

Наставно-научном већу  
Математичког факултета  
Универзитета у Београду

На 432. седници Наставно-научног већа Математичког факултета Универзитета у Београду, одржаној 24. априла 2026. године, одређени смо за чланове Комисије за оцену докторске дисертације

## Директно снимање података и дељење снимака између апликација у облаку

кандидата Ивана Ристовића. Менторка ове докторске дисертације је проф. др Милена Вујошевић Јаничић, ванредна професорка Математичког факултета. Комисија је прегледала приложени текст и подноси Већу следећи

# ИЗВЕШТАЈ

## 1. Биографија кандидата

### Лични подаци

Име и презиме: Иван Ристовић  
Место и датум рођења: Ужице, 17. 01. 1995. године  
Звање: мастер информатичар  
Електронска адреса: [ivan.ristovic@matf.bg.ac.rs](mailto:ivan.ristovic@matf.bg.ac.rs)

### Образовање

Ужичку гимназију завршио је 2014. године као носилац Вукове дипломе. Основне студије на смеру Рачунарство и информатика на Математичком факултету завршио је у септембру 2017. године. Мастер студије на Математичком факултету завршио је у јулу 2020. године. Докторске студије на Математичком факултету уписао је у октобру 2020. године.

### Радно искуство

Од 2018. године запослен је на Математичком факултету. На основним студијама држао је вежбе из предмета *Објектно оријентисано програмирање*, *Програмске парадигме*, *Рачунарске мреже*, и *Функционално програмирање*. На мастер студијама држао је вежбе из предмета *Развој софтвера 2* и *Верификација софтвера*. У периоду од јуна 2021. године до априла 2023. радио је као истраживач на пројекту сарадње Математичког факултета и компаније *Oracle*. Од априла 2023. године, поред запослења на Математичком факултету, ангажован је и као истраживач-сениор у компанији *Oracle*.

## 2. Библиографија кандидата

### Радови у интернационалним часописима

Ristović Ivan, Jovanović Vojin, Hofer Peter, Vujošević Janičić Milena, “Direct Object Snapshotting and Sharing for Cloud-Native Applications”, *Future Generation Computer Systems*. Vol. 180, Jul 2026. doi: 10.1016/j.future.2026.108375. (M21a IF 2025: 6.1)

### Радови у националним часописима

Ristović Ivan, Čugurović Milan, Stanojević Strahinja, Spasić Marko, Marinković Vesna, Vujošević Janičić Milena. “Machine Learning-Driven Prediction of Optimal Control Flow Graph Traversal Strategy”, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, Vol. 22, No. 3, 2025. doi: 10.2298/SJEE250828003R (M51)

Ристовић Иван. “Инфраструктура за језички-инваријантна апстрактна синтаксичка стабла програма”, *ИнфоМ - Часопис за информационе технологије и мултимедијалне системе*, Vol. 25, No. 81/82, pp. 47–54, 2025. (M53)

### Радови на конференцијама

Čugurović Milan, Ristović Ivan, Stanojević Strahinja, Spasić Marko, Marinković Vesna, Vujošević Janičić Milena. “ML-Driven Prediction of Optimal Control Flow Graph Traversal Algorithm in Modern Applications”, *12th International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (IcETRAN)*, Чачак, 9-12 Jun 2025. doi: 10.1109/IcETRAN66854.2025.11114103 (M33)

Иван Ристовић, Милан Чугуровић, Страхинја Станојевић, Марко Спасић, Весна Маринковић, Милена Вујошевић Јаничић, “Ефикасан обилазак графова контроле тока програма”, Конференција *YuInfo 2024*, Копаоник, Србија. (M63)

### Патенти

Ristović Ivan, Vujošević Janičić Milena, Hofer Peter, Jovanović Vojin, “Object Snapshotting and Sharing Across Application Instances”, Application for United States Letter Patent, ORC25139810-US-NPR, 2025. (M86)

### Саопштења на конференцијама штампана у изводу

Александар Стефановић, Иван Ристовић, Милена Вујошевић Јаничић. “Прошириви оквир за статичку анализу Јава бајткода”, XV Симпозијум „*Математика и примене*”, Математички факултет, децембар 2025. (M64)

Милица Карличић, Иван Ристовић, Милена Вујошевић Јаничић. “Визуализација метрика коришћењем саветодавне полисе скупљача отпадака”, XV Симпозијум „*Математика и примене*”, Математички факултет, децембар 2025. (M64)

Александар Стефановић, Иван Ристовић, Милена Вујошевић Јаничић. “Аутоматско разрешавање рефлексивних позива статичком анализом Јава бајткода”, XIV Симпозијум „*Математика и примене*”, Математички факултет, децембар 2024. (M64)

Милица Карличић, Иван Ристовић, Милена Вујошевић Јаничић. “Побољшавање ефикасности клијент-сервер апликација динамичким подешавањем параметара скупљача отпадака у

систему *GraalVM*”, XIV Симпозијум „*Математика и примене*”, Математички факултет, децембар 2024. (M64)

Марко Спасић, Иван Ристовић, Страхиња Станојевић, Милан Чугуровић, Милица Карличић, Милена Вујошевић Јаничић. “Евалуација перформанси компилатора *GraalVM* коришћењем дистрибуираног рачунарског кластера”, *XV Српски Конгрес Математичара*, јун 2024. (M64)

Милан Чугуровић, Иван Ристовић, Страхиња Станојевић, Марко Спасић, Весна Маринковић, Милена Вујошевић Јаничић. “Компаративна анализа графова контроле тока програма”, XIII Симпозијум „*Математика и примене*”, Математички факултет, децембар 2023. (M64)

Иван Ристовић. “Рана иницијализација контекста Јава виртуалне машине”, XIII Симпозијум „*Математика и примене*”, Математички факултет, децембар 2023. (M64)

### 3. Предмет дисертације

Предмет ове докторске дисертације је систем за директно снимање и дељење снимака података (*Doss*) између инстанци апликације у току извршавања. *Doss* прави директне снимке објеката, тј. без трансформације објеката асоциране са серијализацијом у традиционалним окружењима. *Doss* учитава снимке у константном времену, и дели их између више инстанци апликације, без трошења времена и меморије на десеријализацију података. *Doss* омогућава ефикасну рану иницијализацију података у микросервисним и безсерверским окружењима, убрзавајући време одзива микросервисних апликација и брзину покретања безсерверских функција. Пошто *Doss* оперише током извршавања програма, могуће је верзионисати и динамички мењати податке које апликација користи без поновног покретања или изградње апликације. Дељење *Doss* снимака података омогућава константно меморијско заузеће за податке приликом покретања више инстанци апликације, наспрам линеарног меморијског заузећа у традиционалним окружењима.

Архитектура *Doss* система за директно снимање и дељење објеката је приказана као апстрактни концепт, а затим имплементирана у оквиру компилаторског екосистема *GraalVM* (*GraalDoss*), као проширење виртуалне машине и скупљача отпадака. За потребе евалуације система *GraalDoss*, дефинисан је и дизајниран скуп референтних програма за евалуацију перформанси система за снимање објеката у облаку. Скуп референтних програма укључује тестове коректности и робустности, микробенчмарке за евалуацију брзине снимања и учитавања, и вишеинстанчне микросервисне апликације које деле податке и препроцесирају велике податке.

*GraalDoss* постиже константну брзину десеријализације што, у поређењу са савременим библиотекама за Јава серијализацију, даје убрзање од неколико редова величине. Константна брзина десеријализације даје убрзање од четири реда величине у апликацијама за природно процесирање текста од 3000 токена. *GraalDoss* убрзава време одзива микросервисних веб апликација за 34%, и смањује укупно меморијско заузеће система од 8 инстанци апликације за 44%, што омогућава покретање дупло више инстанци апликације у оквиру истих меморијских ограничења.

## 4. Приказ дисертације

Број страна докторске дисертације је  $xiv+140$  и она се састоји из десет глава, једног додатка и литературе од 413 библиотечке јединице.

Прва глава је уводног карактера и у њој су приказани су најважнији доприноси дисертације и приказана је организација дисертације.

У другој глави описане су основе извршавања у облаку — технике виртуализације, испоруке услуга, архитектура софтвера у облаку, као и цена извршавања софтвера у облаку. Приказани су тренутни изазови и пружен је осврт на технике оптимизовања извршавања у облаку зарад смањења цене извршавања.

У трећој глави описана је платформа *Oracle GraalVM*, укључујући компилаторе *Graal* и *Native Image*. Додатно, приказани су пратећи механизми и компоненте платформе *Oracle GraalVM* који се користе приликом извршавања у облаку и који чине део савремених безсерверских архитектура за дизајн и испоруку софтвера у облаку.

У четвртој глави дат је преглед савремених техника снимања и радова који се баве оптимизовањем цене извршавања у облаку. Технике снимања су категорисане по опсегу, од техника које снимају читаво стање система, преко техника које снимају стање процеса или делова процеса, и специјализованих техника за снимање процеса окружења за извршавање, до техника снимања индивидуалних објеката. У оквиру сваке категорије је пружен систематски осврт на научне радове и доприносе.

У петој глави приказан је систем за директно снимање и дељење снимака података (*Doss*). Описана су главна својства система *Doss* и дат је опис доприноса које систем пружа у односу на савремене технике снимања података у облаку. Пружен је детаљан опис архитектуре система *Doss*, операција које систем *Doss* пружа, интеграција система *Doss* са окружењем за извршавање, као и основни случајеви употребе система *Doss*.

У шестој глави приказани су детаљи имплементације система *GraalDoss* у програмском језику Јава, у оквиру платформе *Oracle GraalVM*. Приказан је програмски интерфејс система *GraalDoss*, уз пратеће дијаграме архитектуре система. Приказани су примери употребе, као и концептуализација интеграције система *GraalDoss* у савремене радне оквири за безсерверско извршавање у облаку.

У седмој глави представљена је евалуација система *GraalDoss*. Описан је скуп референтних тестова, као и микро и макро експеримената намењених евалуацији перформанси и својстава система *GraalDoss*. Евалуација се састоји од 106 тестова коректности и робустности, евалуације перформанси на нивоу индивидуалних операција система *GraalDoss*, упоредо са теоријским максимумима као и перформансама савремених библиотека за серијализацију у оквиру екосистема програмског језика Јава, и евалуације скалирања система *GraalDoss* на микросервисне апликације у облаку и апликације које оперишу над великим подацима. У овој глави је такође пружено квалитативно и квантитативно поређење предложеног решења, односно система *GraalDoss*, са релевантним техникама оптимизације извршавања у облаку.

У осмој глави дато је квалитативно и квантитативно поређење предложеног решења (*Doss*) и његове референтне имплементације (*GraalDoss*) са модерним техникама снимања. Дата је упоредна анализа заједно са анализом перформанси снимања објеката.

У деветој глави дискутовани су фактори који могу утицати на валидност добијених резултата, као и јединствени изазови интеграције система *GraalDoss* у оквиру окружења која стављају акценат на безбедност и минимални одзив апликација.

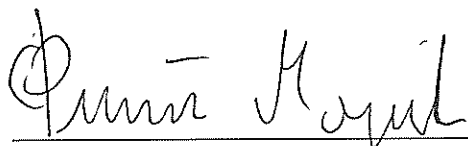
У десетој глави дати су закључци и назначени правци даљег истраживања. У додатку А приказани су детаљни резултати евалуације над скупом референтних објеката у табеларном приказу, где се виде перформансе система *GraalDoss* упоредно са перформансама савремених библиотека за серијализацију у оквиру екосистема програмског језика Јава.

## 5. Закључак и предлог комисије

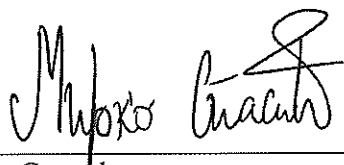
Резултати кандидата Ивана Ристовића представљени у дисертацији су оригинални, нетривијални и дају значајан допринос техникама извршавања у облаку, посебно области компилатора и окружења за извршавање програма. Развој система *Doss* описаног у дисертацији подразумевао је примену различитих техника компилатора и окружења за извршавање програма. У току израде дисертације, кандидат је објавио пет научних радова: од којих један у интернационалном часопису са *SCI* листе, један рад у националном часопису, један самостални рад, као и два рада на конференцијама. Поред тога, кандидат је објавио један патент у Сједињеним Америчким Државама. Кандидат је такође представио седам саопштења на конференцијама (штампана у зборницима извода).

Докторска дисертација је урађена према одобреној пријави и представља оригинално и самостално научно дело, па констатујемо да су се стекли услови за њену јавну одбрану. Због свега наведеног, предложено Наставно-научном већу Математичког факултета да прихвати предложени текст као докторску дисертацију кандидата Ивана Ристовића и одреди комисију за јавну одбрану.

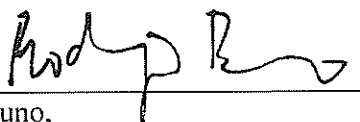
У Београду, 27.04. 2026. године.



проф. др Филип Марић,  
редовни професор Математичког факултета Универзитета у Београду



доц. др Мирко Спасић,  
доцент Математичког факултета Универзитета у Београду



dr Rodrigo Bruno,  
доцент, INESC-ID, Instituto Superior Técnico, Универзитет у Лисабону

To the Educational-Scientific Council  
of the Faculty of Mathematics,  
University of Belgrade

At the 432nd session of the Educational-Scientific Council of the Faculty of Mathematics, University of Belgrade, held on 24th April 2026, we were appointed as members of the Committee for the evaluation of the doctoral dissertation topic

## **Direct Data-Snapshotting and Snapshot Sharing Across Cloud-Native Applications**

of candidate Ivan Ristović. The mentor of this doctoral dissertation is Prof. dr Milena Vujošević Janičić, associate professor at the Faculty of Mathematics. The Committee has reviewed the submitted material and hereby submits to the Council the following

# **REPORT**

## **1. Candidate's biography**

### **Personal information**

Name and surname: Ivan Ristović  
Place and date of birth: Užice, 17. 01. 1995. године  
Qualification: Master informatician  
Email: [ivan.ristovic@matf.bg.ac.rs](mailto:ivan.ristovic@matf.bg.ac.rs)

### **Education**

He graduated from the Užice Gymnasium in 2014, receiving the "Vuk Karadžić" award for distinguished performance. He finished BSc studies in September 2017, as part of the Informatics group at the Faculty of Mathematics. He finished MSc studies in July 2020. He enrolled in the PhD program at the Faculty of Mathematics in October 2020.

### **Work experience**

Since 2018, he has worked at the Faculty of Mathematics as a Teaching Assistant. He held practice classes for the following undergraduate courses: *Object-oriented programming*, *Programming paradigms*, *Computer networks*, and *Functional programming*. He held practice classes for the following master's studies courses: *Software development II* and *Software verification*. In the period from June 2021 to April 2023, he worked as a Researcher, as part of the research collaboration between the Faculty of Mathematics and the *Oracle Labs* research center in Belgrade. Since April 2023, in addition to his employment at the Faculty, he has worked as a Senior Researcher at *Oracle Labs*.

## 2. Candidate's bibliography

### Publications in international scientific journals

Ristović Ivan, Jovanović Vojin, Hofer Peter, Vujošević Janičić Milena. "Direct Object Snapshotting and Sharing for Cloud-Native Applications". *Future Generation Computer Systems*. Vol. 180, July 2026. doi: 10.1016/j.future.2026.108375. (M21a IF 2025: 6.1)

### Publications in national scientific journals

Ristović Ivan, Čugurović Milan, Stanojević Strahinja, Spasić Marko, Marinković Vesna, Vujošević Janičić Milena. "Machine Learning-Driven Prediction of Optimal Control Flow Graph Traversal Strategy", *Serbian Journal of Electrical Engineering*, Vol. 22, No. 3, 2025. doi: 10.2298/SJEE250828003R (M51)

Ristović Ivan. "LINFAST Infrastructure for Language-Invariant Abstract Syntax Trees", *The Journal of Information Technology and Multimedia Systems - Info M*, Vol. 25, No. 81/82, pp. 47–54, 2025. (M53)

### Conference papers

Čugurović Milan, Ristović Ivan, Stanojević Strahinja, Spasić Marko, Marinković Vesna, Vujošević Janičić Milena. "ML-Driven Prediction of Optimal Control Flow Graph Traversal Algorithm in Modern Applications", *12th International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (IcETRAN)*, Čačak, 9-12 June 2025. doi: 10.1109/IcETRAN66854.2025.11114103 (M33)

Ristović Ivan, Čugurović Milan, Stanojević Strahinja, Spasić Marko, Marinković Vesna, Vujošević Janičić Milena, "Efficient Control Flow Graph Traversals", Conference *YuInfo 2024*, Kopaonik, Serbia. (M63)

### Patents

Ristović Ivan, Vujošević Janičić Milena, Hofer Peter, Jovanović Vojin, "Object Snapshotting and Sharing Across Application Instances", Application for United States Letter Patent, ORC25139810-US-NPR, 2025. (M86)

### Conference proceedings

Stefanović Aleksandar, Ivan Ristović, Milena Vujošević Janičić. "Extensible Java Bytecode Data-Flow Analysis JVMCI Framework", XV Symposium "*Mathematics and Applications*", Faculty of Mathematics, December 2025. (M64)

Milica Karličić, Ivan Ristović, Milena Vujošević Janičić. "Metrics Visualization Using Profiling-Based Adaptive GC Policy for Serverless", XV Symposium "*Mathematics and Applications*", Faculty of Mathematics, December 2025. (M64)

Stefanović Aleksandar, Ivan Ristović, Milena Vujošević Janičić. "Constant Folding of Reflective Calls via Static Analysis of Java Bytecode", XIV Symposium "*Mathematics and Applications*", Faculty of Mathematics, December 2024. (M64)

Milica Karličić, Ivan Ristović, Milena Vujošević Janičić. “Profiling-Based Adaptive GC Policy for Serverless”, XIV Symposium “*Mathematics and Applications*”, Faculty of Mathematics, December 2024. (M64)

Marko Spasić, Ivan Ristović, Strahinja Stanojević, Milan Čugurović, Milica Karličić, Milena Vujošević Janičić. “Evaluation of GraalVM compiler performance using a distributed computing cluster”, *XV Serbian Mathematical Congress*, June 2024. (M64)

Ivan Ristović, Milan Čugurović, Strahinja Stanojević, Marko Spasić, Vesna Marinković, Milena Vujošević Janičić. “Efficient Control Flow Graph Traversal”. XIII Symposium “*Mathematics and Applications*”, Faculty of Mathematics, December 2023. (M64)

Ivan Ristović. “Early initialization of the Java virtual machine context”, XIII Symposium “*Mathematics and Applications*”, Faculty of Mathematics, December 2023. (M64)

### 3. Subject of the doctoral dissertation

The subject of this dissertation is a system for direct snapshotting and data-snapshot sharing (*Doss*) across multiple application instances during execution. *Doss* captures direct snapshots of live heap objects, i.e., without transformations associated with serialization in traditional environments. *Doss* loads snapshots in constant time and shares snapshots across multiple instances of an application without wasting processing time and memory for data deserialization. *Doss* enables efficient data pre-initialization in microservice and serverless applications, improving microservice application latency and initialization times of serverless functions. Because *Doss* operates during program execution, it is possible to version-control and dynamically replace application data without restarting or rebuilding the application. Sharing *Doss* data snapshots yields constant data-memory usage across multiple application instances, compared to linear data-memory usage in traditional environments.

The architecture of the *Doss* system for direct snapshotting and snapshot sharing is presented as an abstract concept and then implemented within the *GraalVM* ecosystem (*GraalDoss*), as an extension to the *GraalVM* virtual machine and the accompanying garbage collector. *GraalDoss* is evaluated on a novel cloud-native benchmark set. The benchmark set includes basic operational correctness and robustness tests, microbenchmarks for evaluating snapshotting and loading performance, and multi-instance microservice applications that share data and preprocess large datasets.

*GraalDoss* achieves constant-time deserialization speed, which, compared to modern Java serialization libraries, provides a speedup of several orders of magnitude. Constant-time deserialization gives a four-order-of-magnitude speedup in natural language processing (NLP) applications when applied to an input of 3,000 tokens. *GraalDoss* improves the first-response times of microservice web applications by 34% and reduces the total system memory usage for eight microservice instances by 44%, enabling twice as many application instances to be spawned within the same memory constraints.

## 4. Dissertation outline

The dissertation spans xiv+140 pages and contains ten chapters, one appendix, and 413 bibliographic units.

The first chapter introduces the dissertation, presents its most important contributions, and presents its outline.

The second chapter describes the fundamentals of cloud computing, covering virtualization techniques, service delivery models, cloud software architecture, and software execution costs. It highlights current challenges and reviews optimization techniques that reduce the cost of executing software in the cloud.

The third chapter covers the *Oracle GraalVM* platform, detailing the *Graal* and *Native Image* compilers. It presents the supporting mechanisms and components of *Oracle GraalVM* essential for modern serverless architectures for executing software in the cloud.

The fourth chapter reviews contemporary Checkpoint/Restore techniques and studies that address cloud execution-cost optimizations. These techniques are categorized by their scope — ranging from techniques that capture the entire system state, through those that capture process or partial process states, and specialized methods that record language-runtime processes, down to techniques that capture individual objects. Each category is accompanied by a systematic review of scientific advances and contributions.

The fifth chapter presents the Direct Object Snapshotting and Sharing (*Doss*) system. It describes the main features of *Doss* and outlines its contributions relative to modern Checkpoint/Restore techniques in the cloud. It gives a detailed description of *Doss's* architecture, operations, and integration with the execution environment, as well as an overview of primary use cases for *Doss*.

The sixth chapter presents the Java implementation of the *GraalDoss* system within the *Oracle GraalVM* platform. It outlines the *GraalDoss* API alongside architecture diagrams, presents usage examples, and conceptualizes the integration of *GraalDoss* into modern serverless execution frameworks.

The seventh chapter presents the evaluation of the *GraalDoss* system. It describes a test suite along with reference micro and macro benchmarks designed to assess the performance of *GraalDoss*. The evaluation comprises 106 correctness and robustness tests, performance assessments of individual *GraalDoss* operations compared to theoretical maxima along with modern Java serialization libraries, and scalability tests on microservices and big-data processing applications. The chapter also provides a qualitative and quantitative comparison between *GraalDoss* and state-of-the-art Checkpoint/Restore techniques.

The eighth chapter presents a qualitative and quantitative comparison of the proposed solution (*Doss*) and its reference implementation (*GraalDoss*) against the state-of-the-art Checkpoint/Restore solutions. It gives a comparison of both features and snapshotting operation performance.

The ninth chapter discusses factors that might affect the validity of the obtained results and explores the unique challenges of integrating the *GraalDoss* system into security-centered and latency-sensitive environments.

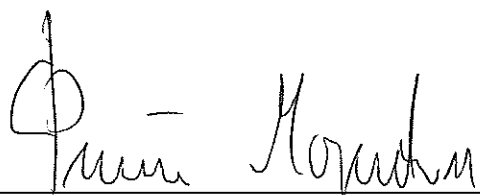
The tenth chapter presents conclusions and outlines future research directions. Appendix A displays detailed evaluation results on a set of reference objects in tabular form, showing the performance of the *GraalDoss* system alongside that of modern Java serialization libraries.

## **5. Conclusions and Committee suggestions**

The results presented by the candidate Ivan Ristović in his dissertation are original, non-trivial, and make a significant contribution to cloud-execution optimizations, particularly in the areas of compilers and language runtimes. The development of the *Doss* system described in the dissertation involved the application of various compiler techniques and language-runtime optimizations. During the course of the dissertation, the candidate published five research papers: one in an international journal listed in the SCI index, one in a national journal, one independent paper, and two conference papers. In addition, the candidate has filed one United States Letter Patent. The candidate also participated in seven conference talks (published as conference abstracts).

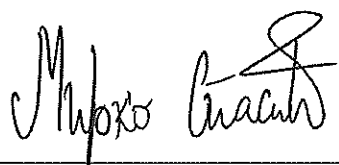
The doctoral dissertation was completed in accordance with the approved proposal and constitutes an original and independent scientific work; therefore, we confirm that the conditions for a public defense have been met. For all the above reasons, we hereby suggest that the Faculty of Mathematics accept the submitted text as the doctoral dissertation of Ivan Ristović and appoint a committee for the public defense.

In Belgrade, on 27th April, 2026.

Handwritten signature of Filip Marić in black ink, written in Cyrillic script.

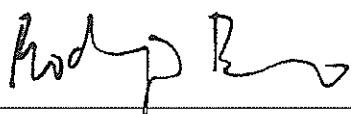
---

prof. dr Filip Marić,  
Full Professor, Faculty of Mathematics, University of Belgrade

Handwritten signature of Mirko Spasić in black ink, written in Cyrillic script.

---

dr. Mirko Spasić,  
Assistant Professor, Faculty of Mathematics, University of Belgrade

Handwritten signature of Rodrigo Bruno in black ink, written in Latin script.

---

dr. Rodrigo Bruno,  
Assistant Professor, INESC-ID, Instituto Superior Técnico, University of Lisbon