

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

| I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ  |                   |   |
|--|-------------------|---|
| 1. Датум и орган који је именовao комисију:<br>Решење декана Факултета техничких наука у Новом Саду, бр. 012-199/8-2022 од 01.12.2022. |                   |   |
| 2. Састав комисије у складу са <i>Правилима докторских студија Универзитета у Новом Саду</i> :   |                   |   |
| 1. Др Војин Шенк   | Редовни професор  | Телекомуникације и обрада сигнала,<br>(18.07.2003.) |
| презиме и име  | звање             | ужа научна област и датум избора                    |
| Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука у Новом Саду  |                   | Председник комисије                                 |
| установа у којој је запослен-а   |                   | функција у комисији                                 |
| 2. Др Владо Делић  | Редовни професор  | Телекомуникације и обрада сигнала,<br>(28.03.2013.) |
| презиме и име  | звање             | ужа научна област и датум избора                    |
| Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука у Новом Саду  |                   | Члан комисије                                       |
| установа у којој је запослен-а   |                   | функција у комисији                                 |
| 3. Др Дејан Вукобратовић   | Редовни професор  | Телекомуникације и обрада сигнала,<br>(01.04.2019.) |
| презиме и име  | звање             | ужа научна област и датум избора                    |
| Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука у Новом Саду  |                   | Члан комисије                                       |
| установа у којој је запослен-а   |                   | функција у комисији                                 |
| 4. Др Младен Копривица   | Доцент            | Телекомуникације, (01.02.2022.)                     |
| презиме и име  | звање             | ужа научна област и датум избора                    |
| Универзитет у Београду, Електротехнички факултет у Београду  |                   | Члан комисије                                       |
| установа у којој је запослен-а   |                   | функција у комисији                                 |
| 5. Др Петар Бојовић  | Доцент            | Умрежени рачунарски системи,<br>(19.03.2019.)       |
| презиме и име  | звање             | ужа научна област и датум избора                    |
| Унион универзитет, Рачунарски факултет у Београду  |                   | Члан комисије                                       |
| установа у којој је запослен-а   |                   | функција у комисији                                 |
| 6. Др Живко Бојовић  | Ванредни професор | Телекомуникације и обрада сигнала,<br>(15.01.2020.) |
| презиме и име  | звање             | ужа научна област и датум избора                    |
| Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука у Новом Саду  |                   | Члан комисије и ментор                              |
| установа у којој је запослен-а   |                   | функција у комисији                                 |

| <b>II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ</b>   |
|--|
| <p>1. Име, име једног родитеља, презиме:<br/>Теодор, Младен Малбашић</p> <p>2. Датум рођења, општина, држава:<br/>28.04.1993., Савски венац, Југославија</p> <p>3. Назив факултета, назив претходно завршеног нивоа студија и стечени стручни/академски назив:<br/>Факултет техничких наука, Енергетика, електроника и телекомуникације, Мастер инжењер електротехнике и рачунарства</p> <p>4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија:<br/>2017. година, Енергетика, електроника и телекомуникације</p>  |
| <b>III НАСЛОВ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:</b>   |
| Развој и имплементација LBORU методе за динамичко балансирање оптерећења сервера у хибридном SDN мрежама   |
| <b>IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:</b>   |
| <p>Навести кратак садржај са назнаком броја страница, поглавља, слика, схема, графикона и сл.</p> <p>Докторска дисертација кандидата Теодора Малбашића написана је на 146 страница (са пратећом документацијом укупно 169 страница). Садржај је подељен у 11 поглавља. Дисертација садржи 40 слика, 0 графикона, 17 табела и 137 научних референци, као и 1 прилог. На почетку тезе су дати: наслов, захвалница, кључна документацијска информација на српском и на енглеском језику, садржај рада, попис слика, попис табела, списак скраћеница, сажетак на српском и на енглеском језику.</p> <p>Кратак садржај дисертације обухвата следећих 11 поглавља:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Увод</li> <li>2) Анализа постојећих решења</li> <li>3) Концепт софтверски дефинисаних мрежа</li> <li>4) Развој модела хибридне SDN мреже</li> <li>5) Технологије балансирања оптерећења</li> <li>6) Концепт решења</li> <li>7) Тестирање предложеног решења</li> <li>8) Примена модела хибридног SDN-а у 6G мрежама</li> <li>9) Закључак</li> <li>10) Литература</li> <li>11) Прилог</li> </ol> |

## V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

### Наслов дисертације

Комисија сматра да наслов јасно назначава тематику која је предмет истраживања које је у докторској дисертацији приказано.

### Поглавље 1 – Увод

У уводном поглављу, јасно су објашњени проблеми који значајно отежавају увођење напредних сервиса у рачунарске мреже са традиционалном архитектуром. Посебно је указано на проблеме до којих долази услед недостатка потребних ресурса у мрежи, али и могућности да се изгради флексибилно и скалабилно окружење које би динамички одговарало на потребе корисника. Као решење предложено је инкрементално увођење SDN (енг. *Software Defined Network*) функционалности у традиционалну мрежну инфраструктуру и изградња тзв. хибридног SDN окружења заснованог на интернет технологијама. Овакво окружење са знатно већим степеном програмабилности, представља флексибилан концепт умрежавања, у коме се применом динамичког *load balancing*-а, може оптималније утицати на оптерећење мрежних ресурса. У наставку поглавља, у основним цртама је описана LBORU (енг. *Load Balancing by Optimizing Resource Utilization*) метода за динамичко балансирање оптерећења сервера у хибридним SDN мрежама. Редом су изложени: предмет истраживања, полазне хипотезе, циљеви и методологија истраживања и структура и организација дисертације.

Мишљење Комисије је да је уводно поглавље пружило адекватну слику о потребама и мотивима за оваквим истраживањем у области напредних мрежних технологија, као и о самом току и циљевима истраживања.

### Поглавље 2 – Анализа постојећих решења

У овом поглављу се у кратким цртама наводе проблеми и изазови са којим се сусрећемо у имплементацији напредних технологија и сервиса у традиционалним рачунарским мрежама са хијерархијском организацијом. Указује се на значај постојања флексибилне мрежне инфраструктуре, како би се организовало паметно окружење у коме се на релативно једноставан начин имплементирају нови сервиси и правовремено и квалитетно решавају захтеви корисника. Као традиционалан алат који се користи за надзор рада мреже и проверу стања оптерећености мрежних ресурса, описан је SNMP (енг. *Simple Network Management Protocol*) и објашњена његова архитектура и механизам функционисања.

Комисија се слаже да је у оквиру овог поглавља дат јасан увид у актуелна истраживања у овој области.

### Поглавље 3 – Концепт софтверски дефинисаних мрежа

У овом поглављу је детаљно изложен концепт SDN умрежавања. Посебан осврт је направљен на дизајн трослојне архитектуре, са детаљним објашњењем улоге свих кључних компонената. Нагласак је стављен на улогу SDN контролера и SDN свичева, као и њихову интеграцију са осталим мрежним компонентама. Сама архитектура мреже, илустрована је низом конкретних примера из праксе, који се наводе и у актуелној литератури. Кроз пратећи текст, прецизно је објашњен модел управљања токовима пакета, који представља фундаментални концепт на којем се граде SDN мреже. У наставку су дате теоријске основе *OpenFlow* протокола и описан читав низ постојећих SDN контролера, чији се рад заснива на примени овог протокола. Посебан акценат је стављен на примену POX (енг. *Python based open source OpenFlow/Software Defined Networking Controller*) контролера, који има кључну улогу за развој и имплементацију програмабилног окружења које треба да одликује велика флексибилност и скалабилност, а што је од суштинског значаја за резултате овог истраживања.

Комисија сматра да је овим поглављем прецизно описана архитектура SDN мреже, детаљно описане њене основне компоненте и јасно указано на фундаменталне предности које са собом носи имплементација овакве, високо програмабилне инфраструктуре.

#### **Поглавље 4 – Развој модела хибридне SDN мреже**

Поглавље пружа увид у детаље различитих модела имплементације SDN функционалности у традиционалним рачунарским мрежама. Указује се на изазове техничке и финансијске природе, који прате процес имплементације и онемогућавају пуну примену ове функционалности. Даље су адекватно образложени разлози, због којих инкрементална примена SDN функционалности представља једино рационално решење, а реализација хибридне SDN мреже окосницу будућих мрежних комуникација. С тим у вези, објашњена су нека од постојећих решења, која су резултат истраживања описаних у актуелној литератури. На крају поглавља се на дискретан начин, наглашава потреба за ефикаснијим балансирањем оптерећења у комплексним рачунарским инфраструктурама као што су хибридне SDN мреже. Посебно је размотрена потреба за имплементацијом таквог решења на серверима (нпр. у *data* центрима), како би се динамички одговорило на интензивне захтеве корисника за ангажовањем значајних рачунарских ресурса. Комисија сматра, да је овим поглављем адекватно образложена потреба за инкременталном применом SDN функционалности и изградњом тзв. хибридних SDN мрежа, како би се ефикасно одговорило на потребе корисника за динамичким ангажовањем значајних рачунарских ресурса.

#### **Поглавље 5 – Технологије балансирања оптерећења**

Тематика овог поглавља се односи на примену различитих технологија за балансирање оптерећења. У том смислу, детаљно су описани механизми статичког и динамичког балансирања оптерећења у мрежи и објашњене различите метрике које се користе у овом процесу. Поред тога, дат је свеобухватан осврт на бројне примере примене различитих концепата балансирања оптерећења у пракси, укључујући и балансирање саобраћаја у SDN мрежама. Посебно су сагледани изазови, које са собом носи имплементација динамичког балансирања оптерећења у хибридној SDN мрежи и предложено ново решење - LBORU методе за балансирање оптерећења на серверима. Као основа овог решења, наведени су модификација протокола за комуникацију клијената и сервера у SDN делу мреже, коришћење виртуелних IP и MAC адреса и имплементација механизма више-параметарског балансирања оптерећења на SDN контролеру.

Комисија се слаже, да је у оквиру овог поглавља дат јасан увид у постојеће концепте балансирања оптерећења, у њихове предности и недостатке, као и потребу да се у комплексним мрежним инфраструктурама примени нови механизам расподеле оптерећења заснован на више-параметарској метрици. Коришћена је актуелна и релевантна литература.

#### **Поглавље 6 – Концепт решења**

У овом поглављу се објашњава модел новог решења за балансирање оптерећења на серверима хибридне SDN мреже и то кроз употребу SDN свича као *engine*-а и SDN контролера као управљача. Даље се образлаже потреба за модификацијом токова пакета и детаљно објашњавају кључни принципи ове модификације. Изложена је и апстрактна скица програмског решења, односно блок дијаграм са два програмска модула, од којих један служи за праћење оптерећења на серверима, а други спроводи нову процедуру балансирања оптерећења на серверима.

Комисија сматра да је овим поглављем на адекватан начин представљен концепт решења на којем се заснива LBORU метода за балансирање оптерећења на серверима.

#### **Поглавље 7 – Тестирање предложеног решења**

У ово поглављу се детаљно описује процес тестирања предложеног решења, који је спроведен да би се утврдила практична вредност предложеног решења. Прецизно је описано окружење са виртуелним серверима и другим мрежним компонентама, које је за потребе тестирања креирано на EVE-NG платформи. Да би се проценила валидност добијених резултата, тестирање је спроведено у условима који одговарају онима у реалном окружењу. Ефикасност LBORU методе за балансирање оптерећења тестирана је на *web* серверима у емулираном окружењу, при чему је за потребе тестирања развијен посебан алат који се састоји из компоненте посла (успоставља везу са *web* сервером, извршава трансакцију једног захтева и извештава о времену потребном за њен завршетак) и компоненте конкуренције (повећава број истовремених корисника у контролисаним условима,

записује време одзива сваке трансакције, и обавља статистичке рачунске операције). На крају поглавља, извршена је анализа добијених резултата, која је указала на утицај обраде сваког првог пакета везе на вредност почетног кашњења у SDN мрежи и линеарну зависност између броја трансакција у секунди и броја истовремених веза. Оцењивање ефикасности предложене LBORU методе анализирано је кроз посматрање неравнотеже коришћености ресурса на серверима као једног од показатеља ефикасности механизма за балансирање оптерећења на серверима. Резултати анализе су потврдили да повећањем броја истовремених веза и оптерећења на серверима, неравнотежа постаје значајно мање приметна.

Начин тестирања предложеног решења, комисија сматра валидним и констатује да је упоредна анализа резултата добијених применом новог и постојећих решења спроведана коректно и детаљно.

## **Поглавље 8 – Примена модела хибридног SDN-а у 6G мрежама**

Имајући у виду модерне трендове у мрежним комуникацијама (5G, 6G мреже), ово поглавље се бави применом хибридног SDN-а у *core*-у ових мрежа. Систематично се објашњавају разлози за његову еволуцију и примену концепта тзв. E2E архитектуре (енг. *end-to-end*), који је заснован на сервисима, софтверски дефинисаном умрежавању, виртуелизацији мрежних функција (NFV концепт) и подели мрежа на слајсеве. Даље се објашњава да се, у већини SDN мрежа, квалитет сервиса обезбеђује статички (резервацијом ресурса), према унапред дефинисаним правилима, што онемогућава флексибилније управљање квалитетом сервиса. Као пример се наводи одсуство могућности, да се на мрежној опреми динамички управља редовима за чекање. Као једно од могућих решења, предлаже се:

- оптимизован E2E слајсинг у мрежама са дељеном инфраструктуром кроз више домена и
- динамичко управљање редовима за чекање.

Валидност предложеног решења је проверена у тестном окружењу, које је изграђено на EVE-NG платформи са више слајсова, да би се на што адекватнији начин осликало окружење будућих 6G мрежа. Осим дистрибуиране организације контролне равни, где један SDN контролер управља са једним слајсом, ради једноставности тестне платформе, група сервиса је ограничена на један сервис по слајсу. Рачунате су максималне брзине преузимања и отпремања података (*download*-а и *upload*-а) за сваки слајс и тестни сценарио, пратећи предложену процедуру алокације ресурса. Добијени резултати су показали да се применом овог решења може унапредити процес управљања квалитетом сервиса у комплексним мрежним окружењима.

Комисија сматра да поглавље јасно указује да се применом концепта хибридне SDN мреже и динамичким управљањем редовима за чекање може обезбедити већи ниво квалитета сервиса, што је експериментално и потврђено.

## **Поглавље 9 – Закључак**

У закључку су сумирани резултати истраживања и назначени су даљи правци рада.

Комисија сматра да су логично представљени наредни кораци у развоју SDN мрежне технологије и да су коректно описани проблеми који остају да се реше.

## **Поглавље 10 – Литература**

Комисија сматра да коришћена литература осликава систематичан приступ истраживању. Коришћена литература је актуелна и обухвата истраживања везана за примену напредних технологија динамичког балансирања саобраћаја на серверским капацитетима у хибридном SDN мрежама у оквиру различитих примена, повезаних са динамичким обезбеђивањем квалитета сервиса, што је у складу са циљевима ове дисертације.

## **Поглавље 11 - Прилог**

У прилогу дисертације изложено је целокупно програмско решење техничке реализације истраживања.

Мишљење Комисије је да је садржај прилога адекватан и да доприноси лакшем разумевању детаља истраживања.

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

Таксативно навести називе радова, где и када су објављени. Прво навести најмање један рад објављен или прихваћен за објављивање у складу са *Правилима докторских студија Универзитета у Новом Саду* који је повезан са садржајем докторске дисертације. У случају радова прихваћених за објављивање, таксативно навести називе радова, где и када ће бити објављени и приложити потврду уредника часописа о томе.

**Рад у међународном часопису (M23):**

1. **Malbasic T.**, Bojovic P.D., Bojovic Z., Suh J., Vujosevic D.: Hybrid SDN Networks: A Multi-parameter Server Load Balancing Scheme, Journal of Network and Systems Management, Jan. 2022, Vol. 30, No. 2, pp. 1-28, ISSN: 1064-7570 (Telecommunications; 61/93; IF 2021= 2.198), <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-383737/v1>

**Рад у међународном часопису (M22):**

2. Bojovic P.D., **Malbasic T.**, Vujosevic D., Martic G., Bojovic Z.: Dynamic QoS management for a flexible 5G/6G network core: a step toward a higher programmability, Sensors, Apr. 2022, Vol. 22, No. 8, pp. 1-23, ISSN: 1424-8220 (Engineering, Electrical & Electronic; 95/278; IF 2021= 3.847) <https://doi.org/10.3390/s22082849>

## **VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА:**

Најзначајнији допринос докторске дисертације јесте дефинисање методологије, којом се на ефикасан, али и економски прагматичан начин, имплементирала SDN функционалност у традиционалним рачунарским мрежама. Прецизно су дефинисани принципи и модел инкременталне примене SDN технологије у традиционалним рачунарским мрежама и реализација флексибилне и скалабилне, хибридне SDN мрежне инфраструктуре. У тако дизајнираној инфраструктури, могуће је да се применом напреднијих техника, знатно ефикасније балансира оптерећење на серверима (у односу на традиционалне методе балансирања). Методологија изложена овим истраживањем омогућује имплементацију и организацију веома еластичног окружења, у коме се лако може имплементирати нова шема балансирања оптерећења. Ова шема балансирања оптерећења заснована је на више-параметарској метрици и нуди боље резултате, у односу на оне који се добијају применом традиционалних метода или LBBSRT модела балансирања оптерећења. Кључни резултати, односно научни доприноси јесу:

- Идентификација и систематизација постојећих метода примене SDN функционалности у циљу реализације хибридне мрежне инфраструктуре;
- Развој модела хибридне SDN мреже који надилази по перформансама традиционалне мреже, а са друге стране смањује комплексност решења саме имплементације мреже;
- Доказ о могућности имплементације концепта инкременталне примене SDN функционалности у традиционалној мрежној инфраструктури, на основу резултата добијених истраживањима спроведеним на EVE-NG платформи;
- Упоредна анализа резултата добијених имплементацијом постојећих алгоритама за балансирање оптерећења са резултатима добијеним имплементацијом алгоритама заснованог на више-параметарској метрици у хибридној SDN мрежи;
- Презентација статистичких података који потврђују ефикасније балансирање оптерећења применом више-параметарске метрике у односу на постојеће методе балансирања оптерећења.

## **VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА:**

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

На основу детаљног увида у садржај докторске дисертације од стране чланова Комисије, закључено је да је истраживање пажљиво испланирано и систематично извршено, да су експерименти адекватно спроведени и да су резултати истраживања интерпретирани коректно и објективно. Оцена комисије је, дакле, позитивна.

**Рад је проверен у софтверу за детекцију плагијаризма iThenticate.**

## **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 у целини написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме.

2. Да ли дисертација садржи све битне елементе?

Дисертација садржи све битне елементе који се захтевају по Статуту Факултета техничких наука и Универзитета у Новом Саду, као и Закона о високом образовању.

3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци?

Најзначајнији допринос ове докторске дисертације јесте дефинисање методологије, којом се на ефикасан, али и економски прагматичан начин, SDN функционалност инкрементално имплементира у традиционалним рачунарским мрежама. Прецизно су дефинисани принципи, на којима се применом SDN технологије уноси знатно већи степен програмабилности у традиционалне рачунарске мреже и реализује веома флексибилна и скалабилна хибридна SDN мрежна инфраструктура. Експериментално је утврђено, да се у овако дизајнираном, веома еластичном окружењу, применом нове шеме балансирања оптерећења, која се заснива на више-параметарској метрици постижу бољи резултати у односу на оне који се добијају применом традиционалних метода или LBBSRT модела балансирања оптерећења на серверима. Овакав концепт динамичког балансирања оптерећења може бити део шире стратегије обезбеђивања динамичког квалитета сервиса у хибридном SDN core-у не само 5G већ и будућих 6G мрежа.

|  |
|--|
| <p>4. Који су недостаци дисертације и какав је њихов утицај на резултат истраживања?</p> <p>Потребно је скренути пажњу на одређена ограничења овог научног истраживања и она су проузрокована начином на који се обављало тестирање предложеног решења. Тестни сценарио је реализован у лабораторијским условима где је тестно окружење сачињено од минималног броја уређаја, односно машина потребних за остваривање циљева истраживања. Према томе, када би се тестирање обављало у реалистичном или <i>cloud</i> окружењу, резултати би могли бити другачији.</p> <p>Такође, истраживање није обухватило детаљније испитивање могућности LBORU шеме балансирања на интегрисаној инфраструктури која би осим <i>core</i>-а обухватала и <i>edge</i> мреже. Објективне разлоге треба наћи у чињеници да се <i>edge</i> и радио део мреже још увек налази у активној фази развоја и стандардизације.</p> |
| <p><b>X ПРЕДЛОГ:</b></p> <p>На основу наведеног, комисија предлаже:</p>  |
| <p>На основу укупне оцене дисертације, комисија предлаже да се докторска дисертација „Развој и имплементација LBORU методе за динамичко балансирање оптерећења сервера у хибридном SDN мрежама“ кандидата Теодора Малбашића прихвати, а кандидату одобри јавна одбрана.</p>  |

Место и датум: Нови Сад, 09.12.2022.

1. др Војин Шенк, редовни професор  
\_\_\_\_\_, председник

2. др Владо Делић, редовни професор  
\_\_\_\_\_, члан

3. др Дејан Вукобратовић, редовни професор  
\_\_\_\_\_, члан

4. др Младен Копривица, доцент  
\_\_\_\_\_, члан

5. др Петар Бојовић, доцент  
\_\_\_\_\_, члан

6. др Живко Бојовић, ванредни професор  
\_\_\_\_\_, 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.