

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ		
1. Датум и орган који је именовао комисију: Наставно-научно веће Природно-математичког факултета, 13.7.2023.		
2. Састав комисије у складу са <i>Правилима докторских студија Универзитета у Новом Саду</i> :		
1. Др Наташа Крклец Јеринкић	ванредни професор	нумеричка математика, 30.5.2019.
презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
Универзитет у Новом Саду, Природно-математички факултет		председник
установа у којој је запослен-а		функција у комисији
2. Др Сања Рапајић	редовни професор	нумеричка математика, 1.6.2020.
презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
Универзитет у Новом Саду, Природно-математички факултет		члан
установа у којој је запослен-а		функција у комисији
3. Др Наташа Крејић	редовни професор	нумеричка математика, 15.6.2004.
презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
Универзитет у Новом Саду, Природно-математички факултет		члан, ментор
установа у којој је запослен-а		функција у комисији
4. Dr. Marco Viola	доцент	нумеричка математика, 2022
презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
Универзитетски колеџ Даблин, Ирска		члан
установа у којој је запослен-а		функција у комисији

II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

1. Име, име једног родитеља, презиме:

Тијана (Перо) Остојић

2. Датум рођења, општина, држава:

27.02.1991. Сомбор, Србија

3. Назив факултета, назив претходно завршеног нивоа студија и стечени стручни/академски назив:

Универзитет у Новом Саду, Природно-математички факултет, мастер академске студије, мастер математичар, 2014.

4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија:

Докторске студије математике, ПМФ Нови Сад, 2014.

III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Модификације метода Њутновог типа за решавање семи-глатких проблема стохастичке оптимизације

Modifications of Newton-type methods for solving semi-smooth stochastic optimization problems

IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Навести кратак садржај са назнаком броја страница, поглавља, слика, схема, графикона и сл.

Теза има 189 страна и подељена је у 7 поглавља. Нумерички резултати добијени у тези су приказани на 10 слика и у 3 табеле. На крају тезе је дат списак коришћене литературе са 107 библиографских јединица. Прво поглавље дисертације садржи преглед класичних резултата математичке анализе, линеарне алгебре и теорије вероватноће који се користе у разматрањима у тези. У другом поглављу је дат преглед познатих резултата из области нелинеарне оптимизације, а треће поглавље је посвећено основним концептима који се користе у семи-глаткој оптимизацији. У наредном поглављу је уведен појам минимизације семи-глатке функције дате у облику очекиване вредности. Поглавља 5 и 6 предствљају оригинални део тезе и описана су детаљније у наставку. Последње поглавље у тези садржи сумарне резултате и могуће правце даљег истраживања.

The thesis consists of 189 pages and is divided in 7 chapters. Numerical results obtained in the thesis are shown on 10 figures and 3 tables. The bibliography of 107 units is given at the end of the thesis. The first chapter contains an overview of classical results of mathematical analysis, linear algebra and probability theory which are used in the thesis. The second chapter contains fundamental results on nonlinear optimization while the concept of semi-smooth optimization are presented in Chapter 3. Minimization of semi-smooth function stated in the form of mathematical expectation is introduced in Chapter 4. The following two chapters contain original contributions and are described below. The last chapter contains conclusions and some possible further research directions.

V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Два поглавља дисертације садрже оригиналне резултате кандидата. Сви резултати се односе на проблеме семи-глатке стохастичке оптимизације, где подразумевамо да се минимизира семи-глатка функција циља дата у облику математичког очекивања, са или без ограничења. У дисертацији су предложена три алгорита квази-Њутновог типа за решавање овог типа проблема, анализирани су теоријске претпоставке и показана је конвергенција алгоритама под стандардним или нешто блажим претпоставкама у односу на алгоритме доступне у литератури. Комисија сматра да су докази тачни и да је ефикасност предложених метода показана нумеричким резултатима на релевантном скупу тест функција.

Two chapters of the thesis contain original results. All results belong to the area of semi-smooth stochastic optimization, where we assume that one must minimize a semi-smooth objective function stated in the form of mathematical expectation, with or without constraints. Three methods of quasi-Newton type are proposed in the thesis for solving this kind of problems, together with analysis of theoretical assumptions and their convergence is shown under standard or slightly relaxed assumptions compared to algorithms available in the literature. The committee believes that the proofs are correct and

that the efficiency of the proposed methods is shown by numerical results on a set of relevant test examples.

У поглављу 5 су предложена два алгорита за решавање семи-глатких проблема заснована на генерализацији идеје спектралног стохастичког пројектованог градијента. Како је функција циља семи-глатка, градијентни метод није могуће применити, те су предложени алгоритми засновани на субградијентним правцима. Примена спектралног коефицијента у овом случају значајно побољшава перформансе метода, као и у класичном, глатком случају, јер спектрални коефицијент даје минималну информацију другог реда (информацију Њутновог типа). Први предложени метод, заснован на СПС поступку, је скоро сигурно конвергентан под стандардним претпоставкама, али је додатно побољшан увођењем специфичне технике линијског претраживања у ЛС-СПС методу. Комисија сматра да нумерички резултати добијени на скупу проблема који потичу из машинског учења показују ефикасност предложених метода, поготово ЛС-СПС метода.

Chapter 5 contains two algorithms for solving semi-smooth problems based on the idea of spectral stochastic gradient method. Given that the objective function is semi-smooth one cannot apply the gradient method and the proposed algorithms are of subgradient type. The spectral coefficient significantly improves the performance of both considered methods, as is the case in the classical smooth problems as the spectral coefficient gives a minimal second order (Newton-like) information. The first method, SPS is almost surely convergent under the standard assumptions, but it is further improved in LS-SPS by embedding line search techniques into SPS. The committee thinks that numerical results on a set of problems originating from machine learning show the efficiency of the proposed methods, especially for LS-SPS.

Други оригинални метод представљен у истом поглављу је заснован на адаптивном повећању величине узорка која се користи за израчунавање функције циља и одговарајућих субградијената у случају проблема дефинисаног у облику математичког очекивања, као и у случају проблема минимизације коначне суме функција. Алгоритам користи скалирање субградијента чиме се теоријски релаксира претпоставка о ограничениости субградијената, итерација и допустивог скупа. Анализа комплексности је дата за проблем коначних сума. У алгоритму је дефинисана генерална стратегија немонотоног линијског претраживања што омогућава примену различитих правила. Утицај конкретног немонотоног правила је истражен на нумеричким примерима. Како је дефинисање спектралног коефицијента у поступцима са променљивом величином узорка отворен проблем, нумерички су тестиране разне комбинације немонотоних правила и опција за израчунавање спектралног коефицијента. Комисија сматра да је предложени метод релевантан, да је анализа тачна и да значајно релаксира претпоставке и проширује класу проблема на којима је метод примењив.

The second new method proposed in this chapter is based on adaptive sample size used for calculation of the objective function and the corresponding subgradients in the case of problems defined with mathematical expectation, as well as in the case of problems defined as a finite sum of functions. The algorithm employs scaling of the subgradient direction and yields relaxation of boundness assumption for the subgradients, iterates and feasible sets. Complexity analysis is presented for the finite sum problem. A general line-search strategy is incorporated in the algorithm and hence different line search rules can be applied without theoretical issues, while the behaviour of different rules is investigated numerically. Given that the computation of spectral coefficient is an open question in methods with adaptive sample size, different combinations of line search and spectral step computation rules are tested numerically. The committee believes that the proposed method is theoretically sound and that it relaxes the assumptions significantly so that it can be applied on wider class of problems.

Поглавље 6 је посвећено методу приближне рестаурације са променљивом тачношћу за решавање семи-глатких стохастичких проблема. Алгоритам приближне рестаурације (ИР) је познати метод за решавање проблема са ограничењима у класичном случају и успешно је примењен у низу алгоритама за решавање стохастичких проблема са променљивом тачношћу за глатке функције циља. У овој тези је дефинисан алгоритам за семи-глатке проблеме стохастичке оптимизације. Величина узорка се одређује адаптивно, узимајући у обзир напредак у смислу приближавања

стационарној тачки и потребну прецизност. Овим приступом је дефинисан начин одређивања величине узорка који је специфичан за посматрани проблем и оптимизациони метод, без хеуристичких елемената. Показано је да се добија класичан резултат, као и за глатке функције - величина узорка или достиже пун узорак или се бесконачно повећава, зависно од типа проблема. Теоријски је показана скоро сигурна конвергенција под стандардним претпоставкама. Нумерички резултати су добијени адаптирањем квази-Њутновог (БФГС) правца за семи-глатке проблеме. Комисија такође сматра да је метод успешно имплементиран и упоређен са релативним методама из литературе користећи тест функције из машинског учења и линеарних стохастичких проблема комплементарности.

Chapter 6 is dedicated to the Inexact Restoration (IR) method for solving semi-smooth problems with adaptive accuracy. IR algorithm is a well know tool for solving smooth constrained problems and it was already successfully applied in a number of variable-accuracy stochastic methods for the smooth case. In this thesis the method is extended to the semi-smooth stochastic problems. The sample size is determined adaptively taking into account the progress towards a stationary point and the computational costs of needed accuracy. This way, the sample size schedule is defined as a problem-specific optimization-method-derived rule without any heuristic elements. The theoretical results correspond to the results for the smooth case - the sample size either reaches the maximal value or grows to infinity - depending on the type of problem. Theoretically, almost sure convergence is shown under the standard assumptions. Numerical results are obtained with a quasi-Newton direction (BFGS) adapted to the semi-smooth case. The committee thinks that the method is well implemented and successfully compared with the relevant methods from literature on a set of test functions from machine learning and linear stochastic complementarity problems.

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

1. N. Krejić, N. Krklec Jerinkić, T. Ostojić, Spectral projected subgradient method for nonsmooth convex optimization problems, Numerical Algorithms (2022), 1-19, (аутор кореспондент Тијана Остојић), M21a
2. N. Krejić, N. Krklec Jerinkić, T. Ostojić, An inexact restoration-nonsmooth algorithm for variable accuracy for stochastic nonsmooth convex optimization problems in machine learning and stochastic linear complementarity problems, Journal of Computational and Applied Mathematics (2023), 423, (аутор кореспондент Тијана Остојић) M21.

VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА:

Полазећи од чињенице да је функцију дату у облику математичког очекивања готово увек немогуће тачно израчунати, у тези су посматрани оптимизациони поступци који се заснивају на апроксимацији функције циља узорачким очекивањем. Посматрана функција циља је и семи-глатка, што додатно отежава проблем. Дефинисањем и анализом квази-Њутнових поступака са променљивом величином узорка који се користи при апроксимацији узорачким очекивањем, показано је да методе са променљивом величином узорка, засноване на субградијентима и спектралном коефицијенту, као и методе другог реда, теоријски и нумерички унапређују скуп алгоритама доступних за решавање посматраних проблема. Теоријски резултати су типа скоро сигурне конвергенције уз стандардне или благо релаксирани претпоставке за ову врсту проблема. Имплементација метода и бројни нумерички резултати представљени у тези потврђују теоријска разматрања и на релевантним примерима показују предности метода које су резултат ове тезе у односу на раније познате методе.

Given that one can almost never exactly compute the value of a function stated in the form of mathematical expectation, the thesis deals with optimization methods based on Sample Average Approximation of the objective function. Furthermore, the objective function is semi-smooth which makes the problem more difficult to solve. Defining and analysing methods of Quasi-Newton type with adaptive sample size, subgradient directions, and spectral coefficient, as well as second-order methods, this thesis adds to theoretical sound and numerically tested set of algorithms available for this type of problems. The implementation and numerous numerical results presented in the thesis confirm the theoretical findings and demonstrate the advantages of the proposed methods on a set of relevant examples.

VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА:

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

Приказ свих резултата истраживања је организован по логичким целинама, а формулација теоријских резултата је прецизна и илустрована нумеричким резултатима.

All results are organized in meaningful chapters, the formulation of theoretical results is correct and illustrated by numerical results.

Текст дисертације је проверен у софтверу за детекцију плагијаризма iThenticate у Библиотеци Департмана за математику и информатику Природно-математичког факултета, са вредношћу резултатућег индекса сличности 67%. Иако је индекс сличности висок, на основу резултата провере, Комисија је констатовала да је већина подударности, везана за радове (два објављена и један у процесу ревизије, али доступан као препринт), у којима је кандидаткиња коаутор, а који приказују резултате дисертације. Конкретно, највеће поклапање (12%) потиче од теоријске анализе из горепомеутог препринта рада који је у процесу ревизије (извор [1] у Извештају о плагијаризму) и који представља оригинални допринос приказан у поглављу 5.2 ове докторске дисертације. arXiv верзија истог рада (извор [6] у Извештају) доноси додатних 3% преклапања. Друго највеће поклапање (11%, извор [2] у Извештају) потиче од теоријске анализе из OptimizationOnline верзије објављеног рада који представља оригинални допринос приказан у поглављу 5.1 ове докторске дисертације. Извор [8] у Извештају представља исти тај рад објављен у

часопису и доноси 2% преклапања. Теоријска анализа која такође представља оригинални допринос тезе изложен у поглављу 6 повлачи још укупно 17% преклапања (5% - извор [4], arXiv верзија рада, 2% - извор [7], OptimizationOnline верзија рада, 8% - извор [3], стара OptimizationOnline верзија рада, 2% - извор [9], рад објављен у часопису). Преклапање са изворима [5] и [10] (5% и 2%, респективно) потиче од основних дефиниција и теорема из области нумеричке оптимизације којој припадају и наведене дисертације. Остатак преклапања се односи на поједине опште коришћене фразе и дефиниције. Стога се закључује да је докторска дисертација оригинално ауторско дело кандидаткиње Тијане Остојић. Са Извештајем о подударности упознати су сви чланови Комисије.

The thesis is checked for similarities with software iThenticate in the library of Department of Mathematics and Informatics, Faculty of Sciences resulting in 67% of similarity. Although the similarity index is high, checking the result the committee established that most of the similarities comes from the papers authored by the candidate (2 published and 1 in the process but available as a preprint) and that these papers are results of this thesis. In more details, the highest similarity (12%) comes from theoretical analysis of the abovementioned preprint of the paper in the process (source [1] in the Similarity Report) which represents original contribution presented in Section 5.2 of this thesis. arXiv version of the same paper (source [6] in the Report) brings another 3% to similarity index. The second biggest overlap (11%, source [2] in the Report) comes from theoretical analysis stated in OptimizationOnline version of a paper that represents original contribution of the thesis presented in Section 5.1. Source [8] represents the same paper published in journal and brings another 2% of overlap. Theoretical analysis that also represents original contribution of the thesis stated in Section 6 brings 17% of overlap (5% - source [4], arXiv version of the paper, 2% - source [7], OptimizationOnline version, 8% - source [3], OptimizationOnline – the old version, 2% - source [9], journal version of the paper). The overlap with sources [5] and [10] (5% and 2%, respectively) comes from the basic definitions and theorems from the field of numerical optimization, which is also the field of the listed theses. The remaining similarities are certain phrases and definitions that are generally used in this area. Therefore, we conclude that the thesis is an original contribution of Tijana Ostojić. All members of the committee are aware of the similarity check.

На основу наведеног, комисија је донела позитивну оцену за начин приказа и тумачења резултата, са закључком да је докторска дисертација оригинално ауторско дело кандидаткиње Тијане Остојић.

Based on the above the committee has positive opinion on the way that results are shown and interpreted and concluded that the thesis is an original work by Tijana Ostojić.

IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:

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:

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

Дисертација је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме.

The thesis is written in accordance with the title submission.

2. Да ли дисертација садржи све битне елементе?

Дисертација садржи све битне елементе: у уводном делу је дата мотивација за проучавање теме, затим је наведен преглед познатих резултата из релевантних области, а оригинални допринос тезе је формулисан у два обимна поглавља. Теза се завршава пригодним закључком у ком су сумирани доприноси и наведени могући правци даљег истраживања. На крају тезе је дат преглед коришћене литературе.

The thesis has all the important elements: introduction part with the motivation, an overview of state-of-the-art in the relevant field, original contribution presented in 2 long chapters. The thesis ends with Conclusion chapter consisting of a summary of the results and a list of possible future research directions. The thesis ends with bibliography.

3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци?

<p>Оригинални допринос науци је дат кроз два поглавља тезе и састоји се у следећем:</p> <p>1) дефинисан је, теоријски анализиран и нумерички имплементиран метод спектралног стохастичког субградијента, као и надограђени метод са линијским претраживањем;</p> <p>2) метод са адаптивном величином узорка је прилагођен семи-глатким стохастичким проблемима и показана је конвергенција метода под релаксираним теоријским претпоставкама, праћена одговарајућом нумеричком имплементацијом и тестирањем;</p> <p>3) дефинисан је поступак типа приближне рестаурације за семи-глатке проблеме стохастичког типа са променљивом величином узорка и показана је скоро сигурна конвергенција под класичним претпоставкама. Метод је имплементиран прилагођавањем квази-Њутновог правца (БФГС) семи-глатким проблемима и адаптивној прецизности.</p> <p>The original contribution is given in two main chapters and consists of the following:</p> <p>1) the method of spectral stochastic subgradient is defined, theoretically analysed and numerically implemented, as well as a further upgraded method with line search;</p> <p>2) an adaptive sample size method is adjusted to the semi-smooth problems and its convergence is proved under a relaxed assumption, with the suitable numerical implementation and testing presented in the thesis;</p> <p>3) a method of Inexact Restoration type for semi-smooth stochastic problems with adaptive sample size is defined, its almost sure convergence is shown under the set of standard assumptions. The method is implemented with the quasi-Newton direction (BFGS) adjusted to the semi-smooth and variable sample size framework.</p>
<p>4. Који су недостаци дисертације и какав је њихов утицај на резултат истраживања?</p> <p>Теза нема битних недостатака.</p> <p>The thesis has no significant drawbacks.</p>
<p>X ПРЕДЛОГ:</p> <p>На основу наведеног, комисија предлаже:</p> <p>а) да се докторска дисертација прихвати, а кандидаткињи Тијани Остојић одобри одбрана.</p> <p>The committee is proposing to accept the thesis and to allow the candidate to defend the thesis.</p>

Нови Сад, 19. 9. 2023.

1. др Наташа Крклец Јеринкић,
ванредни професор

_____, председник

2. др Сања Рапајић, редовни професор

_____, члан

3. др Наташа Крејић, редовни
професор

_____, члан

4. Dr. Marco Viola, Assist. prof.

_____, члан

НАПОМЕНА: Члан комисије који не жели да потпише извештај јер се не слаже са мишљењем већине чланова комисије, дужан је да унесе у извештај образложење односно разлоге због којих не жели да потпише извештај и да исти потпише.