

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 21.09.2023. године (број одлуке: 01-1/3209-21) и на седници Већа за техничко-технолошке науке одржаној 18.10.2023. (број одлуке: IV-04-775/15) именовани смо за чланове Комисије за подношење извештаја за оцену научне заснованости теме и испуњености услова кандидата и ментора за израду докторске дисертације под насловом:

„ИСТРАЖИВАЊЕ ТЕРМИЧКЕ СТАБИЛНОСТИ ЦИКЛОРЕДУКТОРА“

у научној области Машинско инжењерство, ужа научна област: Машинске конструкције и механизација, кандидата Милана Васића, мастер инжењера машинства. На основу података којима располажемо достављамо следећи

ИЗВЕШТАЈ

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

У предложеном нацрту докторске дисертације, кандидат је образложио предмет и циљеве рада, наводећи актуелности, значај и оправданост истраживања у области циклоредуктора.

Предмет предложене докторске дисертације јесте теоријско, нумеричко и експериментално истраживање термичке стабилности циклоредуктора и идентификовање критичних зона са аспекта загревања.

Иако су планетарни и таласни (хармонијски) редуктори до скоро били незаменљиви представници високопрецизних редуктора (енг. *high precision reducers*), последњих година далеко су најзаступљенији циклоредуктори¹, који имају убрзани развој и све већу перспективу у савременој индустрији. О значају улоге ових преносника снаге на Индустрију 4.0 најбоље говоре подаци из једног од новијих извештаја о савременим индустријским трендовима у коме се наводи да 35% трошкова од укупне цене индустријских робота управо чине високопрецизни редуктори, јер се налазе у готово свим њиховим зглобовима². Укупна вредност глобалног тржишта високопрецизних редуктора процењена је на 3307,68

¹ Pham A. D., Ahn, H. J., High Precision Reducers for Industrial Robots Driving 4th Industrial Revolution: State of Arts, Analysis, Design, Performance Evaluation and Perspective, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, Vol. 5, 2018, pp. 519–533, DOI: <https://doi.org/10.1007/s40684-018-0058-x>

² Research In China, 2020. Global and China Industrial Robot Speed Reducer Industry Report 2020-2026.

милиона долара у 2021. години³ и предвиђа се да ће достићи 6073,93 милиона долара до 2027. године⁴ захваљујући великом обиму продаје индустријских робота у свету.

У поређењу са осталим високопрецизним редукторима, циклоредуктори имају читав низ веома добрих радних карактеристика као што су: компактна конструкција и мала маса, велики дијапазон могућих преносних односа, висок степен искоришћења, веома дуг и поуздан радни век, изузетна прецизност, низак ниво буке и вибрација⁵.

Готово сви преносници снаге, а самим тим и циклоредуктори, углавном раде у нестационарним радним условима, са краткотрајним и дуготрајним преоптерећењима, израженим променама радних режима и честим покретањима и заустављањима што, директно или индиректно, изазива читав низ проблема као што су:

- прекомерно загревање,
- смањење степена искоришћења,
- смањење вискозности мазивог средства, односно дебљине уљног филма,
- убрзано хабање и трошење радних површина елемената у контакту,
- скраћење радног века средства за подмазивање, као и заптивних елемената,
- појава нежељених термичких дилатација, што у крајњем исходу доводи до нарушавања геометријске компактности конструкције.

Будући да се оптимално подмазивање изабраним мазивим средством може обезбедити само у одговарајућем подручју радне температуре, за испуњење радне функције циклоредуктора изузетно важну улогу има његова термичка стабилност.

С обзиром да се један део механичке енергије која се у току рада претвара у топлотну енергију складишти у самим елементима циклоредуктора, да се други део зрачењем и конвекцијом предаје околини, а преостала топлотна енергија се провођењем преноси на суседне елементе, термичка стабилност циклоредуктора може се обезбедити само уколико одведена топлотна енергија буде једнака механичкој енергији која се у току рада претвара у топлотну, односно уколико је радна температура мања или једнака дозвољеној. Из тих разлога, кућиште редуктора треба да буде тако димензионисано и пројектовано да складишти и расипа највећи део топлотне енергије без постизања критичних температура чак и у најекстремнијим радним условима. Осим тога, постоји потреба да се на елементима циклоредуктора још у фази конструисања идентификују критичне зоне са аспекта

³ International Federation of Robotics, 2022. Building Resilience for Europe through Automation.

⁴ Industrial Robotics Market, 2022. Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2022 - 2027).

⁵ Maccioni L., Concli F., Blagojević M., A new three-stage gearbox concept for high reduction ratios: Use of a nested-cycloidal architecture to increase the power density, Mechanism and Machine Theory, Vol. 181, 2023. pp. 105203, ISSN 0094-114X, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.105203>

загревања и да се благовремено изврше потребне корекције без скувих и дуготрајних испитивања прототипа.

У данашње време не постоји методологија која систематски изучава и проверава термичку стабилност циклоредуктора. Међутим, како је провера термичке стабилности конвенционалних зупчастих редуктора дефинисана међународним стандардом ISO/TR 14179-2:2001⁶, могуће је, уз одговарајућу аналогију и прилагођавање користити исти стандард као полазну основу.

Узимајући у обзир претходно наведено, кандидат је предложио програм истраживања у наведеној области, који је у складу са савременим научним методама. Истраживање подразумева формирање одговарајућег математичког и нумеричког модела, као и њихову верификацију упоређивањем добијених резултата са експериментално добијеним резултатима. Циљ је да се на овај начин, у функцији различитих улазних параметара одреде вредности контактних сила на контактним површинама спрегнутих елемената, развије допуњени и свеобухватни математички модел за одређивање губитака снаге и степена искоришћења, дефинише методологија за проверу термичке стабилности циклоредуктора према стандарду ISO/TR 14179-2:2001, развије сложени тродимензионални нумерички модел за одређивање напонско-деформационо стања виталних елемената циклоредуктора без и са утицајем термичких напрезања, као и за анализу расподеле температуре у комплетном преноснику.

Имајући у виду приказ проблема проучавања, полазне хипотезе и предложене научне методе истраживања (аналитичке, статистичке, нумеричке и експерименталне), 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 области циклоредуктора. Поред научно значајних резултата, очекује се и велики допринос самој инжењерској пракси, посебно у процесу пројектовања циклоредуктора.

Очекивани научни доприноси и резултати дисертације су:

- Формирана база најпознатијих и најчешће коришћених концепцијских решења циклоредуктора.
- Развијен алгоритам за одређивање вредности стварних контактних оптерећења на виталним елементима циклоредуктора.
- Унапређена постојећа методологија за одређивање парцијалних губитака снаге и степена искоришћења циклоредуктора.
- Развијен алгоритам за проверу термичке стабилности циклоредуктора према стандарду ISO/TR 14179-2:2001.

⁶ ISO/TR 14179-2, Gears — Thermal capacity — Part 2: Thermal load-carrying capacity, 2001.

- Развијен тродимензионални нумерички модел за напонско – деформациону анализу виталних елемената циклоредуктора као и за анализу његове термичке стабилности коришћењем МКЕ.
- Експериментална верификација резултата добијених аналитичким и нумеричким путем и идентификација критичних локација на елементима једноступеног циклоредуктора са аспекта загревања.

Веза са досадашњим истраживањима

Увидом у објављене радове у научним и стручним часописима, као и радове објављене на међународним конференцијама може се закључити да се кандидат Милан Васић, маг. инж. маш., бавио проучавањем циклоредуктора, што представља добру основу за реализацију ове докторске дисертације. Осим тога, предложена докторска дисертација омогућава кандидату да оствари даљи континуитет у свом истраживачком раду, што поред стручног усавршавања самог кандидата има за циљ и могућност примене развијене методологије у индустрији циклоредуктора.

Анализом актуелне литературе у области високопрецизних преносника снаге коју је кандидат користио при писању пријаве теме докторске дисертације, долази се до закључка да је сам предмет истраживања предложене дисертације недовољно истражен, што јасно указује да је ова тема изузетно актуелна и значајна, како за тренутни, тако и за будући развој циклоредуктора.

Најзначајнији и најбитнији радови из предметне области докторске дисертације, као и добра основа за наставак научног рада кандидата Милана Васића су:

(*A. Mihailidis, et al. 2015*⁷) представља истраживање тренутне расподеле температуре (енг. *flash temperature*) на додирним површинама циклозупчаника и одговарајућих елемената у контакту, узимајући у обзир брзине клизања, геометрију контактних површина, неутновско понашање средства за подмазивање и притисак у уљном филму. Иако је време деловања ове температуре врло кратко, њен интензитет је значајно већи од температуре средства за подмазивање и може да изазове читав низ нежељених последица.

(*M. Zah, et al. 2012*⁸) представља истраживање у коме је успостављена директна зависност између раста температуре мазивог средства у односу на температуру околине и губитака снаге при стационарним радним условима (константни број обртаја и константни обртни момент). С обзиром да се у представљеном математичком моделу топлотна енергија одводи у околину само преко равне површине кућишта, потпуно је извесно да би се

⁷ Mihailidis A., Athanasopoulos E., Okkas E., Flash temperature in cycloid reducers, Journal of the Balkan Tribological Association, Vol. 21, No. 1, 2015, pp. 76-89, ISSN: 1310-4772

⁸ Zah M., Lates D., Csibi, V., Thermal calculation for planetary cycloidal gears with bolts, Acta Universitatis Sapientiae-Electrical & Mechanical Engineering, Vol. 4, 2013, pp. 103-110

добијени резултати радне температуре циклоредуктора разликовали од измерене. Међутим, и поред тога, овај модел је веома значајан јер представља почетак разматрања термичке стабилности циклоредуктора.

(*K. Olejarczyk, et al. 2017*⁹) представља истраживање степена искоришћења и радне температуре за различите врсте мазивог средства (минерална и синтетичка уља). На основу резултата овог истраживања може се одредити време које је потребно за стабилизацију температуре мазивог средства.

(*K. Olejarczyk, et al. 2019*¹⁰) представља истраживање губитака снаге који настају у зони контакта (оних који зависе и оних који не зависе од оптерећења), као и одређивање укупног степена искоришћења циклоредуктора за различите врсте лежаја ексцентар чауре (котрљајни и клизни). Теоријски добијени резултати степена искоришћења који су упоређени са експериментално добијеним резултатима имају добро слагање.

(*S. V. Thube u T. R. Bobak, 2012*¹¹) представља анализу напонско – деформационог стања виталних елемената циклоредуктора у софтверском пакету *Ansys* у функцији различитих кинематских параметара. Резултати овог истраживања указују на критичне локације на виталним елементима циклоредуктора са аспекта носивости.

Осим наведених радова, истраживање у оквиру предложене теме докторске дисертације ослањаће се и на истраживања представљена у следећим литературним изворима:

- [1] Maccioni L., Concli F., Blagojević M., A new three-stage gearbox concept for high reduction ratios: Use of a nested-cycloidal architecture to increase the power density, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 181, 2023. pp. 105203, ISSN: 0094-114X, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.105203>
- [2] ISO/TR 14179-2, Gears — Thermal capacity — Part 2: Thermal load-carrying capacity, 2001.
- [3] Bednarczyk S., Determining Power Losses in the Cycloidal Gear Transmission Featuring Manufacturing Deviations, *Proceedings of the 14th International Scientific Conference „Computer Aided Engineering“*, Wroclaw, Poland, 2018, June, pp. 55-63, ISBN 978-3-030-04974-4
- [4] Bednarczyk S., Analysis of the cycloidal reducer output mechanism while taking into account machining deviations, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part*

⁹ Olejarczyk K., Wiklo M., Kolodziejczyk K., Krol K., Nowak R., Experimental impact studies of the application mineral oil and synthetic oil on the efficiency of the single-gear cycloidal. *Tribologia*, Vol.271, No.1, 2017, pp.67-73

¹⁰ Olejarczyk K., Wiklo M., Kolodziejczyk K., The cycloidal gearbox efficiency for different types of bearings— Sleeves vs. needle bearings, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol.233, No.21-22, 2019, pp. 7401–7411, DOI: <https://doi.org/10.1177/095440621985>

¹¹ Thube S. V., Bobak, T. R., Dynamic analysis of a cycloidal gearbox using finite element method, *AGMA Technical Paper*, 2012, pp. 1-13

C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 235, No. 23, 2021, pp. 7299-7313, ISSN 0954-4062, DOI: <https://doi.org/10.1177/09544062211016889>

- [5] Concli F., Maccioni L., Gorla C., Power loss analysis of different high-power density gearbox typologies: CFD analysis and experimental measurements on a cycloidal gear set, 8th International Conference on Gear Production, Munich, Germany, 2019, 18th to 20th September, pp. 101-114
- [6] Mihailidis A., Athanasopoulos E., Agouridas K., EHL film thickness and load dependent power loss of cycloid reducers, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 230, No. 7-8, 2016, pp. 1303-1317, ISSN 0954-4062, DOI: <https://doi.org/10.1177/0954406215612815>
- [7] Li W., Hu, Y., Thermal analysis of cycloidal gear for the RV reducer, Journal of Harbin Engineering University, Vol. 38, No. 10, 2017, pp. 1560-1567, DOI: <http://dx.doi.org/10.11990/jheu.201605085>
- [8] Sun X., Han L., A new numerical force analysis method of CBR reducer with tooth modification, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series, Vol. 1187, No. 3, 2019, pp. 032053 - 1-8, DOI [10.1088/1742-6596/1187/3/032053](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1187/3/032053)
- [9] Pham A. D., Ahn H. J., Rigid precision reducers for machining industrial robots, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 22, No. 8, 2021, pp. 1469-1486, DOI: <https://doi.org/10.1007/s12541-021-00552-8>
- [10] Paschold C., Sedlmair M., Lohner T., Stahl, K., Efficiency and heat balance calculation of worm gears, Forschung im Ingenieurwesen, Vol. 84, No. 2, 2020, pp. 115-125, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10010-019-00390-1>

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

Предмет, циљеви и хипотезе ове дисертације обухватају следеће

Предмет предложене докторске дисертације јесте теоријско, нумеричко и експериментално истраживање термичке стабилности циклоредуктора и идентификовање критичних зона са аспекта загревања.

С обзиром на велики број различитих концепцијских решења циклоредуктора који имају веома значајну и све већу примену у савременој инжењерској пракси, акценат истраживања у оквиру предложене докторске дисертације биће на класичним једностепеним циклоредукторима. Развијена методологија за одређивање основних параметара термичке стабилности циклоредуктора моћи ће да се користи и за анализу било ког другог концепцијског решења.

Будући да је претварање механичке енергије у топлотну локалног карактера и да се јавља само у зони оптерећења као последица појаве трења на контактним површинама

спрегнутих елемената, теоријска истраживања у предвиђеној дисертацији ће првенствено обухватити одређивање вредности стварних контактних сила, узимајући у обзир кориговање профила зупца циклозупчаника, контактне деформације и унутрашње зазоре између елемената циклоредуктора. Како вредности контактних сила директно утичу на интензитете извора топлоте који се дефинишу у нумеричкој анализи, веома је важно доћи до њихових што тачнијих вредности. Теоријска основа за ова истраживања је класична Херцова теорија контакта (енг. *Hertz*), која се заснива на утврђеној зависности између геометрије контактних површина и релативног померања елемената у контакту. Како су вредности контактних сила временски зависне од угла заокретања циклозупчаника, на основу математичког модела који ће бити развијен у оквиру предложене докторске дисертације, биће могуће одредити који су елементи циклоредуктора тренутно у контакту и преносе одговарајуће оптерећење у сваком тренутку спрезања. Ту се пре свега мисли на централне и излазне ваљке, као и на зупце циклозупчаника, чији је профил еквилидистанта скраћене епитрохоиде.

Осим наведеног, теоријска истраживања обухватиће и одређивање губитака снаге који настају у зони контакта (оних који зависе, и оних који не зависе од оптерећења), као и одређивање укупног степена искоришћења циклоредуктора. Анализом стања досадашњих истраживања, коју је кандидат обавио при изради пријаве теме докторске дисертације, долази се до закључка да сви развијени математички модели обухватају само одређене губитке снаге који према ауторима доминантно утичу на степен искоришћења, док остале губитке занемарују. Због тога постоји потреба да се развије допуњени и свеобухватни математички модел за одређивање степена искоришћења циклоредуктора, који ће узети у обзир све релевантне утицајне параметре и на основу кога ће се добити знатно прецизнији резултати. Будући да је провера термичке стабилности конвенционалних зупчастих редуктора дефинисана међународним стандардом ISO/TR 14179-2:200, теоријска истраживања обухватиће и развој методологије за проверу термичке стабилности циклоредуктора која ће бити усклађена са истим стандардом.

Нумеричка истраживања биће реализована применом Методе коначних елемената (МКЕ) на тродимензионалном геометријском CAD моделу једностепеног циклоредуктора који ће по својим карактеристикама готово у потпуности одговарати испитиваном циклоредуктору (радне карактеристике, габаритне димензије, карактеристике материјала, ...). Реч је о развоју веома сложеног тродимензионалног нумеричког модела који први пут (бар према доступној светској литератури) при анализи напонско – деформационог стања виталних елемената циклоредуктора без и са утицајем термичких напрезања полази од реалне конструкције једностепеног циклоредуктора са два циклозупчаника. На основу развијеног модела биће могуће одредити и интензитете контактних сила као и расподелу температуре у комплетном преноснику.

Да би се резултати истраживања добијени аналитичким и нумеричким путем верификовали, предвиђена је реализација експерименталних истраживања. Циљ је да се

на овај начин одреде: температура мазивог средства, расподела температуре кућишта, као и степен искоришћења испитиваног циклоредуктора. Затим је предвиђено поређење свих резултата добијених аналитичким, нумеричким и експерименталним методама.

Основни циљеви предложене докторске дисертације су:

- Систематизација, означавање и упоредна анализа најраспрострањенијих концепцијских решења циклоредуктора.
- Одређивање вредности стварних контактних сила на контактним површинама спрегнутих елемената циклоредуктора, узимајући у обзир кориговање профила зупца циклозупчаника, контактне деформације и унутрашње зазоре између одговарајућих елемената.
- Развој допуњеног и свеобухватног математичког модела за одређивање губитака снаге у циклоредуктору као и степена искоришћења у функцији различитих улазних параметара.
- Дефинисање методологије за проверу термичке стабилности циклоредуктора према стандарду ISO/TR 14179-2:2001.
- Развој сложеног тродимензионалног нумеричког модела за одређивање напонско – деформационог стања виталних елемената циклоредуктора (без и са утицајем термичких напрезања) као и за анализу његове термичке стабилности применом Методе коначних елемената (МКЕ).
- Експериментална анализа термичке стабилности циклоредуктора (на оригиналном моделу једноступеног циклоредуктора ће се одредити: температура мазивог средства, расподела температуре кућишта и укупни степен искоришћења циклоредуктора).

На основу дефинисаног предмета и циља рада, резултата других аутора и сопствених прелиминарних теоријских истраживања, кандидат је формирао основне хипотезе од којих полази и то:

- Могуће је развити допуњени математички модел за одређивање степена искоришћења циклоредуктора, који узима у обзир шири спектар утицајних фактора и на основу кога ће се добити прецизнији резултати у односу на већ постојеће моделе.
- Могуће је формирати математички модел и дефинисати методологију за проверу термичке стабилности циклоредуктора у складу са међународним стандардом ISO/TR 14179-2:2001 који би имао адекватну примену у инжењерској пракси.
- На термичку стабилност циклоредуктора поред радних карактеристика коришћеног мазивог средства и различитих геометријских и кинематских параметара, изузетно велики утицај има и тренутни број ваљака (централних и излазних) који учествује у процесу преношења оптерећења.
- Применом методе коначних елемената (МКЕ) могуће је моделирати сложена термичка стања циклоредуктора и одредити расподелу температуре у комплетном преноснику са циљем идентификације критичних локација са аспекта загревања.

- Експерименталним истраживањима је могуће одредити расподелу температуре кућишта испитиваног једностепеног циклоредуктора.

Методe истраживања

Кандидат ће за реализацију докторске дисертације користити аналитичке, статистичке, нумеричке и експерименталне методе.

Будући да је на почетку истраживања неопходно извршити систематизацију и упоредну анализу најчешће коришћених концепцијских решења циклоредуктора са аспекта њихових радних карактеристика и основних геометријских и кинематских параметара, а на основу каталога водећих светских произвођача (*Nabtesco, Sumitomo, Spinea, Onvio*), користиће се статистичке методе.

За прорачун стварних контактних оптерећења на додирним површинама спрегнутих елемената, за прорачун губитака снаге и степена искоришћења циклоредуктора, као и за проверу термичке стабилности циклоредуктора, користиће се аналитичке методе. С обзиром да код циклоредуктора постоји велики број контактних зона и да су вредности контактних сила временски зависне од угла заокретања циклозупчаника, решавање оваквих математичких модела је незамисливо без свеобухватне примене рачунара и одговарајућих софтвера, поготово што у обзир треба узети и утицај кориговања профила циклозупчаника (еквидистанте скраћене епитрохоиде), контактне деформације и остале утицајне параметре. Због тога ће се у ту сврху користити програмски пакет *Matlab*. После реализованих симулација, статистичким методама биће извршена обрада добијених аналитичких резултата и анализа истих.

У савременој инжењерској пракси нумеричке методе су постале неизоставан алат за анализу понашања сложених машинских система у различитим радним условима. Посебно је значајна Метода коначних елемената (МКЕ), јер се овом методом још у фази развоја производа могу решавати реални инжењерски проблеми са веома комплексном геометријом и спољашњим оптерећењима. Геометријски модел једностепеног циклоредуктора биће креиран у програмском пакету *SolidWorks*. Реч је о веома сложеном тродимензионалном моделу који узима у обзир реалну конструкцију циклоредуктора са два циклозупчаника по једном степену преноса. За нумеричку анализу креираног модела циклоредуктора користиће се софтвер *Ansys* (модули *Transient Thermal* и *Static Structural*). Неопходно је реализовати три анализе. Прва анализа (*Static Structural*) ће се користити за одређивање вредности контактних сила у контактним зонама спрегнутих елемената циклоредуктора као и за анализу напонско-деформационог стања истих. Друга анализа (*Transient Thermal*) ће се користити за одређивање расподеле температуре у комплетном преноснику у функцији времена. За ову анализу неопходно је дефинисати изворе топлоте који су претходно добијени аналитичким путем. Јачина извора топлоте зависи и од контактних оптерећења одређених у првој анализи. Трећа анализа (*Static Structural*) ће се користити за одређивање вредности контактних оптерећења уз присуство термичких

напрезања. За трећу анализу неопходни су резултати из друге анализе (*Transient Thermal*). Развијени нумерички модел биће искоришћен за анализу утицаја различитих радних, геометријских и кинематских параметара на термичку стабилност циклоредуктора. После извршених симулација, статистичким методама ће бити извршена обрада добијених нумеричких резултата и анализа истих.

Експериментална истраживања биће изведена у *Лабораторији за машинске конструкције Машинског факултета у Нишу* на испитном столу прилагођеном потребама ове докторске дисертације. За потребе испитивања термичке стабилности једностепеног циклоредуктора према предвиђеном плану биће дефинисани меродавни тестови по којима ће се испитивања реализовати. Тестови имају за циљ да квантификују појединачне радне, геометријске и кинематске параметре и њихов утицај на термичку стабилност испитиваног преносника. Једна група тестова ће се заснивати на промени броја обртаја улазног вратила при константном оптерећењу излазног вратила, док ће се друга група тестова заснивати на промени оптерећења излазног вратила при константном улазном броју обртаја. Планирано је да се експерименталним истраживањима прате вредности следећих параметара:

- температура мазивог средства (посредством термопара),
- температура кућишта (посредством термовизијске камере),
- температура околине (посредством термометра),
- улазни обртни момент (посредством тренутне јачине струје електромотора),
- излазни обртни момент (посредством јачине контролне струје електромагнетне кочнице).

Након извршених мерења, статистичким методама биће извршена обрада добијених експерименталних резултата и анализа истих.

Оквирни садржај докторске дисертације

Кандидат је планирао да докторска дисертација буде реализована кроз следећа поглавља:

1. Уводна разматрања
2. Преглед и анализа досадашњих истраживања
3. Систематизација постојећих концепцијских решења циклоредуктора
4. Контактне силе на виталним елементима циклоредуктора
5. Губици снаге и степен искоришћења циклоредуктора
6. Термичка стабилност циклоредуктора
7. Нумерички модел и резултати нумеричке анализе термичке стабилности циклоредуктора

8. Експериментална анализа термичке стабилности циклоредуктора

9. Закључна разматрања

10. Литература

11. Прилози

У првом поглављу биће дата уводна разматрања и основне информације о циклоредукторима. Такође ће бити дефинисани предмет, циљеви и основне хипотезе истраживања.

Друго поглавље ће обухватити преглед и анализу досадашњих истраживања у области циклоредуктора, са посебним освртом на анализу њихове термичке стабилности.

У трећем поглављу ће бити описани различити начини генерисања профила зупца циклозупчаника (најчешће је у питању еквидистанта скраћене епитрохоиде). Затим ће на основу доступне стручне литературе и каталога реномираних светских произвођача (*Nabtesco, Sumitomo, Onvio*) бити детаљно описана и систематизована постојећа концепцијска решења циклоредуктора са упоредном анализом њихових основних радних карактеристика. За њихово означавање користиће се систем који је за планетарне редукторе предложио руски истраживач професор Кудрјавцев (рус. *Кудрявцев*).

Поступак прорачуна контактних сила на спрегнутим елементима циклоредуктора у функцији угла заокретања циклозупчаника, контактних деформација и постојећих зазора у зонама контакта биће дефинисан у четвртом поглављу на основу класичне Херцове теорије контакта. Посебна пажња биће посвећена одређивању геометрије контактних површина и дебљини уљног филма.

У петом поглављу ће бити развијен допуњени математички модел за одређивање парцијалних губитака снаге у појединим зонама контакта спрегнутих елемената и за израчунавање укупног степена искоришћења циклоредуктора. Допуњени математички модел ће бити развијен на основу следећих добро познатих модела: модел Малхотре (енг. *Malhotra*) и Парамесварана (енг. *Parameswaran*) за одређивање губитака снаге у контактима циклозупчаника и одговарајућих ваљака, модел Палмгрена (енг. *Palmgren*) за одређивање губитака снаге у контактима котрљајних тела лежаја и одговарајућих елемената, модел немачке компаније Симрит (нем. *Simrit*) за одређивање губитака снаге у заптивним елементима и модел Шанженеа (фра. *Changenet*) за одређивање губитака снаге у средству за подмазивање.

Методологија за аналитичку проверу термичке стабилности циклоредуктора у складу са међународним стандардом ISO/TR 14179-2:2001 биће дефинисана у шестом поглављу. На основу развијене методологије биће могуће одређивање радне температуре мазивог средства, као и анализа утицаја примене различитих мазива и радних, геометријских и кинематских параметара на радну температуру циклоредуктора.

У оквиру *седмог поглавља* биће развијен тродимензионални нумерички модел једноступеног циклоредуктора на основу претходно креираног геометријског модела у софтверу *SolidWorks*. Методом коначних елемената у софтверском пакету *Ansys* ће бити извршена анализа напонско – деформационог стања виталних елемената циклоредуктора без и са присуством термичких напрезања (*Static Structural*) као и термичка анализа комплетног преносника (*Transient Thermal*). Такође, на тај начин ће бити идентификоване критичне локације са аспекта термичке стабилности циклоредуктора.

У *осмом поглављу* ће бити представљени резултати експерименталне анализе термичке стабилности и степена искоришћења једноступеног циклоредуктора. План је да се ова истраживања обаве у *Лабораторији за машинске конструкције Машинског факултета у Нишу* на адаптираном пробном столу. Добијени резултати (температура мазивог средства, расподела температуре кућишта, степен искоришћења,...) ће бити детаљно анализирани и извршиће се њихово поређење са подацима из доступне стручне литературе и подацима из каталога реномираних светских произвођача циклоредуктора.

У *деветом поглављу* ће бити сумирани претходно добијени резултати различитим методама истраживања и извршиће се њихова анализа и међусобно поређење. Такође, у овом поглављу ће бити представљена и закључна разматрања, као и смернице за будућа истраживања у овој области.

Десето поглавље ће обухватити списак литературних ставки коришћених при изради докторске дисертације.

У оквиру *једанаестог поглавља* биће приказани прилози.

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

На основу прегледа досадашњих истраживања, пријаве теме докторске дисертације и представљеног концепта, може се закључити да постоји потреба за развојем методологије за проверу термичке стабилности циклоредуктора која омогућава да се још у фази пројектовања одреде оптималне геометријске и радне карактеристике циклоредуктора, као и да се идентификују критичне зоне са аспекта загревања, без скупих и дуготрајних испитивања прототипа.

Осим научног, докторска дисертација има и практични инжењерски допринос, будући да третира једно од важнијих експлоатационих питања, како актуелног, тако и будућег развоја циклоредуктора.

Комисија закључује да је предложена тема докторске дисертације, са образложеним предметом, методама, циљевима рада и очекиваним резултатима, насталим свеобухватном анализом доступних научних радова, оригинална идеја кандидата Милана Васића, маст. инж. маш.

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 Милан Васић, маг. инж. маш. ће у својој докторској дисертацији обухватити све елементе савременог научно-истраживачког рада, у складу са основним критеријумима науке, научних циљева и метода анализе, имплементацијом постојећих и развијањем оригиналних идеја научног истраживања.

У достављеној пријави теме докторске дисертације, кандидат се служио одговарајућом терминологијом из области која је предмет рада. Дефиниција предмета истраживања је усклађена са основним појмовима, предложеним хипотезама и методама истраживања. Кандидат је показао способност да планира и реализује нумеричка и експериментална истраживања уз коришћење савремених софтвера и мерне опреме. Такође, показао је и способност за селекцију и анализу доступних научних радова и других литературних извора.

Циљеви истраживања су проистекли из реалне потребе за развојем методологије за проверу термичке стабилности циклоредуктора и идентификацију критичних зона са аспекта загревања још у фази конструисања циклоредуктора.

5. Преглед научно-истраживачког рада кандидата

Кратка биографија кандидата

Милан Васић, маг. инж. маш., рођен је 9. децембра 1991. године у Пожаревцу. Основну школу „Милисав Николић“ у Црљенцу завршио је 2006. године. Школовање је наставио у Техничкој школи „Никола Тесла“ у Костолцу, где је матурирао 2010. године са одличним успехом.

После завршетка средње школе, уписао је Високу техничку школу у Пожаревцу, смер: пројектовање рачунаром. Дипломски рад под називом „Пројектовање ветрогенератора мале снаге“ одбранио је 2013. године са највишом оценом 10. Студије је завршио са просечном оценом 9,36 као најбољи студент у генерацији.

Основне академске студије на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, модул: Машинске конструкције и механизација, завршио је 2015. године са просечном оценом 9,33 одбранивши завршни рад под називом „Колица мосне дизалице“ са оценом 10.

Исте године, на истом факултету, уписао је мастер академске студије, такође на модулу Машинске конструкције и механизација. Завршио их је 2017. године са просечном оценом 8,80 одбранивши мастер рад под називом „Хидроелектране малих снага“ са оценом 10.

Докторске академске студије уписао је у новембру 2017. године на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу (модул: Машинске конструкције и механизација). Положио је све испите предвиђене наставним планом и програмом са просечном оценом 10,0 и тако стекао услов за пријаву теме докторске дисертације.

Професионалну инжењерску каријеру градио је у следећим компанијама:

- ДАЛ ДЕГАН ДОО, предузеће за производњу и продају пољопривредних машина у Александровцу (Жабари), од 2015. до 2018. године као руководиоца машинског погона.
- ДР100ИЋ ДОО, предузеће за машинску обраду метала у Костолцу, од 2018. до 2019. године као руководиоца производног погона.
- ПД ПРО ТЕНТ, предузеће за пружање услуга у Обреновцу, при чему је био ангажован на површинском копу Дрмно од 2019. до 2022. године као инжењер за одржавање роторних багера и остале рударске механизације на трећем јаловинском систему.

Од 11. априла 2022. године запослен је као асистент на *Академији техничких струковних студија Београд* на одсеку *Примењене инжењерске науке* у Пожаревцу, катедра за машинско инжењерство. Ангажован је на предметима: Обрада метала резањем, Обрада метала деформацијом, Алати и прибори, Пројектовање технолошких процеса, Основи хидраулике и пнеуматике и Отпорност материјала.

Опредељен је за научни рад и усавршавање у области машинског инжењерства, ужа научна област: Машинске конструкције и механизација.

Говори енглески језик.

У свом раду користи следеће софтверске пакете: *MS Office, SolidWorks, CATIA, Autodesk Inventor, AutoCAD, Ansys, Matlab.*

Научно-истраживачки рад

Као аутор или коаутор објавио је укупно **15** радова у научно-стручним часописима и на међународним и домаћим научно-стручним скуповима.

• Списак објављених радова:

M21 (Рад у врхунском међународном часопису)

1. **Vasić M.**, Stojanović B., Blagojević M., Failure analysis of idler roller bearings in belt conveyors, Engineering Failure Analysis, Vol.117, 2020, pp. 104898, ISSN: 1350-6307, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104898>

M33 (Саопштење са међународног скупа штампано у целини)

1. Ćatić D., **Vasić M.**, Glišović J., Analysis of the fault tree of the crop sprayer pump, Proceedings of 13th International Quality Conference, Kragujevac, Serbia, 2019, 29th May - 1st June, pp. 1033 - 1038, ISSN: 2620-2832
2. Blagojević M., Matejić M., **Vasić M.**, Comparative overview of calculation of Normal force on cycloidal gear tooth, 8th International Congress Motor Vehicles and Motors 2020, Kragujevac, Serbia, 2020, 8th - 9th October, pp. 131-137, ISBN: 978-86-6335-074-8
3. **Vasić M.**, Matejić M., Blagojević M., A comparative calculation of cycloid drive efficiency, 5th International Scientific Conference COMETA, Jahorina, Bosnia and Herzegovina, 2020, 26th - 28th November, pp. 259 – 266, ISBN: 978-99976-719-8-1
4. **Vasić M.**, Blagojević M., Matejić M., Cofaru I. I., The influence of the cycloid disc bearing type on the cycloidal speed reducer efficiency, 10th International Conference on Manufacturing Science and Education - MSE, Sibiu, Romania, 2021, 2nd - 4th June, ISBN: 978-1713834717
5. Matejić M., Goluža V., **Vasić M.**, Blagojević M., Analysis of two-stage cycloid speed reducers dimensions and efficiency, The 11th International Conference on Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering KOD 2021, Novi Sad, Serbia, 2021, 10th - 12th June, pp. 1-10, ISBN: 978-3-030-88465-9
6. **Vasić M.**, Blagojević M., Matejić M., Efficiency of non-pin wheel cycloid reducer concept, 6th International Scientific Conference COMETA, Jahorina, Bosnia and Herzegovina, 2020, 17th - 19th November, pp. 430 – 441, ISBN: 978-99976-947-6-8.
7. Blagojević M., **Vasić M.**, Matejić M., Comparative calculation of cycloid reducers efficiency between classic and non-pin wheel concepts, 18th International Conference on Tribology - SERBIATRIB'23, Kragujevac, Serbia, 2023, 17th-19th May, pp. 1-11, ISBN: 978-86-6335-103-5

M52 (Рад у истакнутом националном часопису)

1. **Vasić M.**, Matejić M., Blagojević M., Influence analysis of selected turbine to working characteristics of small hydro power plants, Machine Design, Vol.10, No.1, 2018, pp. 11 - 16, ISSN: 1821-1259, DOI: <http://dx.doi.org/10.24867/MD.10.2018.1.11-16>
2. **Vasić M.**, Djordjević Z., Blagojević M., Stress–Strain Analysis of Conveyor Drive Pulley Shaft, Journal IMK14 - Research & Development in Heavy Machinery, Vol.25, No.3, 2019, pp. 69-74, ISSN: 0354-6829, DOI: <http://dx.doi.org/10.5937/IMK1903069V>

M53 (Рад у националном часопису)

1. **Vasić M.**, Stojanović B., Blagojević M., Fault Analysis of Gearboxes in Open Pit Mine, Applied Engineering Letters, Vol.5, No.2, 2020, pp. 50 - 61, ISSN: 2466-4677 ,DOI: <http://dx.doi.org/10.18485/aeletters.2020.5.2.3>
2. **Vasić M.**, Miloradović N., Blagojević M., Speed control of high power multiple drive belt conveyors, IMK-14-Research and Development in Heavy Machinery, Vol.27, No.1, 2021, pp. 9-19, ISSN: 0354-6829, DOI: <http://dx.doi.org/10.5937/IMK2101009V>
3. **Vasić M.**, Blagojević M., Dragoi M., Thermal stability of lubricants in cycloidal reducers, Engineering Today, Vol.1, No.2, 2022, pp. 7-17, ISSN: 2812-9474, DOI: <https://doi.org/10.5937/engtoday2202007V>

M63 (Саопштење са скупа националног значаја штампано у целини)

1. **Vasić M.**, Blagojević M., Nestorović G., Visokoprecizni reduktori za industrijske robote, 43. JUPITER konferencija sa međunarodnim učešćem, Beograd, Srbija, 2022, 4 – 5. oktobar, pp. 3.55-3.60, ISBN: 978-86-6060-137-9
2. **Vasić M.**, Blagojević M., Nestorović G., Primena cikloreduktora u industrijskim robotima, Konferencija sa međunarodnim učešćem “Napredne tehnologije u obrazovanju i privredi”, Vrnjačka Banja, Srbija, 2023, 30 – 31.,мај, pp. 59-66, ISBN: 978-86-6211-145-6

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

Комисија предлаже да ментор ове докторске дисертације буде **др Мирко Благојевић**, редовни професор Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.

Др Мирко Благојевић, редовни професор је као аутор или коаутор објавио више од 150 научно-истраживачких радова у међународним и домаћим научним часописима, као и зборницима међународних и домаћих научних скупова, од којих је 20 научних радова у часописима са СЦИ листе.

• Референце којима се доказује испуњеност услова за менторство:

1. **Blagojević M.**, Matejić M., Kostić N, Dynamic Behaviour of a Two-Stage Cycloidal Speed Reducer of a New Design Concept, Technical Gazette, Vol. 25, No. 2, 2018, pp. 291-298, ISSN: 1330-3651, DOI: <http://dx.doi.org/10.17559/TV-20160530144431>, (M23)
2. Kostić N., **Blagojević M.**, Petrović N., Matejić M., Marjanović N., Determination of Real Clearances Between Cycloidal Speed Reducer Elements by the Application of Heuristic Optimization, Transactions of Famena, Vol. 42, No. 1, 2018, pp. 15-26, ISSN: 1333-1124, DOI: <https://doi.org/10.21278/TOF.42102>, (M23)
3. Maccioni L., Concli F., **Blagojević M.**, A new three-stage gearbox concept for high reduction ratios: Use of a nested-cycloidal architecture to increase the power density, Mechanism and Machine Theory, Vol. 181, 2023, pp. 105203, ISSN: 0094-114X, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.105203>, (M21)
4. Vasić M., Stojanović B., **Blagojević M.**, Failure analysis of idler roller bearings in belt conveyors, Engineering Failure Analysis, Vol.117, 2020, pp. 104898, ISSN: 1350-6307, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104898>, (M21)
5. Matejić M., **Blagojević M.**, Dišić A., Matejić M., Milovanović V., Miletić I., A Dynamic Analysis of the Cycloid Disc Stress-Strain State, Applied Sciences, Vol. 13, No. 7, 2023, pp. 4390, ISSN: 2076-3417, DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/app13074390>, (M22)

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

ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ КОМИСИЈЕ

Милан Васић, маг. инж. маш., испунио је све предвиђене услове за одобрење израде докторске дисертације.

Предложена тема докторске дисертације је оригинална и има научну заснованост. Предложена методологија израде докторске дисертације је у складу са научним принципима. Очекивани резултати докторске дисертације требало би да представљају оригинални научни допринос у области термичке стабилности циклоредуктора.

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:

ИСТРАЖИВАЊЕ ТЕРМИЧКЕ СТАБИЛНОСТИ ЦИКЛОРЕДУКТОРА

прихвати и одобри њену израду кандидату **Милану Васићу, маг. инж. маш.**

Комисија предлаже да ментор ове докторске дисертације буде **др Мирко Благојевић, редовни професор** Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.

У Крагујевцу и Нишу,
новембар 2023. године.

КОМИСИЈА

1. 


др Мирко Благојевић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу (датум избора у звање: 05.12.2018. године) – председник комисије. Ужа научна област: Машинске конструкције и механизација.

2. 


др Блажа Стојановић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу (датум избора у звање: 15.07.2022. године) – члан. Ужа научна област: Машинске конструкције и механизација.

3. 

др Родољуб Вујанац, ванредни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу (датум избора у звање: 22.01.2020. године) – члан. Ужа научна област: Машинске конструкције и механизација.

4. 

др Милош Матејић, доцент, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу (датум избора у звање: 10.06.2020. године) – члан. Ужа научна област: Машинске конструкције и механизација.

5. 

др Милан Банић, ванредни професор, Машински факултет у Нишу Универзитета у Нишу (датум избора у звање: 17.11.2020. године) – члан. Ужа научна област: Машинске конструкције.