

6.

III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

**ПРИМЕНА МЕТАХЕУРИСТИКА НА ОПТИМИЗАЦИЈУ РАСПОДЕЛЕ
ОПТЕРЕЂЕЊА КОД МАШИНСКИХ ЕЛЕМЕНАТА И СКЛОПОВА**

**THE APPLICATION OF META-HEURISTICS TO OPTIMISE LOAD DISTRIBUTION
IN MACHINE ELEMENTS AND ASSEMBLIES**

IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Докторска дисертација је написана на XXVIII+135 страна, на енглеском језику.
Садржи осам поглавља, у следећем редоследу:

1. **Introduction / Увод**
2. **Optimisation / Оптимизација**
3. **Optimisation Methods / Оптимизационе методе**
4. **Optimisation Problems in Mechanical Engineering / Оптимизациони проблеми у машинском инжењерству**
5. **Optimisation Problems in Helical, Spur and Planetary gears/ Оптимизациони проблеми код цилиндричних и планетарних зупчаника**
6. **Optimisation of Ball Bearing Dynamical Load Ratings and Rating Life / Оптимизација динамичког оптерећења и радног века код кугличних лежаја**
7. **Reliability Assessment of Mechanical Systems by Bayesian Networks / Процена поузданости машинских система коришћењем Бајесових мрежа**
8. **Concluding Remarks and Directions for Further Research/ Завршна запажања и правци за даљи рад**

Дисертација садржи 33 слике и 23 табеле. Списак коришћене литературе садржи 148 библиографских јединица, које су наведене у складу са важећим правилима за цитирање. Поред наведеног, дисертација садржи кључне документацијске информације на српском и енглеском језику, захвалницу, списак слика, списак табела као и апстракт на српском и енглеском језику.

V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Наслов предложене докторске дисертације формулисан је јасно и прецизно, одражава тему и садржај истраживања.

(Introduction)

У овом поглављу, кандидаткиња представља циљеве и контекст истраживања. Приказани материјал је представљен јасно и концизно.

(Optimisation)

(1)

(2)

(3)

(Optimisation

Methods)

(Optimisation problems in Mechanical Engineering)

Општи проблем оптимизације, својства и подела проблема су представљени јасно. Уводни преглед оптимизационих метода је на задовољавајућем нивоу. Из прегледа литературе види се да је кандидаткиња упозната са новијим трендовима у истраживачкој области којом се бави и да је тема истраживања адекватно одабрана.

(Optimisation problems of Helical, Spur and Planetary Gears)

e ea o a j eo e j

12

e ea o a j eo e j

(Optimisation of Ball Bearing Dynamical Load Rating and Rating Life)

10

(Multistart Pattern Search)
(Multistart Active Set Method)).

(Reliability Assessment of Mechanical Systems by Bayesian Networks)

У оквиру ова три поглавља, кандидаткиња представља своје резултате примене оптимizacionих метода при решавању реалних сложених једнокритеријумских и вишекритеријумских оптимizacionих проблема у машинству. Предложене су нове математичке формулације разматраних проблема које обухватају већи број утицајних параметара него у досадашњој литератури. У циљу повећања ефикасности, генерисани су хибриди класичних метахеуристика и функција локалног претраживања. Такође, формиране су нове метахеуристичке методе убацивањем погодних итеративних хеуристика локалног претраживања у вишестартно окружење. Неке од метода коришћене су по први пут за решавање наведених проблема. Резултати су поређени међусобно и са постојећим у новијој литератури. Показано је да метахеуристичке методе представљају моћан алат у решавању реалних проблема из овог домена. Добијени резултати представљају побољшања у односу на релевантну литературу из ове области. Та побољшања односе се пре свега на могућност истовремене оптимизације више параметара захваљујући новим моделима. Такође, претпоставке модела омогућиле су да оптимизоване вредности параметара одговарају равномернијој расподели оптерећења чиме се значајно продужава радни век разматраних компоненти. Примена Бајесових мрежа представља подршку при доношењу одлука у кључним ситуацијама када нема довољно реалних података. Приказани примери симулације комплексних машинских система илуструју предности овог модела у односу на тренутне приступе у литератури.

Истраживања приказана у тези имају интердисциплинарни карактер; истовремено се односе на примену математичких метода оптимизације у машинству, као и на развој нових математичких модела разматраних проблема. Добијени резултати су актуелни и оригинални. Дисертација представља синтезу резултата из области математике, машинства и контроле квалитета индустријског производа. Нагласак истраживања је на максимизацији квалитета производа (без обзира на повећање цене). Међутим, исти принципи важе и у ситуацијама када је примарна минимална цена коштања производа, а циљ се може постићи одговарајућом модификацијом предложених математичких модела, у складу са тим захтевима.

На крају дисертације је наведена обимна коришћена литература (148 јединица), која указује да је кандидаткиња упозната са историјским развојем и тренутним стањем у областима којима се дисертација бави.

VI СПИСАК НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КОЈИ СУ ОБЈАВЉЕНИ ИЛИ ПРИХВАЋЕНИ ЗА ОБЈАВЉИВАЊЕ НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ РАДА НА ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ

1. Marija Milojević. *Optimization of transverse load factor of helical and spur gears using genetic algorithm*. Applied Mathematics and Information Sciences, vol. 4, pp. 1323-1331, 2013. (M23)
2. Božidar Rosić, Stojan Radenović, Ljubiša Janković, Marija Milojević. *Optimization of planetary gear train using multiobjective genetic algorithm*. Journal of the Balcan Tribological Association, vol. 17, no. 3, pp. 462-475, 2011. (M23)
3. Nataša Glišović, Marija Milojević. *Decision support system for mechanical engineering*. Proceedings of International Conference on Applied Internet and Information Technologies, pp. 413-416, 2013, Zrenjanin, Serbia. (M33)
4. Božidar Rosić, Ljubiša Janković, Marija Milojević. *Multicriteria optimization of planetary gear train using evolutionary strategies*. In Proceedings of the 12th International Conference on Tribology, Serbian Tribology Society, 2011, Kragujevac, Serbia. (M33)
5. Marija Milojević Jevrić, Tatjana Davidović. *Meta-heuristics application to optimise ball bearings dynamical load ratings and rating life*. In Proceedings of SYM-OP-IS 2014: XLI Symposium on Operational Research, Divčibare, 16-19 September, 2014. (M64)
6. Marija Milojević, Zoran Ognjanović, Nataša Glišović. *Application of Bayesian Network to Reliability Assessment of Mechanical System*. In the Book of Abstracts of the Second National Conference on Probability Logics and their Applications, Belgrade, Serbia. 27-28 September, 2012. (M64)

VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

Основни резултати истраживања приказани у докторској дисертацији су:

- 1) Један од испитиваних проблема код зупчаника је оптимизација трансверзалног фактора расподеле оптерећења код цилиндричних зупчаника са правим и косим зупцима. Расподела оптерећења у току рада зупчастог пара није константна што је праћено и неравномерном појавом напона у процесу спрезања. Кандидаткиња је развила модел у коме се креће од супротне претпоставке, тј. да се фактор расподеле оптерећења не мења дуж линије контакта, са циљем идентификовања најутцајнијих параметара на кршење ове претпоставке. За потребе развоја математичког модела, сви утицајни параметри утврђени су у складу са ISO стандардима. Тако формиран математички модел зависи од 12 утицајних параметара чијом оптимизацијом се добијају вредности које најмање крше полазну претпоставку. Предложено је коришћење генетског алгоритма са додатном функцијом локалног претраживања. Добијени резултати су показали да је најутцајнији параметар на промену вредности трансверзалног фактора расподеле оптерећења угао нагиба зупца, а поред тога значајно утичу и коефицијенти померања профила алата. Закључено је да за било који број зубаца (из опсега 18 - 54) и за било који преносни однос зупчаника (из опсега 1 - 5), постоје вредности најутцајнијих параметара које одговарају униформној расподели оптерећења. У односу на релевантну литературу, предложени модел омогућава истовремену оптимизацију већег броја утицајних параметара. При томе се добијају вредности које одговарају скоро идеалним условима рада посматраног склопа што утиче на продужење његовог радног века.
- 2) Разматран је и проблем вишекритеријумске оптимизације геометријских параметара планетарног зупчастог преносника. Предложен је формални модел планетарног преносника са разматраним губицима у енергији који настају као последица трења између контактних површина спрегнутих зубаца. Метод тежинских коефицијената коришћен је за свођење полазног проблема на једнокритеријумски и апроксимацију Парето скупа решења. Ова метода се показала погодном у случајевима када неколико супротстављених циљних функција треба да буду оптимизоване, као што је то случај са степеном искоришћења планетарног преносника и растојањем између центара сунца и планетарног зупчаника. У овом раду оптимизовано је 9 функција истовремено које зависе од 10 утицајних параметара. Ефекат варирања вредности конструкцијских параметара даје корисне информације о осетљивости циљних функција у моделу. Описани проблем решаван је генетским алгоритмом и резултовао је вредностима геометријских параметара које одговарају максималној ефикасности уређаја и при томе оптимизују свих 9 циљних функција. На основу геометријске интерпретације резултата у критеријумском простору закључено је да постоји јака корелација између аксијалног растојања и спољног пречника планетарног преносника. У односу на релевантну литературу, предложени модел је најсвеобухватнији, али још увек довољно једноставан да омогућава добијање допустивих решења која обезбеђују ефикасан рад посматраног планетарног зупчастог преносника.
- 3) Разматрана је оптимизација геометријских параметара који обезбеђују побољшање динамичког капацитета и радног века лежаја. Развијен је математички модел у складу са ISO стандардима, а експериментална евалуација је заснована на метахеуристичком приступу. Вишекритеријумска оптимизација динамичке носивости и радног века кугличних лежаја, под одређеним радним условима, спроведена је узимајући у обзир да циљне функције нису у конфликту. Због тога је проблем третиран као једнокритеријумски. Разматрани проблем је нелинеаран, са ограничењима у облику неједнакости. Генетски алгоритам се показао као погодна техника за решавање проблема континуалне оптимизације, међутим, у оквиру ове дисертације по први пут су примењене друге методе. Коришћене су две

метахеуристичке методе засноване на понављајућим (више-стартним) хеуристичким алгоритмима локалног претраживања. Као локални претраживачи коришћене су метода Хука и Цивса и метода активног скупа ограничења. Све три метахеуристике су поређене на истом скупу лежаја, а представљени су и упоредни резултати у односу на каталожке вредности и релевантну литературу. Предложене методе оптимизације обезбеђују повећање динамичког капацитета у односу на вредности из каталога у свих осам разматраних примера. Просечни проценат повећање динамичког капацитета лежаја је 9,4%, 12,2% и 12,6% за генетски алгоритам, више-стартни Хук-Цивс и више-стартни активни скуп ограничења, респективно. Добијени резултати значајно утичу на продужење радног века. У односу на релевантну литературу резултати су још бољи јер је предложени модел свеобухватнији и омогућава оптимизацију више параметара истовремено.

- 4) Бајесова мрежа је коришћена за процену поузданости два механичка система: система за фарбање металних полупроизвода и система за предвиђање понашања машине за филтрирање трафо уља. Применом Бајесове мреже описана је функционалност механичког система и развијен је метод за предикцију утицаја отказа неког од подсистема на квалитет финалног производа. Модел је имплементиран у програмском језику C# и тестиран на реалним подацима. Компаративна анализа између резултујућих вероватноћа добијених Бајесовом мрежом и историјских вероватноћа показала је да не постоји значајна разлика између њих. Максимално добијено одступање је 3% што значи да модел заснован на Бајесовој мрежи са вероватноћом од бар 97% тачно предвиђа понашање разматраних система.

VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА

Кандидаткиња је применила неке од савремених оптимизационих метода при решавању проблема из области машинства. Методе које је користила су познате, а неке међу њима већ коришћене на сличним проблемима из исте области. Мултидисциплинарност истраживања донекле ограничава оригинални научни допринос у области (примењене) математике; може се уочити да недостаје свеобухватнија анализа коришћених метода оптимизације и специфичности њихове примене и адаптације на посматране проблеме (мотивација при избору параметара, утицај параметара на резултате, и сл.). Са друге стране, добијени резултати представљају побољшања у области машинства, у односу на релевантну литературу, и пружају добру основу за наставак истраживања. Зато ова дисертација, без обзира на уочене недостатке, представља извор нових тема за будући рад.

IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:

3. 4. :
1. ?
Докторска дисертација је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме.
2. ?
Дисертација садржи све битне елементе, иако се уочава недостатак детаљних објашњења у вези са имплементацијом метахеуристичких метода, као и детаљнија анализа избора параметара, њиховог утицаја на решења, а на крају и детаљнија компаративна квантитативна анализа квалитета добијених решења. С обзиром да приказани експериментални резултати показују да су предложеним методама добијена побољшања у односу на претходно публиковане резултате, уочене недоречености се могу толерисати.
3. ?
Допринос тезе у области примењене математике огледа се у приступу решавању актуелних проблема у машинству коришћењем савремених метахеуристика у глобалној оптимизацији, која допушта истовремену оптимизацију већег броја параметара модела него што је без тога било могуће. Кандидаткиња је применила три познате метахеуристике на неколико оптимизационих проблема: на оптимизацију трансверзалног фактора расподеле оптерећења код цилиндричних зупчаних преносника са правим и косим зупцима, на вишекритеријумску оптимизацију код планетарних преносника и оптимизацију динамичке носивости и радног века кугличних лежаја под одређеним радним условима. Такође, савремене статистичке методе засноване на Бајесовим мрежама су примењене на проблем испитивања поузданости у два реална примера из праксе. Допринос представља и предложена модификација постојећих математичких модела у циљу добијања облика који су погоднији за глобалну оптимизацију метахеуристичким методама, као и испитивање ефикасности различитих метахеуристичких метода на конкретним проблемима из машинства. На крају, допринос је и конструкција софтверског модула у постојећем

програмском пакету (MatLab), у коме су имплементиране савремене методе оптимизације коришћене у тези.

Резултати приказани у овој дисертацији су објављени у међународним научним часописима и представљени на међународним скуповима, чиме се формално испуњава критеријум за прихватање ове докторске дисертације.

4.

У дисертацији у извесној мери недостају јасни закључци изведени на основу квантитативне и квалитативне евалуације предложених метода. То се посебно односи на мотивацију при избору метода, подешавања параметара, утицај параметара на резултате, и сл. Међутим, остварени резултати свакако чине целину и могу се сматрати значајним доприносом у области машинства, а представљају и допринос у области примењене математике. Недоречености у дисертацији могу се сматрати мотивом за наставак истраживања у овој области.

X ПРЕДЛОГ КОМИСИЈЕ:

На основу укупне оцене дисертације, комисија предлаже да се докторска дисертација кандидаткиње Марије Милојевић Јеврић, под називом *Примена метахеуристика на оптимизацију расподеле оптерећења код машинских елемената и склопова*, прихвати, а кандидаткињи одобри одбрана.
