

ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

-обавезна садржина- свака рубрика мора бити попуњена

(сви подаци уписују се у одговарајућу рубрику, а назив и место рубрике не могу се мењати или изоставити)

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ / DATA ABOUT THE JURY
<p>1. Датум и орган који је именовао комисију / The date and the council that has nominated the jury</p> <p>29.03.2017, Наставно-научно веће Факултета техничких наука</p> <p>2. Састав комисије са знаком имена и презимена сваког члана, звања, назива уже научне области за коју је изабран у звање, датума избора у звање и назив факултета, установе у којој је члан комисије запослен / Members of the Committee:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. др Тибор Лукић, доцент, УНО теоријска и примењена математика, 07.06.2012, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука (председник); 2. др Драган Урошевић, научни саветник, УНО рачунарство, 26.02.2014, Математички институт САНУ (члан); 3. др Јоаким Линдблад, researcher, УНО computerized image processing, 01.10.2015, Центар за анализу слика, Департаман за информационе технологије, Универзитет Упсала, Шведска (Centre for Image Analysis, Dept. for Information Technology, Uppsala University, Sweden) (члан); 4. др Милица Шелмић, ванредни професор, УНО операциона истраживања у саобраћају, 15.07.2016, Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет (члан); 5. др Јованка Пантовић, редовни професор, УНО теоријска и примењена математика, 24.06.2010, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, (члан); 6. др Татјана Давидовић, виши научни сарадник, УНО рачунарство, 27.06.2012, Математички институт САНУ (ментор).
II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ / DATA ABOUT THE CANDIDATE
<ol style="list-style-type: none"> 1. Име, име једног родитеља, презиме / Name, parent name, surname: Татјана, Славко, Јакшић Кругер 2. Датум рођења, општина, држава / Date of birth, municipality, country: 31.03.1980., Загреб, Југославија (садашња Хрватска) 3. Назив факултета, назив студијског програма дипломских академских студија – мастер и стечени стручни назив / Master studies Математички факултет Универзитета у Београду, Астрономија, Дипломирани математичар – мастер 4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија / Doctoral studies, year of enrollment and study programme: 2010, Математика у техници 5. Назив факултета, назив магистарске тезе, научна област и датум одбране: ----- 6. Научна област из које је стечено академско звање магистра наука: -----

III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Развој, имплементација и теоријска анализа метахеуристичке методе оптимизације колонијом пчела.

III TITLE OF THE DOCTORAL DISSERTATION:

Development, implementation and theoretical analysis of the bee colony optimization meta-heuristic method.

IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Навести кратак садржај са назнаком броја страна, поглавља, слика, шема, графикона и сл.

Дисертација је написана на енглеском језику на XV+312 страна. Садржи десет поглавља, списак коришћене литературе и два прилога. Поглавља су распоређена у два модула (целине) у следећем редоследу:

I Сажетак

Module I – Preliminaries / Модул I - Основе

1. Introduction / Увод
2. Optimization problems and methods / Проблеми и методе оптимизације
3. Meta-heuristic methods / Метахеуристичке методе
4. Bee colony optimization method / Метода оптимизације колонијом пчела

Module II – Methodology and contributions / Модул II – Методологија и доприноси

5. Theoretical analysis of the asymptotic convergence of BCO / Теоријска анализа асимптотске конвергенције BCO методе
6. Parallelization strategies for the BCO algorithm / Стратегије паралелизације BCO алгоритма
7. Methodology of experimental study of BCO / Методологија експерименталног испитивања BCO методе
8. Development and empirical analysis of BCOc / Развој и емпиријска анализа BCOc методе
9. Development and empirical analysis of BCOi / Развој и емпиријска анализа BCOi методе
10. Conclusions and future work / Закључци и даљи рад

Appendix A. Complementary material / Помоћни материјал

Appendix B. Tables and graphics / Табеле и графици

Дисертација садржи насловну страну, проширени резиме на српском и кратак резиме на енглеском језику, страну са захвалницом, садржај, списак слика и списак табела. Поглавља садрже 31 слику, 26 графика и 34 табела. Прилози садрже 68 страна и 4 слике, 19 графика и 35 табела. Списак коришћене литературе садржи 397 библиографских јединица, које су наведене у складу са важећим правилима за цитирање.

IV OVERVIEW OF THE DOCTORAL DISSERTATION:

Provide a brief overview of the content of the doctoral dissertation, indicating the number of pages, chapters, figures, schematics, graphs, etc.

The doctoral dissertation contains 312 pages written in English language. The extended abstract in Serbian contains 15 pages and 3 pictures. The dissertation consists of ten chapters, organized within two modules on 244 pages, as presented above. The chapters contain 31 pictures, 26 graphics and 34 tables. In addition, the dissertation contains two appendixes on 68 pages with 4 pictures, 19 graphics and 35 tables. The bibliography contains 397 references, all given in accordance with the current referencing standards. Furthermore, the dissertation contains acknowledgments, the list of figures and tables as well as a short abstract in English.

V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

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

У проширеном апстракт на српском језику (Сажетак) кандидаткиња јасно дефинише мотивацију за истраживањем и истиче резултате дисертације врло прецизно и концизно. Описан

је садржај и структура дисертације. Истакнут је значај развоја алгорита ВСО методе за решавање проблема оптимизације, теоријског и емпиријског испитивања конвергенције ка оптималном решењу, као и значај примене стратегија паралелизације са циљем повећања ефикасности алгорита.

У *првом поглављу* (Увод) кандидаткиња јасно и систематизовано представља проблем, предмет, циљеве и структуру истраживања изложене дисертације. Поглавље садржи листу актуелних тема у области метахеуристика као увод у мотивацију и циљеве истраживања. У наставку су образложени значај теоријске и емпиријске анализе метахеуристичких метода. Наглашени су научни доприноси три теме које се односе на теоријско испитивање конвергенције метахеуристичких метода, развој стратегија паралелизације тих метода и експериментално испитивање утицаја метахеуристика на њихове перформансе. На сажет и прегледан начин кандидаткиња је описала структуру дисертације, представила листу релевантних публикација и доприносе сваког рада.

У *другом поглављу* (Проблеми и методе оптимизације) кандидаткиња је представила област оптимизације као важну истраживачку тему примењене математике. Основни циљ овог поглавља је увођење терминологије која се користи у наставку дисертације. У поглављу су истакнуте различите врсте проблема и метода оптимизације, посебно хеуристичке методе. Почетак поглавља садржи опис NP тешких проблема са становишта теорије комплексности алгоритама. Изложен је историјски и теоријски преглед оптимизације, оптимизационих проблема и метода, заједно са њиховим познатим класификацијама. Оптимизациони проблеми су подељени према: типу решења, дефиницији допустивог простора, броју критеријума, броју оптималних решења и присуству неизвесности. Методе комбинаторне оптимизације су класификоване као тачне (егзактне) и приближне. Од приближних метода посебно су истакнуте хеуристичке и метахеуристичке методе. Представљени су различити типови хеуристичких алгоритама за два детаљно описана комбинаторна проблема који се у дисертацији разматрају – проблем распоређивања независних задатака на идентичне машине и 3-SAT проблем.

Треће поглавље (Метахеуристичке методе) посвећено је историјском развоју метахеуристика са нагласком на методе инспирисане природним процесима и биологијом. У поглављу је извршен преглед различитих типова метахеуристика према: инспирацији за развој, броју решења којима се располаже, начину избора решења и обради решења. Кандидаткиња је дала кратак осврт на развој области вештачке интелигенција која изучава методе засноване на биолошким принципима, као што је интелигенција роја. У наставку је укратко приказано седам различитих метахеуристичких метода, тј. историјски развој и основни принципи рада за: методу симулираног каљења, генетских алгоритама, методу оптимизације колонијом мравца, методу оптимизације ројем честица, методу оптимизације колонијом вештачких пчела, табу претраживање и методу променљивих околности. Коначни закључци на крају поглавља се односе на методе инспирисане понашањем пчела у природи.

У *четвртном поглављу* (Метода оптимизације колонијом пчела) је детаљно описана метода оптимизације колонијом пчела (ВСО, енг. Bee Colony Optimization). На почетку се разматра испитивање понашања пчела у природи које је инспирисало развој биолошких алгоритама заснованих на понашању пчела за нектаром. Детаљно је објашњен принцип рада ВСО алгорита и две варијанте ВСО алгорита: конструктивна (ВСОс) и метода са поправкама (ВСОi). Кандидаткиња је увела нове формуле за одређивање лојалности вештачких пчела и увела је термин *фуункције лојалности*. Дат је кратак приказ примена ВСО алгорита у литератури.

У наведеним поглављима кандидаткиња успоставља терминологију за приказ својих истраживачких резултата. Описала је математичку позадину дефиниције проблема и метода оптимизације и показала да је овладала основним терминима и техникама које се у овој области користе. Изнети материјал је представљен јасно. Уочљиво је да је кандидаткиња посветила посебну пажњу педагошком аспекту увода кроз висок ниво читљивости текста и на основу одабира коришћене литературе и изложених примера. Детаљно је описано све што до је сада урађено на развоју ВСО методе и истакнуто који су то аспекти који захтевају даља истраживања,

а самим тим и мотивација кандидаткиње да се неким од тих аспеката бави у својој дисертацији и да да свој допринос развоју ове изузетно занимљиве методе.

Пето поглавље (Теоријска анализа асимптотске конвергенције VCO методе) садржи осврт на теоријске резултате асимптотске конвергенције стохастичких процеса и алгоритама ка оптималном решењу, битним за приказ резултата кандидаткиње остварених на ту тему. У почетном делу поглавља изложена је мотивација за теоријску анализу метахеуристичких алгоритама, као и корист од примене теоријских резултата у пракси. Представљени су већ познати резултати теоријске верификације конвергенције познатих метахеуристичких метода. Описана су два типа конвергенције који се разматрају за метахеуристичке алгоритме са освртом на релевантну литературу. У другом делу поглавља су изнети резултати и доприноси кандидаткиње на тему асимптотске конвергенције VCO методе. Разматрају се два типа конвергенције: конвергенција тренутно најбољег решења и конвергенција по моделу. Описан је генерички VCO алгоритам и идентификовани су битни делови методе који утичу на конвергенцију ка оптималном решењу. Поред наведеног, разматрају се VCO алгоритми разврстани према начину конструкције/модификације решења. Идентификован је и други тип поделе који разликује алгоритме чије су итерације независне и алгоритме код којих постоји размена знања међу итерацијама. Под наведеним класификацијама, идентификовани су потребни и довољни услови за које VCO метода конвергира ка глобалном оптималном решењу. Прво је представљен доказ конвергенције тренутно најбољег решења VCO алгоритма. Разликују се два доказа: за случај где су итерације независне и за случај где постоји размена знања међу итерацијама. Код првог типа алгоритма потребан и довољан услов је да свако решење има строго позитивну вероватноћу да ће бити пронађено, односно $p^* > 0$. Код алгоритама са глобалним знањем потребно је обезбедити минималну вероватноћу $p_{min} > 0$ за коју важи $p^*(t) \geq p_{min} > 0$. На основу приказане литературе за конвергенцију по моделу неопходно је да алгоритам буде дизајниран тако да поседује компоненту учења. У складу са тиме, кандидаткиња је предложила неколико правила конструкције/модификације, те је конвергенција по моделу VCO алгоритма разматрана за различите типове проблема оптимизације. Прецизније, изложени су докази у случајевима када су правила за избор компоненти/модификација дефинисана за: 1. проблеме код којих све компоненте проблема не припадају оптималном решењу; 2. проблеме код којих све компоненте проблема припадају оптималном решењу. Резултати су показали у ком кораку VCO методе је потребно укључити компоненту учења и на који начин, да би се обезбедила њена конвергенција по моделу.

Кандидаткиња је извршила детаљну анализу и систематизацију метода и научних резултата у области теоријске анализе метахеуристичких алгоритама. На основу анализе актуелног стања у овој области, кандидаткиња се фокусира на два типа конвергенције и њихову примену на VCO методу. Добијени резултати показују да разматрана метахеуристика конвергира ка оптималном решењу, у најопштијем случају, уколико користи глобално знање и елементе учења. Показано је такође да се ефикасност претраге разматраном метахеуристичком може поспешити уколико су задовољени одговарајући услови избора компоненти решења који зависе од типа проблема.

Шесто поглавље (Стратегије паралелизације VCO алгоритма) је посвећено паралелизацији методе оптимизације колонијом пчела. Циљеви истраживања су прецизно дефинисани, у складу са постављеном мотивацијом истраживања, и доприносе доношењу конкретних закључака. Кандидаткиња је представила три стратегије паралелизације и описала пет одговарајућих имплементација за рачунаре са дистрибуираном меморијом. Све имплементације користе MPI библиотеку (енг. Message Passing Interface). Прва стратегија се заснива на независним извршавањима процеса на q процесорских јединица. Стратегија је испитана кроз имплементацију где сваки VCOq алгоритам располаже различитом конфигурацијом парова параметара V и NC . Доприноси дисертације се такође огледају у развоју нових синхроних и асинхроних кооперативних стратегија. Обе стратегије су засноване на контроли учесталости комуникације између различитих процесора и различитих конфигурација парова параметара V и NC . Синхрона стратегија се анализира помоћу две имплементације: када је учесталост размене порука између процеса унапред фиксирана (у овом случају 10) и када зависи од броја искоришћених процесора. Услови студије су да сви процеси имају подједнако време извршавања, без озбира на q . Резултати

анализе имплементације синхроне стратегије на потпуно повезаној архитектури су показали да се решења високог квалитета постижу за краће време у односу на секвенцијално извршавање. Асинхрона стратегија је тестирана на звездасто и прстенасто повезаним архитектурама мреже процесора и постиже одличне резултате у односу на друге две стратегије. Прецизније, показано је да обе имплементације асинхроне стратегије доприносе побољшању квалитета решења у односу на исто време извршавања секвенцијалног алгорита. Кандидаткиња је извршила и додатна тестирања где су упоређени нови секвенцијални VCO алгорита са више рачунарског времена ($60 \cdot q$ секунди) са најбољом утврђеном верзијом паралелне имплементације VCO алгорита. Добијени резултати и на овом примеру приказали су оправданост примене техника паралелизације на рачунарским системима са дистрибуираном меморијом. Закључак је да је VCO погодан за паралелизацију.

Седмо поглавље (Методологија експерименталног испитивања VCO методе) садржи преглед релевантне литературе из области емпиријске анализе (мета)хеуристичких алгорита. Кандидаткиња је показала да је овладала облашћу дајући, не само преглед литературе, него и педагошки веома добар приказ метода експерименталне анализе стохастичких алгорита. Истакла је услове експерименталне анализе утицаја параметара VCO методе на њене перформансе извршавања за два проблема комбинаторне оптимизације, као и значај неколико методолошких питања: репродукција резултата експерименталних тестова, правилан избор метода за анализу резултата, мере перформанси и улазних података. Чак и у овом прегледном поглављу кандидаткиња даје допринос у виду хијерархијског дијаграма параметара VCO методе са нагласком на њихову узајамну повезаност. Може се закључити да су јасно приказани мотивација и циљеви истраживања у поглављима која следе.

У *осмом поглављу* (Развој и емпиријска анализа VCO_s методе) приказани су резултати експерименталне анализе утицаја параметара на ефикасност и перформансе VCO_s алгорита приликом решавања једног комбинаторног проблема. За анализу је изабран проблем распоређивања независних задатака на идентичне процесоре ($P||C_{\max}$). Резултати извршавања су анализирани помоћу статистичких тестова и графичких приказа. Статистички тестови су засновани на провери једнакости квалитета решења. Показано је да правилна конфигурација квантитативних параметара B и NC зависи од конфигурације квалитативних фактора, функције лојалности и евалуације. Кандидаткиња је утврдила да је за конкретан оптимизациони проблем, избор формуле за функцију лојалности најутицајнији параметар који доприноси ефикасности рада VCO_s алгорита. Други по значајности је функција евалуације. Може се закључити да су анализе и резултати јасно приказани и потпуно разумљиви.

У *деветом поглављу* (Развој и емпиријска анализа VCO_i методе) су изложени резултати експерименталне анализе VCO_i алгорита примењеног на проблем задовољности, односно, 3-SAT проблем. Кандидаткиња је упоредила три елементарна солвера за 3-SAT и показала да софистициран *walksat* алгорита решава задате инстанце проблема за знатно краће време у односу на две варијанте алгорита случајног хода (*rand*). Потврдила је тумачења из литературе и показала да ресетовање после $3n$ корака код алгорита случајног хода не прозводи квалитетна решења. Да би показала успешност и предност рада са популацијом решења, кандидаткиња је имплементирала VCO_i алгорита. За трансформацију решења алгорита користи технику случајног хода. Резултати су показали да VCO_i алгорита постиже значајно боље резултате у поређењу са *rand* алгоритмом. Испитане су и друге варијанте трансформација унутар VCO_i. У фази лета унапред употребљен је софистициран алгорита, *walksat*. Ова верзија алгорита је испитана са два имплементација функције евалуације. Прва се заснива на броју незадовољених клауза; друга, напреднија функција, користи технике *walksat*-а и квалитет решења процењује на основу вредности променљиве *break*. Показано је да друга функција евалуације поспешује перформансе VCO_i алгорита, али да резултати нису бољи од саме *walksat* хеуристике.

Десето поглавље (Закључци и даљи рад) садржи дискусију о приказаним резултатима и представља могуће правце будућег истраживања. Дискусија је свеобухватна и јасно написана. Образложења су у складу са савременим научним сазнањима. Кандидаткиња је показала завидно познавање литературе у оквиру области којом се бави дисертација, уз уверљиве и критички

одабране литературне податке. Комисија није утврдила нелогичности и сматра да је дискусија прецизна, свеобухватна и да доприноси значају дисертације.

V EVALUATION OF THE INDIVIDUAL PARTS OF THE DOCTORAL DISSERTATION:

Title of the doctoral dissertation is formulated with clarity and precision and it precisely reflects the subject of the conducted research.

In *the extended abstract* in Serbian language (Сажетак) the candidate has clearly defined motivation of the research and has stated the results of the dissertation precisely and concisely. The content and the structure of the dissertation are described. The significance of the studied topics (development of the BCO method's algorithm for solving optimization problems, theoretical and empirical exploration of convergence towards optimal solution, and development of parallelization strategies for the sake of increasing efficiency) has been pointed out.

In *the first chapter* (Introduction) the candidate has clearly and systematically presented the problem, the goals and the structure of the research in the dissertation. The chapter contains a list of the current topics in the field of meta-heuristics as an introduction to the motivation and the goals of the research. Further on, the significance of theoretical and empirical examination of convergence of meta-heuristic methods is explained. The scientific contributions of the three subjects are pointed out: (a) theoretical exploration of convergence of the meta-heuristic methods, (b) development of the parallelization strategies of those methods and (c) experimental examination of influence of meta-heuristics parameters on their performance. In a concise and accessible way the candidate has described the structure of the dissertation, presented a list of relevant publications and the contribution of each paper.

In *the second chapter* (Optimization problems and methods) the candidate has presented the field of optimization as a significant research topic in applied mathematics. The principal goal of this chapter is introduction of terminology used in the remainder of the dissertation. The chapter reviews different types of optimization problems and methods, with the focus on heuristic algorithms. The beginning is devoted to description of NP and NP-hard problems from the point of complexity theory of algorithms. Along with known classifications of optimization problems and methods, the candidate describes their historical and theoretical background. Optimization problems are classified by: the types of variables, definition of the feasible space, number of optimization criteria, number of optima and presence of uncertainty. The combinatorial optimization methods are classified as: exact and inexact (approximate) methods. Among approximate methods, special attention is given to heuristics and meta-heuristics. The candidate provides in detail a description of two combinatorial problems: problem of scheduling of independent tasks to identical machines and satisfiability problem 3-SAT.

Chapter three (Meta-heuristic methods) is dedicated to historical development of meta-heuristics with emphasis on nature- and bio-inspired methods. The candidate has reviewed various types of meta-heuristics according to: origins of the algorithm, number of solutions used during the search, randomization and manipulation over solutions. She has provided a brief overview of the development of artificial intelligence, focusing on the methods inspired by biological processes, such as swarm intelligence. The rest of the chapter contains descriptions of seven meta-heuristic methods: simulated annealing, evolutionary computation and genetic algorithms, ant colony optimization, particle swarm optimization, artificial bee colony, tabu search and variable neighborhood search. Final remarks are focused on methods inspired by behavior of bees in nature.

In *the fourth chapter* (Bee colony optimization method) a detailed description of the bee colony optimization method (BCO) has been presented. The candidate has reviewed relevant literature about observed behavior found at bees while searching for nectar and used as the inspiration for development of various bio-inspired algorithms. With great details, two variants of the BCO algorithms are described: constructive (BCOc) and improvement BCO (BCOi). The candidate has introduced a concept of *loyalty function* and new formulas for deciding on loyalty in the phase of the backward pass.

In the presented chapters the candidate has introduced terminology important for the presentation of the research results. She has provided mathematical background of optimization problems and methods and has demonstrated that she mastered the basic terminology and techniques in the field of optimization. The stated material is presented clearly. It is evident that the candidate devoted special attention to the pedagogical aspect of the Introduction based on the high level of readability, the selection of literature and of appropriate examples. Development of the BCO is described with the high level of detail, and all the aspects that require further research are highlighted. In addition, the candidate has expressed the motivation to expand on the current work and contribute to the development of this exceptionally interesting method.

Chapter five (Theoretical analysis of the asymptotic convergence of BCO) contains overview of the well known theoretical results of asymptotic convergence of stochastic processes and algorithms, essential for presentation of contributions of the dissertation. In the initial part of the chapter the motivation and the relevant literature for theoretical analysis of meta-heuristics are reviewed, as well as the benefit from the application of these results in practice. Two types of convergence have been considered: best-so-far and model convergence. Theoretical understanding of the BCO method is elaborated in the second part of the chapter. Generic BCO algorithm is described and important segments of the method that influence the convergence of the algorithm towards the global optimum have been identified. The candidate has considered different instances of the BCO algorithm with regard to construction/modification of (partial) solutions. A different classification is used to distinguish algorithms: with independent iterations and with a global knowledge exchange. For all the considered classifications, necessary and sufficient conditions for which the BCO algorithm converges towards the global optimum have been identified. The candidate has presented the proof for best-so-far convergence of the BCO algorithm with independent iterations and, then, for algorithm with the global knowledge exchange. The former needs to implement construction/modification rules that allow the generation of an optimal solution with probability strictly larger than 0, i.e. $p^* > 0$ with p^* being the probability that any bee generates the optimal solution. In the case when iterations are not independent, the necessary condition is the existence of strictly positive bound $p_{min} > 0$ for which it holds $p^*(t) \geq p_{min} > 0$. According to reviewed literature, for the model convergence it is necessary to design an algorithm with learning component. Therefore, the candidate has identified and presented several constructive/modification rules and, as a result, the model convergence of BCO is considered for different types of optimization problems. More precisely, proof of model convergence is given for: 1. problems when all components are not included; 2. problems when all components are included in the solution. The results of the theoretical analysis have shown in which step of the BCO method the learning component should be incorporated to satisfy conditions of the model convergence.

The candidate has performed detailed analysis and systematization of methods and research results in the field of theoretical analysis of the meta-heuristic algorithms. Based on analysis of actual state of the field, the candidate has focused on two types of convergence and their application to the BCO method. The obtained results have demonstrated that, in the most general case, the considered meta-heuristic methods must use global knowledge and components of learning in order to converge towards optimal solution. The candidate has shown that certain criteria and conditions that depend on the type of the considered optimization problem need to be satisfied in order to increase efficiency of the search.

The sixth chapter (Parallelization strategies for the BCO algorithm) is dedicated to parallelization of BCO. Goals of the research are precisely defined, in accordance with the stated motivation of the research, and are conducive to arriving at concrete conclusions. The candidate has presented three parallelization strategies and five corresponding coarse-grained implementations for distributed memory multi-processor architecture under the Message Passing Interface (MPI) communication protocol. The first strategy is based on independent executions on q processors. The strategy is further investigated through implementations of the BCO algorithm with 6 different configurations of pairs of parameters B and NC. Contributions of the dissertation are reflected in the development of new synchronous and asynchronous cooperative strategies. Both strategies are established on a control of frequency of exchange of data among different processes and different configurations of pairs for parameters B and NC. The synchronous strategy has been analyzed through two implementations: when exchange frequency is fixed (in this case to 10 iterations) and if it depends on the value of q . Analysis has been

conducted under condition that all process have equal amount of time. Results of the analysis, related to completely connected network of processors, have shown that, compared against the best performing sequential BCO algorithm, the higher quality solutions are produced by the synchronous strategy. Asynchronous strategy has been tested on the master-slave multiprocessor architecture and on a unidirectional processor ring. The results have show that the asynchronous strategy produces higher quality solutions compared to the other two strategies. In particular, for the same amount of time, the candidate has demonstrated that both asynchronous implementations improve the quality of the solution compared to the sequential algorithm. The candidate has executed additional tests where the sequential BCO algorithm (maximal CPU is scaled by $60*q$ seconds) is compared against the best parallel implementation of BCO. Once more, the results have justified the utilization of parallelization techniques for distributed memory processors. The main conclusion is that BCO is suitable for parallelization.

Chapter seven (Methodology of experimental research of the BCO method) contains a survey of the relevant literature in the field of empirical analysis of (meta)heuristic algorithms. The candidate has shown that she has mastered the field by giving not only the literature, but also a highly pedagogical exposition of the methods of experimental analysis of stochastic algorithms. She has pointed out the conditions for experimental analysis of the influence of the BCO method's parameters on its execution performance for two combinatorial optimization problems, as well as the importance of several methodological issues: reproduction of the results of experimental tests, a correct choice of methods for the analysis of the results, as well as a correct choice of performance measure and of the input data. Even in this chapter the candidate has made a contribution in the form of a hierarchical diagram of parameters of the BCO method, emphasizing their interrelation. We can conclude that this chapter clearly lays out the motivation and the aims of the research presented in the following two chapters.

Chapter eight (Development and empirical analysis of the BCO method) exposes the results of experimental analysis of the influence of the parameters on the efficiency and the performance of the BCOc algorithm applied to a combinatorial optimization problem. The particular problem is the problem of scheduling independent tasks to identical machines ($P||C_{\max}$). The results of execution have been analysed through statistical tests and visual analysis. The statistical tests are based on equivalence of means. It has been shown that the correct configuration of the quantitative parameters B and NC depends on the configuration of qualitative factors: the loyalty function and the evaluation function. The candidate has determined that for this particular optimization problem the choice of the formula of the loyalty function is the most influential parameter contributing to the efficiency of the BCOc algorithm, and the next in importance is the evaluation function. It can be said that the analyses and the results have been stated in a clear and fully comprehensible form.

In *Chapter nine* (Development and empirical analysis of BCOi) the results of the experimental analysis of the BCOi algorithm applied to the satisfiability problem (3-SAT) are being exposed. The candidate has compared three elementary solvers for 3-SAT and has shown that the sophisticated walksat algorithm solves the given instances of the problem in considerably shorter time than two versions of the random-walk algorithm (rand). She corroborates the interpretation found in the literature showing that a reset after $3n$ steps in the random-walk algorithm does not produce high-quality solutions. In order to show applicability and advantage of working with a population of solutions, the candidate has used BCOi. The implemented algorithm applies the random walk technique to transform solutions. The results have shown that BCOi algorithm achieves significantly better results than the stand-alone rand algorithm. Other kinds of transformations within the BCOi have been examined too. In the forward-pass phase a sophisticated algorithm has been used, walksat. This version of the algorithm has been examined with two different evaluation functions. The first one is based on the number of unsatisfied clauses; the second, more sophisticated one, employs the walksat techniques and estimates the solution's quality based on the value of the variable *break*. It has been shown that the second evaluation function improves the BCOi's performance, however, the results do not exceed those of the walksat heuristic itself.

Chapter ten (Conclusions and future work) presents a discussion of the attained results and sketches possible directions of future research. The discussion is all-encompassing and clearly written. The conclusions fit well with the contemporary scientific views. The candidate has demonstrated outstanding familiarity with the literature in the field this dissertation deals with, the references are convincing and

critically chosen. The Committee has not found any inconsistencies and considers the discussion comprehensive and contributing to the significance of the dissertation.

VI СПИСАК НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КОЈИ СУ ОБЈАВЉЕНИ ИЛИ ПРИХВАЋЕНИ ЗА ОБЈАВЉИВАЊЕ НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ РАДА НА ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ / LIST OF PUBLICATIONS THAT ARE RESULTS OF THE PHD THESIS

1. **Tatjana Jakšić Krüger**, Tatjana Davidović, Dušan Teodorović, Milica Šelmić: *The Bee Colony Optimization Algorithm and its Convergence.*, Special Issue on Theoretical Analysis and Benchmarking of Nature-Inspired Algorithms, 8(5), pp. 340-354. Inderscience, 2016. (M21a)
2. Tatjana Davidović, **Tatjana Jakšić**, Dušan Ramljak, Milica Šelmić, Dušan Teodorović: *Parallelization strategies for bee colony optimization based on message communication protocol*, Optimization, 62(8), pp. 1113-1142. Taylor & Francis, 2013. (M22)
3. **Tatjana Jakšić Krüger**, Tatjana Davidović: *Sensitivity analysis of the Bee Colony Optimization Algorithm*. Proceedings of the 7th International Conference on Bioinspired Optimization Methods and their Applications (BIOMA 2016), pp. 64-80, Bled, Slovenija, Maj 18-20, 2016. (M33)
4. **Tatjana Jakšić Krüger**, Tatjana Davidović: *Empirical Analysis of the Bee Colony Optimization Method on 3-SAT problem*, Proceedings of the 43th Symposium on Operations Research (SYM-OP-IS 2016), pp. 297-301, Tara, Srbija, Sep. 20-23, 2016. (M63)
5. **Tatjana Jakšić Krüger**, Tatjana Davidović: *Model convergence properties of the constructive bee colony optimization algorithm*. Proceedings of the 16th Symposium on Operations Research (SYM-OP-IS 2014), pp. 340-346, 2014 (M63)
6. **Tatjana Jakšić Krüger**: *O konvergenciji metaheurističke metode optimizacije kolonijom pčela*, Zbornik IV simpozijuma "Matematika i primene", pp. 176-188, Beograd, 2014. (M63)

VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

Дисертација садржи следеће резултате истраживања:

1. Доказ асимптотске конвергенције најбољег решења ВСО алгоритма ка глобалном оптимуму. Представљена су два доказа конвергенције. Прво је доказана конвергенција најбољег решења за ВСО алгоритам са независним итерацијама, а затим за ВСО алгоритам са глобалним знањем.
2. Доказ конвергенције по моделу ВСО алгоритма. Представљена су два доказа конвергенције и четири правила модификације. За два правила модификације изложени су докази конвергенције конструктивне верзије ВСО алгоритма (ВСОс) за два типа проблема оптимизације: (а) проблеме код којих све компоненте проблема не припадају оптималном решењу; (б) проблеме код којих све компоненте проблема припадају оптималном решењу. За варијанту алгоритма са поправкама (ВСОи) су представљена одговарајућа правила модификације за два наведена типа проблема.
3. Развој стратегија паралелизације ВСО алгоритма поспешује ефикасност приликом извршавања. На рачунарима са дистрибуираном меморијом и уз помоћ MPI библиотеке, показано је да се конструктивна верзија ВСО алгоритма, примењена на решавање проблема распоређивања $P||C_{max}$, може побољшати применом синхроних и асинхроних стратегија паралелизације.
4. Изложени су резултати експерименталног испитивања обе варијанте ВСО алгоритма на два комбинаторна проблема. Статистичка и визуелна анализа су показале да је код конструктивне варијанте функција лојалности најзначајнији фактор. Код варијанте са поправкама је утврђено да функција евалуације има значајан утицај. Параметри методе В и NC се конфигуришу пошто је извршена правилна селекција квалитативних параметара.

На основу представљених резултата може се закључити да је кандидаткиња дала значајан допринос развоју и анализи методе оптимизације колонијом пчела. Резултати су и теоријског и

експерименталног карактера и практично су применљиви код имплементације ове методе за примену на разне оптимизационе проблеме. Дисертација представља најсвеобухватнији допринос развоју BCO методе и садржи неколико корисних смерница будућим истраживачима у овој области.

VII CONCLUSIONS AND RESULTS OF THE RESEARCH

The following results are presented:

1. Proof of the best-so-far convergence of the BCO algorithm. Two proofs have been presented. The proof for best-so-far convergence of the BCO algorithm with independent iterations is presented first, and then, for the algorithm with the global knowledge.
2. Proof of the model convergence of the BCO algorithm. Two proofs and four modification schemes have been presented. The two proofs correspond to the constructive BCO algorithm (BCOc) for two types of optimization problems: (a) problems when all components are not included; (b) problems when all components are included in the solution. Modification schemes for the improvement version of the BCO algorithm (BCOi) are given for the same two types of optimization problems.
3. Development of parallelization strategies of the BCO algorithm increases the efficiency of its performance. Parallel implementation of BCO have been developed for distributed memory multi-processor architecture under the MPI communication protocol and it is shown that the parallel BCO algorithm performs better than the sequential version for $P||C_{max}$ if synchronous and asynchronous cooperation strategies are implemented.
4. Results of analysis of the both variants of the BCO algorithm are presented. Statistical and visual analyses have shown that loyalty function is the most significant factor for constructive BCO variant. For the improvement variant evaluation function exhibits the highest impact on the performance of the BCO algorithm. Once these qualitative parameters are determined, the quantitative ones, B and NC, should be configured.

Based on the presented results it can be concluded that the candidate has significantly contributed to the development and analysis of the bee colony optimization method. The contributions are of theoretical and experimental nature and are valuable and applicable in implementations of the method for variety of optimization problems. The dissertation represents a most comprehensive contribution to the development of the BCO method and contains several helpful directions for future researcher in this field.

VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА

Експлицитно навести позитивну или негативну оцену начина приказа и тумачења резултата истраживања.

Кандидаткиња Татјана Јакшић Кругер је у целости обавила истраживања предвиђена планом датим у пријави докторске дисертације. Дисертација је написана прегледно, на јасан и разумљив начин. На основу постављених циљева истраживања, добијени су резултати који доприносе даљем развоју методе оптимизације колонијом пчела. Резултати су проистакли из оригинално постављених циљева усмерених ка теоријској верификацији асимптотске конвергенције и побољшању перформанси BCO алгоритма. Начин приказа и тумачење резултата су јасни, прецизни и адекватни. На основу увида у коришћену литературу, јасно је да је кандидат упознат са научним ставовима у области истраживања.

Комисија оцењује докторску тезу позитивном оценом.

VIII EVALUATION OF THE PRESENTATION AND INTERPRETATION OF THE RESEARCH RESULTS

The candidate Tatjana Jakšić Krüger has fully conducted the research stated in the plan given when submitting the topic of the dissertation. The dissertation is written clearly, precisely and in understandable

manner. Based on the objectives of the research, the obtained results contribute to further development of the BCO method. The results originate from originally posted goals directed towards theoretical verification of the asymptotic convergence and towards improving of the algorithm's performance. The presentation and the interpretation of the results are clear, precise and adequate. Based on the used literature, it is clear that the candidate is familiar with scientific ideas in the area of the research.

The Committee gives a positive assessment of the doctoral dissertation.

IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ/ FINAL EVALUATION OF THE DOCTORAL DISSERTATION:

Експлицитно навести да ли дисертација јесте или није написана у складу са наведеним образложењем, као и да ли она садржи или не садржи све битне елементе. Дати јасне, прецизне и концизне одговоре на 3. и 4. питање / Explicitly adduce if the dissertation is or is not written in accordance with the above explanation, as well as if it contains or does not contain all the important elements. Provide clear, precise and concise answers to questions 3 and 4:

1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме?

Комисија сматра да је докторска дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме.

.....
Is the dissertation written entirely in accordance with the reasoning given in the application?

The Committee concludes that the dissertation is written in accordance with the reasoning that was set up in the application of the research proposal.

2. Да ли дисертација садржи све битне елементе?

Докторска дисертација садржи све битне елементе научно-истраживачког рада: прецизно су дефинисани предмет, циљеви и задаци истраживања на основу којих би се истраживање могло поновити и проверити. Детаљно је анализирано стање у области истраживања дисертације као и добијени резултати, дискусија и кључна разматрања. Кандидаткиња је изложила исцрпан списак релевантних референци, који сведоче да је упозната са облашћу истраживања.

.....
Does the dissertation contain all the relevant elements?

The dissertation contains all relevant elements of scientific research: precisely defined subject, objectives and tasks of the research upon which the research could be repeated and confirmed. A detailed analysis of the current state in the field of research of the dissertation is provided, as well as result, discussion and key considerations. The candidate has presented a comprehensive list of relevant literature, which testifies to the fact the candidate is familiar with the research field in question.

3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци?

Докторска дисертација кандидаткиње представља допринос науци по свом исцрпном приступу у области операционих истраживања: теоријски доказ асимптотске конвергенције, изучавање стратегија паралелизације и емпијска анализа различитих имплементација методе оптимизације колонијом пчела.

Теоријска анализа метахеуристика је дуго година представљала изазов за многе истраживаче услед стохастичке природе алгоритама. Коректност методе оптимизације колонијом пчела је први пут доказана у оквиру истраживања ове докторске дисертације. Да би конвергирао ка оптималном решењу, BCO алгоритам мора да задовољи неопходне услове који гарантују асимптотску конвергенцију. Резултати овог истраживања указују на значај глобалног знања и правилан избор компоненти решења.

Паралелизација метахеуристика је такође посебан истраживачки изазов због стохастичке природе алгоритама. Кандидаткиња се и са тиме успешно ухватила у коштац и остварила резултате који могу да буду од практичног значаја, тј. да се користе приликом имплементације паралелних верзија BCO методе.

Допринос кандидаткиње емпиријској анализи BCO алгорита је од великог значаја за све нове имплементације ове методе. Својим резултатима кандидаткиња је поставила стандарде по којима треба подешавати параметре и евалуирати имплементације пре него што се формира коначна варијанта методе која ће постизати најбоље перформансе.

In what way the dissertation provides original scientific contribution?

The doctoral dissertation of the candidate is a contribution to science for its thorough approach in the field of operations research: theoretical proof of asymptotic convergence towards optimal solution, study of parallelization strategies and empirical analysis of various implementations of the bee colony optimization method.

Theoretical analysis of meta-heuristics has presented a challenge for researchers for many years due to the stochastic nature of the algorithms. The correctness of BCO has been first time demonstrated as a result of research in this doctoral dissertation. In order to converge towards an optimal solution, the BCO algorithm must satisfy necessary conditions. Results of this research highlight the importance of global knowledge exchange and of a proper selection of solution components.

Parallelization of meta-heuristics also presents a special challenge due to stochastic nature of the algorithm. The candidate has successfully tackled this topic and has successfully produced results of practical significance, i.e., to be utilized within implementations of parallel versions of the BCO method.

The contribution of the candidate to empirical analysis of the BCO method is of great importance for all new implementations of the method. With her results, the candidate has set the standard for parameter tuning and evaluation of the implementations before the final version of the method is formed that will produce the best performance.

4. Недостаци дисертације и њихов утицај на резултат истраживања

На основу детаљних увида и претходно изнетих мишљења, комисија констатује да дисертација нема недостатака који би, евентуално, утицали на резултате истраживања у току њене израде.

The dissertation shortcomings and their impact on research results

Based on insights and above judgments, the Commission finds that the dissertation has no shortcomings which might, eventually, influence results of the research during its preparation.

X ПРЕДЛОГ / EVALUATION RECOMMENDATION:

На основу укупне оцене дисертације, комисија предлаже:

- да се докторска дисертација прихвати, а кандидаткињи **Татјани Јакшић Кругер** одобри одбрана

.....
- to accept the doctoral dissertation, and to approve defense to the candidate Tatjana Jakšić Krüger

Нови Сад, 10.04.2017

КОМИСИЈА

др Тибор Лукић, доцент
Факултет техничких наука, Нови Сад

др Драган Урошевић, научни саветник
Математички институт САНУ

др Јоаким Линдблад, researcher
Centre for Image Analysis, Dept. for Information Technology
Uppsala University, Sweden

др Милица Шелмић, ванредни професор
Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет

др Јованка Пантовић, редовни професор
Факултет техничких наука, Нови Сад

др Татјана Давидовић, виши научни сарадник
Математички институт САНУ