of Physics*, ISSN 0143-0807, Vol. 36, No. 3, pp. 035020, 2015. doi: 10.1088/0143-0807/36/3/035020

⁵ Wulandari, P. S., Cari, C., Aminah, N. S., Nugraha, D. A., PRE-SERVICE TEACHERS' CONCEPTUAL UNDERSTANDING OF ROLLING FRICTION COEFFICIENT. *AIP Conference Proceedings*, 2014, April 4-7, pp. 020060 (2018), ISBN 978-0-7354-1255-2, doi: 10.1063/1.5054464

⁶ Minkin, L., Sikes, D., Coefficient of rolling friction-Lab experiment, *American Journal of Physics*, ISSN 0002-9505, Vol. 86, No. 1, pp. 77-78, 2018. doi: 10.1119/1.5011957

⁷ Rabinowicz, E. (1951). The nature of the static and kinetic coefficients of friction. *Journal of applied physics*, ISSN 0021-8979, Vol. 22, No. 11, pp. 1373-1379, 1951. doi: 10.1063/1.1699869

⁸ Mungan, C. E., (2012). Rolling friction on a wheeled laboratory cart, *Physics Education*, ISSN 0031-9120, Vol. 47, No. 3, pp. 288, 2012. doi: 10.1088/0031-9120/47/3/288

⁹ Larson, R. F., Measuring the coefficient of friction of a low-friction cart, *The Physics Teacher*, ISSN 1943-4928, Vol. 36, No. 8, pp. 464-465, 1998. doi: 10.1119/1.879928

кретања низ стрму раван и пореде израчунате вредности са вредностима измереним током извођења експеримената¹⁰.

Bartos & Musilova¹¹ су приказали неколико експеримената који се примењују за демонстрацију ротационог кретања у оквиру наставе из области механике. Закон о одржању механичке енергије и једначине кретања су представљали основу за примену два различита квантитативна приступа одређивању силе статичког трења. На тај начин демонстрирана је и анализирана законитост према којој хомогени метални цилиндар, код којег се јавља мањи момент инерције у односу на осу ротације него код шупљег металног цилиндра идентичних димензија и масе, постиже веће вредности убрзања при котрљању низ дрвену површину под нагибом од 30°. Улогом силе статичког трења, која при котрљању тела повећава брзину ротације, а смањује брзину трансляторног кретања, бави се и Cross¹². Како би демонстрирао утицај разлике између статичког трења и трења котрљања на кретање кугле дуж хоризонталне и дуж стрме равни, он користи подлогу од меког материјала, чиме постиже веће вредности коефицијента трења. При малим нагибима стрме равни, кугла ће се после неког времена зауставити, као што се зауставља при кретању по хоризонталној површини од меког материјала. При кретању низ стрму раван, сила статичког трења има две компоненте: прва је пропорционална нагибу и спречава да услед дејства силе гравитације дође до клизања, односно омогућава котрљање тела; друга компонента не зависи од нагиба, присутна је и код кретања по хоризонталној површини и представља силу трења котрљања. Cross закључује да су „губици“ енергије директно пропорционални коефицијенту трења котрљања и да се јављају услед ширења и скупљања тела, због чега се тачка у којој делује нормална сила реакције незнатно помера ближе предњем крају области контакта између тела и површине по којој се оно креће.

Bacon¹³ користи нагиб стрме равни за иницирање кретања кугле која, по напуштању стрме равни, наставља да се котрља хоризонтално до ивице стола и затим пада. Угаона брзина је одређивана експериментално, а затим су вршена поређења са теоријским прорачуном. Анализа висине коју ће кугла достићи крећући се најпре низ једну стрму раван, а затим уз другу, наспрамно постављену стрму раван, омогућава да се уоче разлике између теоријских предвиђања, базираних на принципу очувања енергије, и резултата добијених експерименталним путем¹⁴. Експерименти показују да је висина

¹⁰ Saddleback College Physics Department. Sliding friction and Conservation of Energy – Physics Laboratory Exercise. Retrieved from https://www.saddleback.edu/uploads/mse/physics/4A_labs/sliding%20friction%20and%20conservation%20of%20energy.pdf

¹¹ Bartoš, J., Musilová, J., Small surprises in 'rolling-physics' experiments, European journal of physics, ISSN 0143-0807, Vol. 25, No. 5, pp. 675, 2004. doi: 10.1088/0143-0807/25/5/010

¹² Cross, R., Rolling to a stop down an inclined plane, European Journal of Physics, ISSN 0143-0807, Vol. 36, No. 6, pp. 065047, 2015. doi: 10.1088/0143-0807/36/6/065047

¹³ Bacon, M. E., How balls roll off tables, American journal of physics, ISSN 0002-9505, Vol. 73, No. 8, pp. 722-724, 2005. doi: 10.1119/1.1947198

¹⁴ Domenech, A., Domenech, T., Cebrian, J., Introduction to the study of rolling friction. American Journal of Physics, ISSN 0002-9505, Vol. 55, No. 3, pp. 231-235, 1987. doi: 10.1119/1.15223

коју ће кугла достићи крећући се уз другу стрму раван увек мања од висине са које је започела кретање низ прву стрму раван, иако би, у идеалном случају, висине требало да буду једнаке. На основу експериментално добијених резултата, израчунате су вредности коефицијента трења за различите материјале површина по којима се куглица креће, различите радијусе куглице и различите вредности угла нагиба равни. Аутори су предложили и области дидактичке примене наведене методе демонстрирања и анализе утицаја трења котрљања на кретање тела. У дидактичке сврхе креиран је и једноставан лабораторијски сет, чија примена се заснива на анализи осцилаторног кретања металне кугле по дрвеној или пластичној конкавној подлози малог угиба⁷.

Трење има широку примену у бројним гранама индустрије, због чега је познавање утицаја трења на интеракције између површина од различитих материјала у различитим условима експлоатације од фундаменталног значаја у многим областима инжењерства. Имајући у виду све већу примену уређаја који функционишу у условима високог вакуума, па самим и тим и значај познавања триболошких карактеристика материјала од којих се такви уређаји израђују, Тадић и др.¹⁵ су се бавили мерењем силе трења која делује на заптивку (заптивни прстен) пнеуматског цилиндра у условима високог вакуума. Резултати експеримената, спроведених на уређају развијеном за потребе овог истраживања, указују на значајан утицај који имају нивои вакуума и брзина кретања клипа на силу трења.

Проучавање трења има веома дугу историју и ослања се на везу између теоријских законитости и реалне примене у индустрији². Ојлер је дефинисао закон трења у раду објављеном 1748. године "On the Decrease in Friction Resistance", више деценија пре него што је Кулон (који се најчешће сматра оснивачем науке о трењу) објавио своје најзначајније радове. Ојлер-Њутнов закон трења ушао је у историју као један од најчешће примењиваних закона у инжењерским прорачунима¹⁶. Ојлеров рад из 1850. године "On the friction of solid bodies"¹⁷ даје анализу експеримената базираних на кретању тела дуж стрме равни. Раван се из почетне хоризонталне позиције доводи у позицију са одређеним нагибом, који је довољан да тело започне кретање низ раван. Ојлер је изразио коефицијент трења у функцији времена и његова формула омогућава да се на основу експерименталних мерења одреди кинематски коефицијент трења.

У сфери науке, мањи број публикованих истраживања (претежно у часописима који покривају област едукације и физике) базира се на Ојлеровим истраживањима или је тангентан са њима. Један од ретких радова који се базира, не на стрмој равни, већ на Ојлеровој идеји да се преко диференцијалне једначине кретања одреди кинематски коефицијент трења објављен је у тематском часопису из области трибологије Journal of

¹⁵ Tadic, B., Zivkovic, M., Simunovic, G., Kocovic, V., Saric, T., Vukelic, D., The Influence of Vacuum Level on the Friction Force Acting on the Pneumatic Cylinder Sealing Ring, Tehnički vjesnik, ISSN 1330-365, Vol. 126, No. 4, pp. 970-976, 2019. doi: 10.17559/TV-20180227172122

¹⁶ Zhuravlev, V. P., On the history of the dry friction law, Mechanics of solids, ISSN 0025-6544, Vol. 48, No. 4, pp. 364-369, 2013. doi: 10.3103/S002565441304002X

¹⁷ Euler, L., Sur le frottement des corps solides, Memoires de l'academie des sciences de Berlin, pp. 122-132, 1750. Retrieved from <http://eulerarchive.maa.org/>

Friction and Wear¹⁸. У циљу проучавања трења које се јавља између зрна гранулираног материјала при његовом кретању, Михајловић и др.¹⁸ су развили методу и физички модел вибрационе платформе. При томе је, теоријски и експериментално, доказано да се преко динамичке једначине кретања поуздано може одредити коефицијента трења између зрна песка и сита у реалним условима рада вибрационе платформе. Резултати ових истраживања указују да се коефицијент трења, и у овом, иначе веома комплексном процесу, може одредити на бази диференцијалне једначине кретања грануле песка. Добијени резултати су веома компатибилни са резултатима добијеним стандардним и знатно сложенијим методама приказаним у радовима^{19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29}. Ова истраживања се базирају на Ојлеровим истраживањима, али уједно и генерализују примену методе на знатно сложеније триболошке процесе у односу на изучавање трења при кретању тела низ стрму раван.

¹⁸ Mihajlović, G., Gašić, M., Savković, M., Mitrović, S., Tadić, B., Vibroplatform modeling with allowance for tribological aspects. *Journal of Friction and Wear*, ISSN 1068-3666, Vol. 38, No. 3, pp.184-189, 2017. doi: 10.3103/S1068366617030102

¹⁹ Gallas, J., Herrmann, H., and Sokolowski, S., Convection cells in vibrating granular media, *Phys. Rev.Lett.*, ISSN 1079-7114, Vol. 69, No. 9, pp. 1371–1374, 1992. doi: 10.1103/PhysRevLett.69.1371

²⁰ Knight, J., Jaeger, H., and Nagel, S., Vibration induced size separation in granular media: The convection connection, *Phys. Rev. Lett.*, ISSN 1079-7114, Vol. 70, No. 24, pp. 3728–3731, 1993. doi: 10.1103/PhysRevLett.70.3728

²¹ Luo, Z., Fan, M., Zhao, Y., Tao, X., Chen, Q., and Chen, Z., Density-dependent separation of dry fine coal in a vibrated fluidized bed, *Powder Technol.*, ISSN 0032-5910, Vol. 187, No. 2, pp. 119–123, 2008. doi: 10.1016/j.powtec.2008.02.001

²² Majid, M. and Walzel, P., Convection and segregation in vertically vibrated granular beds, *Powder Technol.*, Vol. 192, No. 3, pp. 311–317, 2009. doi: 10.1016/j.powtec.2009.01.012

²³ Pak, H., van Doorn, E., and Behringer, R., Effects of ambient gases on granular materials under vertical vibration, *Phys. Rev. Lett.*, ISSN 1079-7114, Vol. 74, No. 23, pp. 4643–4646, 1995. doi: 10.1103/PhysRevLett.74.4643

²⁴ Hsiau, S.-S., Wang, P.-C., and Tai, C.-H., Convection cells and segregation in a vibrated granular bed, *AIChE J.*, ISSN 0001-1541, Vol. 48, No. 7, pp. 1430–1438, 2002. doi: 10.1002/aic.690480707

²⁵ Knight, J., External boundaries and internal shear bands in granular convection, *Phys. Rev. E*, ISSN 2470-0045, Vol. 55, No. 5, pp. 6016–6023, 1997. doi: 10.1103/PhysRevE.55.6016

²⁶ Yang, X., Zhao, Y., Zhou, E., Luo, Z., Fu, Z., Dong, L., and Jiang, H., Kinematic properties and beneficiation performance of fine coal in a continuous vibrated gasfluidized bed separator, *Fuel*, ISSN 0016-2361, Vol. 162, pp. 281–287, 2015. doi: 10.1016/j.fuel.2015.09.036

²⁷ Tai, C., Hsiau, S., and Kruelle, C., Density segregation in a vertically vibrated granular bed, *Powder Technol.*, ISSN 0032-5910, Vol. 204, Nos. 2–3, pp. 255–262, 2010. doi: 10.1016/j.powtec.2010.08.010

²⁸ Laurentie, J., Traoré, P., Dascalescu, L., Discrete element modeling of triboelectric charging of insulating materials in vibrated granular beds, *J. Electrostat.*, ISSN 0304-3886, vol. 71, no. 6, pp. 951–957, 2013. doi: 10.1016/j.elstat.2013.08.001

²⁹ Moysey, P., Rama Rao, N. and Baird, M., Dynamic coefficient of friction and granular drag force in dense particle flows: experiments and DEM simulations, *Powder Technol.*, ISSN 0032-5910, Vol. 248, pp. 54–67, 2013. doi: 10.1016/j.powtec.2013.01.005

Са теоријског аспекта, а посебно са аспекта могућности индустријске примене, метода има велике предности. У радовима^{30,31,32} приказани су теоријски модели, софтверски алгоритми, реализовани уређаји и компатибилност резултата експерименталних истраживања са резултатима добијеним на уређајима конвенцијалног типа. Наиме, у наведеним радовима је показано да се по предложеној методи, преко знатно једноставнијих технолошких решења и техника мерења, могу одредити коефицијенти трења котрљања при високим температурама и малим контактним притисцима³⁰, коефицијенти трења у навојним спојевима³¹, и квантификовати веома мале вредности "губитака" механичке енергије, настали као последица расипања енергије при трењу котрљања, при чему су квантификовани губици реда величине $0,01 \text{ J}^{32}$, што са аспекта трибometriје представља веома сложен проблем.

2. Образложење предмета, метода и циља који уверљиво упућују да је предложена тема од значаја за развој науке

Предмет, циљеви и хипотезе ове дисертације обухватају следеће

Предмет рада је развој нове методе за одређивање кинематског коефицијента трења преко динамичке једначине кретања при обртању. Развој методе подразумева: развој теоријске базе методе, развој прототипа уређаја, развој софтвера и експерименталну верификацију методе.

Циљ рада је да се на основу добијених резултата укаже на предности и области могуће примене предложене методе у односу на постојеће у свету развијене методе одређивања кинематског коефицијента трења.

Докторска дисертација се базира на следећим полазним хипотезама:

1. Кинематски коефицијент трења се, генерално посматрано, у свим условима оптерећења контакта, може одредити другачијим методама у односу на постојеће методе које се заснивају на мерењу нивоа оптерећења контакта и мерењу силе трења.
2. Кинематски коефицијент трења се може одредити на бази диференцијалне једначине кретања тела приликом његовог обртања око непомичне осе и у условима сложених динамичких оптерећења контакта.

Методе истраживања

Методе које ће бити примењене у истраживањима на тему ове дисертације су:

³⁰ Jeremic, B., Vukelic, D., Todorovic, P.M., Macuzic, I., Pantic, M., Dzunic, D., Tadic, B., Static friction at high contact temperatures and low contact pressure, J. Friction Wear, ISSN 10683666, Vol. 34, pp. 114–119, 2013. doi: 10.3103/S1068366613020037

³¹ Miljojković J., Erić M., Košarac A., Kočović V., SOFTVERSKA PODRŠKA UREĐAJU ZA ISPITIVANJE GUBITAKA USLED TRENJA U NAVOJNIM SPOJEVIMA, 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije SPMS 2018, Kragujevac, 2018, Oktobar 25-26, pp. 235-240, ISBN 978-86-6335-057-1

³² Miljojković J., Kostić S., Kočović V., Tadić B., QUANTIFICATION OF ENERGY LOSSES IN REAL MECHANICAL SYSTEMS, XXVI Skup Trendovi razvoja – Inovacije u modernom obrazovanju, Kopaonik, 2020, Februar 16-19, pp. 230-233, ISBN 978-86-6022-241-3

1. Метода теоријске анализе диференцијалне једначине кретања тела око непомичне осе при динамичким оптерећењима у зонама реалног контакта, у присуству сила трења и силе отпора ваздуха.

2. Теоријска анализа везана за нивое и расподеле могућих грешака мерења.

3. Методе везане за теорију експеримента које укључују креирање концепта експеримента, избор мерне инструментације, пројектовање прототипа уређаја, израду софтвера, као и низ математичко-статистичких метода које ће послужити за приказ и анализу добијених резултата мерења.

Оквирни садржај докторске дисертације

Планирано је да дисертација буде разматрана кроз целине:

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

3. Образложење теме за израду докторске дисертације које омогућава закључак да је у питању оригинална идеја или оригиналан начин анализирања проблема

У нацрту докторске дисертације наведено је да је планиран развој нове методе за одређивање кинематског коефицијента трења преко динамичке једначине кретања при обртању. Развој методе подразумева: развој теоријске базе методе, развој прототипа уређаја, развој софтвера и експерименталну верификацију методе. Добијени резултати треба да укажу на предности и области могуће примене предложене методе у односу на постојеће у свету развијене методе одређивања кинематског коефицијента трења

Мада је Ојлер 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. Решење ове нелинеарне динамичке

једначине (одређивање закона промене угла обртања у времену, закона промене брзина и убрзања и закона промене силе трења) дефинисаће понашање тела које се креће након иницирања кретања тј. понашање тела након дејства импулсне силе. При томе, обртно тело и зоне контаката у којима настаје трење током кретања и успорења, пролазе кроз широк спектар динамичког оптерећења, брзина и убрзања.

Прелиминарна теоријска и експериментална истраживања везана за развој методе за одређивање кинематског коефицијента трења у условима динамичких оптерећења већ су изведена, а добијени резултати су у потпуности испунили очекивања. Добијене вредности коефицијента трења котрљања или клизања веома су блиске вредностима и динамици промене коефицијената трења у времену, који се добијају при одређивању коефицијента трења у идентичним условима на уређајима који функционишу на принципу мерења нивоа оптерећења контакта и силе трења.

Предложена метода се може ефикасно применити за одређивање кинематског коефицијента трења у широком распону нивоа динамичких оптерећења и брзина клизања или котрљања у зони контакта.

Комисија закључује да је предложена тема, са образложеним предметом, циљевима и очекиваним резултатима, а која је произашла из прегледа доступних научних радова објављених у научним и стручним часописима, као и на међународним конференцијама, оригинална идеја кандидата Љиљане Брзаковић.

4. Усклађеност дефиниције предмета истраживања, основних појмова, предложене хипотезе, извора података, метода анализе са критеријумима науке уз поштовање научних принципа у изради коначне верзије докторске дисертације

Кандидат Љиљана Брзаковић, дипл. инж. маш., је у пријави теме докторске дисертације обухватила све елементе савременог научноистраживачког рада. Образложењу предмета истраживања приступљено је систематично, на бази опсежног прегледа литературних извора и препознавања изражених трендова и потреба у области истраживања. Користећи одговарајућу терминологију и поштујући критеријуме науке, кандидат је дефиниције предмета и циљева истраживања ускладио са предложеним хипотезама, примењујући адекватне научне методе истраживања.

5. Преглед научно-истраживачког рада кандидата

а. Кратка биографија кандидата

Кандидат 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 а дана 27.06.2005. године завршила студије на Машинском факултету Универзитета у Београду на смеру Аутоматско управљање са општим

успехом 8,34 (осам и 34/100). На дипломском испиту из предмета Биоаутоматика код проф. др Ђуре Коруге добила је оцену 10 (десет).

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 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. У овој високошколској установи ради као асистент и активно учествује у извођењу наставе на предметима: Машински материјали, Техничко цртање, Термодинамика, Техничка физика, Основи хидраулике и пнеуматике, Основи аутоматског управљања и Трибологија.

6. Научно-истраживачки рад

Кандидаткиња је објавила 5 радова у научно-стручним часописима као и на међународним и домаћим научно-стручним скуповима.

• Списак објављених радова

M22 Рад у истакнутом међународном часопису

1. Vukelić Đorđe, Tadić Branko, Džunić Dragan, Kočović Vladimir, **Brzaković Ljiljana**, Živković Milutin, Šimunović Goran, Analysis of ball-burnishing impact on barrier properties of wood workpieces, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, ISSN 0268-3768, Vol.92, No.1-4, pp. 129–138, 2017. doi: 10.1007/s00170-017-0134-3

M24 Рад у часопису међународног значаја верификованог посебном одлуком

1. Tadić Branko, Kočović Vladimir, Matejić Marija, **Brzaković Ljiljana**, Mijatović Milomir, Vukelić Đorđe, Static Coefficient of Rolling Friction at High Contact Temperatures and Various Contact Pressure, Tribology in Industry, ISSN: 0354-8996, Vol. 38, No. 1, pp. 83-89, 2016.

2. Živković Milutin, Matejić Marija, Miljanić Drago, **Brzaković Ljiljana**, Kočović Vladimir, Influence of the Previous Preheating Temperature on the Static Coefficient of Friction with Lubrication, Tribology in Industry, ISSN: 0354-8996, Vol. 38, No. 4, pp. 585-589, 2016.

M52 Рад у истакнутом часопису националног значаја

1. Tadić Branko, Matejić Marija, Kočović Vladimir, Novkinić Bekir, **Brzaković Ljiljana**, Šimunović Goran, Vukelić Đorđe, Development a group fixture systems for machining centers, Journal of Production Engineering, ISSN 1821-4932, Vol. 19, No. 1, pp. 69-74, 2016.

M63 Саопштење са скупа националног значаја штампано у целини

1. Mijatović Milomir, **Brzaković Ljiljana**, Kostić Nikola, EKOLOŠKO ENERGETSKI ASPEKTI IZBORA ELEKTROMOTORNIH POGONA, Naučna konferencija sa međunarodnim učešćem ETIKUM-2016, Novi Sad, 2016, 23-25 jun, str. 13-16, ISBN 978-86-7892-826-0

6. Предлог за ментора са његовим референцама којима се доказује испуњеност услова за менторство

Комисија предлаже да ментор ове докторске дисертације буде др Слободан Митровић, редовни професор Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.

Проф. др Слободан Митровић је објавио више од 240 научних радова, међу којима је 17 радова категорије M21, 2 рада категорије M22 и 16 радова категорије M23.

Референце којима се доказује испуњеност услова за менторство

1. **S. Mitrovic**, D. Adamovic, F. Zivic, D. Dzunic, M. Pantic: Friction and Wear Behavior of Shot Peened Surfaces of 36CrNiMo4 and 36NiCrMo16 Alloyed Steels under Dry and Lubricated Contact Conditions, Applied Surface Science, Volume 290, Issues 1, pp. 223–232, ISSN 0169-4332, 2014.[M21]
2. I. Bobić, J. Ružić, B. Bobić, M. Babić, A. Vencl, **S. Mitrović**: Micro structural characterization and artificial aging of compo casted hybrid A356/SiCp/Grp composites with graphite macro particles, Materials Science and Engineering A, Volume 612, pp. 7–15, ISSN: 0921-5093, 2014.[M21]
3. I. Bobic, M. Babic, A. Vencl, B. Bobic, **S. Mitrovic**: Artificial aging of thixocast ZA27 alloy and particulate ZA27/SiCp composites, International Journal of Materials Research. Volume 104, Issue 10, pp. 954-965, ISSN 1862-5282, 2013.[M22]
4. B. Stojanovic, M. Babic, **S. Mitrovic**, A. Vencl, N. Miloradovic, M. Pantic: Tribological Characteristics of Aluminium Hybrid Composites Reinforced with Silicon Carbide and Graphite, Journal of Balkan tribological association, Vol. 19, No 1, pp 83-96, ISSN 1310-4772, 2013. [M23]
5. **S. Mitrović**, M. Babić, F. Zivić, I. Bobić, D. Džunić, M. Pantić: Influence Of Al₂O₃ Particle Content On The Sliding Wear Behaviour Of Za-27 Alloy Composite, Journal of the Balkan Tribological Association, Vol. 18, No 4, pp 548–558, ISSN 1310-4772, 2012.[M23]

На основу свега наведеног у претходним тачкама овог извештаја Комисија доноси следећи

ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ КОМИСИЈЕ

Љиљана Брзаковић, дипломирани инжењер машинства, испунила је све предвиђене услове за одобрење израде докторске дисертације.

Комисија предлаже Наставно-научном већу Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу и Већу за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу да наведену предложену тему за докторску дисертацију:

„Развој методе за одређивање кинематског коефицијента трења динамички оптерећених контаката“

прихвати и одобри њену израду кандидату **Љиљани Брзаковић**, дипломираном инжењеру машинства.

Комисија предлаже да ментор ове докторске дисертације буде др Слободан Митровић, редовни професор Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.

У Крагујевцу, 07.05.2021. год.

КОМИСИЈА



Др Бранко Тадић, редовни професор, председник комисије
Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу
Уже научне области: Производно машинство, Индустрijски инжењеринг



Др Слободан Митровић, редовни професор, члан
Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу
Уже научна област: Производно машинство



Др Ђорђе Вукелић, редовни професор, члан
Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Уже научне области: Метрологија, квалитет, еколошко инжењерски
аспекти, алати и прибори