

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

| I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ                                                                                                                                                                                                                              |                     |                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Датум и орган који је именовао комисију:                                                                                                                                                                                                      |                     |                                                                                              |
| Декан Факултета техничких наука, на основу одлуке Научно-наставног већа Факултета техничких наука Универзитета у Новом Саду, донео је Решење о именовању комисије за оцену и одбрану докторске дисертације број 012-199/26-2023 од 28. 12. 2023. |                     |                                                                                              |
| 2. Састав комисије у складу са <i>Правилима докторских студија Универзитета у Новом Саду</i> :                                                                                                                                                   |                     |                                                                                              |
| 1.                                                                                                                                                                                                                                               |                     | Енергетска електроника, машине, погони и обновљиви извори електричне енергије, 12. 9. 2023.  |
| др Борис Думнић                                                                                                                                                                                                                                  | ред. проф.          | ужа научна област и датум избора                                                             |
| презиме и име                                                                                                                                                                                                                                    | звање               |                                                                                              |
| Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду                                                                                                                                                                                               | председник          |                                                                                              |
| установа у којој је запослен-а                                                                                                                                                                                                                   | функција у комисији |                                                                                              |
| 2.                                                                                                                                                                                                                                               |                     | Аутоматика, 1. 11. 2017.                                                                     |
| др Томислав Шекара                                                                                                                                                                                                                               | ред. проф.          | ужа научна област и датум избора                                                             |
| презиме и име                                                                                                                                                                                                                                    | звање               |                                                                                              |
| Електротехнички факултет, Универзитет у Београду                                                                                                                                                                                                 | члан                |                                                                                              |
| установа у којој је запослен-а                                                                                                                                                                                                                   | функција у комисији |                                                                                              |
| 3.                                                                                                                                                                                                                                               |                     | Енергетска електроника, машине, погони и обновљиви извори електричне енергије, 3. 3. 2023.   |
| др Стеван Грабић                                                                                                                                                                                                                                 | ванр. проф.         | ужа научна област и датум избора                                                             |
| презиме и име                                                                                                                                                                                                                                    | звање               |                                                                                              |
| Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду                                                                                                                                                                                               | члан                |                                                                                              |
| установа у којој је запослен-а                                                                                                                                                                                                                   | функција у комисији |                                                                                              |
| 4.                                                                                                                                                                                                                                               |                     | Енергетска електроника, машине, погони и обновљиви извори електричне енергије, 17. 11. 2022. |
| др Дејан Јеркан                                                                                                                                                                                                                                  | ванр. проф.         | ужа научна област и датум избора                                                             |
| презиме и име                                                                                                                                                                                                                                    | звање               |                                                                                              |
| Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду                                                                                                                                                                                               | члан                |                                                                                              |
| установа у којој је запослен-а                                                                                                                                                                                                                   | функција у комисији |                                                                                              |
| 5.                                                                                                                                                                                                                                               |                     | Енергетска електроника, машине, погони и обновљиви извори електричне енергије, 01. 10. 2019. |
| др Марко Векић                                                                                                                                                                                                                                   | ванр. проф.         | ужа научна област и датум избора                                                             |
| презиме и име                                                                                                                                                                                                                                    | звање               |                                                                                              |
| Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду                                                                                                                                                                                               | Ментор              |                                                                                              |
| установа у којој је запослен-а                                                                                                                                                                                                                   | функција у комисији |                                                                                              |
| 6.                                                                                                                                                                                                                                               |                     | Аутоматика и управљање                                                                       |
| др Милан Рапаић                                                                                                                                                                                                                                  | ред. проф.          |                                                                                              |

|                                                    |       |                                  |  |
|----------------------------------------------------|-------|----------------------------------|--|
|                                                    |       | системима, 07.10.2021.           |  |
| презиме и име                                      | звање | ужа научна област и датум избора |  |
| Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду |       | Ментор                           |  |
| установа у којој је запослен-а                     |       | функција у комисији              |  |

  

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 1. Име, име једног родитеља, презиме: <b>Ивана (Татјана) Тодоровић (рођена Исаков)</b><br>2. Датум рођења, општина, држава: <b>7. 2. 1993, Рума, Србија</b><br>3. Назив факултета, назив претходно завршеног нивоа студија и стечени стручни/академски назив:<br><b>Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду; Енергетика, електроника и телекомуникације; Мастер инжењер електротехнике и рачунарства</b><br>4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија: <b>2017, Енергетика, електроника и телекомуникације, Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Примарна регулација и стабилизација микромрежа са претварачима енергетске електронике у условима непосредне размене електричне енергије                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Навести кратак садржај са назнаком броја страница, поглавља, слика, схема, графикона и сл.<br>Докторска дисертација под насловом „Примарна регулација и стабилизација микромрежа са претварачима енергетске електронике у условима непосредне размене електричне енергије“, кандидаткиње Иване Тодоровић, садржи укупно 7 поглавља на 98 страница писаног текста.<br>Главном делу рада претходи пратећи уводни елементи који садрже: насловну страницу дисертације, обавезну општу документацију на српском и енглеском језику, сажетак рада на српском језику (стр. i), сажетак рада на енглеском језику (стр. ii), садржај рада (стр. iii), листу слика (стр. iv, v) и листу табела (стр. vi). Докторска дисертација садржи 7 поглавља, и то:<br>1. Увод;<br>2. Преглед стања у научној области<br>3. Поставка предложеног алгорита управљања;<br>4. Потврда исправности рада предложеног закона управљања;<br>5. Закључак;<br>6. Литература;<br>7. Прилози.<br>Дисертација је написана на 98 страна, позива се на 189 референци, садржи 16 слика, 22 графикона и 7 табела. |
| <b>V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Наслов</b><br>Наслов докторске дисертације је коректно и прецизно формулисан. Јасно указује на разматрану проблематику и у потпуности одражава предмет и суштину теме.<br><b>Поглавље 1. Увод.</b><br>У уводном поглављу укратко је описана тема истраживања. На крају уводног поглавља дата је детаљна структура докторске дисертације.<br><b>Поглавље 2. Преглед стања у научној области</b><br>У другом поглављу је описан концепт микромрежа и њихов значај, потом су предочене различите архитектуре организације и управљања микромрежа и дат је                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

опсежан преглед стања у области којом се бави докторска дисертација. Закључак Комисије је да су предмет и циљ истраживања систематски и прецизно дефинисани, као и да је приказана литература у потпуности релевантна за тему докторске дисертације и да је анализирана на јасан и свеобухватан начин.

### **Поглавље 3. Поставка предложеног алгоритма управљања**

Како су претварачи енергетске електронике основни медијум за управљање радом микромрежа, у другом поглављу је описана структура и склоп претварача који се користи приликом повезивања купаца-произвођача у микромрежу и дат његов математички модел. Надаље, постављени су жељени управљачки циљеви које треба остварити. Детаљно је изложена децентрализована хијерархијски организована управљачка структура претварача, прво према одговарајућим хијерархијским управљачким нивоима, а потом и свеобухватно. Разматрано је и устаљено стање у микромрежи и односи између електричних величина од значаја. Потом, доказана је стабилност микромреже уколико се примењује предложени управљачки закон. Оригинални допринос ове дисертације се огледа у предложеном децентрализованом примарном закону управљања претварача енергетске електронике у микромрежама, заснованом на примени функције циља која обједињује неколико битних критеријума за ефикасан, стабилан и проширив рад микромреже. Комисија констатује да је предложени управљачки закон формулисан на одговарајући начин и да је доказ његове стабилности математички утемељен.

### **Поглавље 4. Потврда рада предложеног закона управљања**

Предложена контролна структура је тестирана у различитим врстама симулација у којима су испитиване разнолике топологије микромрежа и тумачени добијени одзиви. Како је скалабилност врло пожељна карактеристика у микромрежама, вршене су симулације у којима је примењени децентрализовани управљачки закон примењен у испитним мрежама с различитим бројем чворова. Потврђено је да је предложена управљачка структура погодна за примену у микромрежама различитих топологија. Затим, вршене су детаљне симулације у стварном времену, које уважавају реалистичне сценарије рада микромрежа и подробно анализирани добијени одзиви.

Комисија закључује да је потврда рада предложене управљачке структуре одговарајуће спроведена и да су испуњени сви унапред постављени управљачки циљеви, чак и у непожељним режимима рада микромрежа (попут, на пример, изненадних одспајања круте електричне мреже или купаца-произвођача).

### **Поглавље 5 Закључак**

У закључном поглављу дат је осврт на спроведено истраживање и истакнут је значај посматраног проблема и предложеног решења. Такође, дати су и могући правци даљег истраживања.

### **Поглавље 6. Литература**

Коришћена литература је одговарајућег обима и квалитета и у потпуности одговара теми докторске дисертације.

### **Поглавље 7. Прилози**

Поједина математичка извођења и резултати измештени су у посебно поглавље докторске дисертације из практичних разлога.

Општа оцена је да је дисертација написана систематично, јасно и садржајно. Представљено истраживање је спроведено ваљано и темељно, уз коришћење актуелне литературе и савремених алата. Предложено решење је добро образложено, теоријски је утемељено, практично је реализовано и одговарајуће је вредновано. Такође, на основу анализе резултата, закључује се да је циљ истраживања остварен.

**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.

**Ivana Isakov**, Marko Vekić, Milan Rapaić, Ivan Todorović, Stevan Grabić, Decentralized self-stabilizing primary control of microgrids, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 155, Part A, 2024, 109477, ISSN 0142-0615, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109477>. – **M21**

I. Todorović, **I. Isakov**, D. Reljić, D. G. Jerkan and D. Dujić, 'Mitigation of Voltage and Frequency Excursions in Low-Inertia Microgrids', in IEEE Access, vol. 11, pp. 9351-9367, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3238869. – **M22**

S. Grabić, M. Vekić, M. Rapaić, **I. Isakov** and V. Porobić, "Peer-to-Peer-Based Power Flow Control in Microgrids With Limited Voltage Harmonic Distortion," in IEEE Access, vol. 11, pp. 130627-130643, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3331567. – **M22**

M. Vekić, **I. Isakov**, M. Rapaić, S. Grabić, I. Todorović and V. Porobić, 'Decentralized microgrid control "beyond droop"', 2022 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), Novi Sad, Serbia, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISGT-Europe54678.2022.9960392. – **M33**

**I. Isakov**, M. Rapaić, M. Vekić and I. Todorović, 'Decentralized Goal Function-Based Control of DGSs in Microgrid Applications', 2023 IEEE Belgrade PowerTech, Belgrade, Serbia, 2023, pp. 01-06, doi: 10.1109/PowerTech55446.2023.10202962. – **M33**

M. Vekić, **I. Isakov**, M. Rapaić, I. Todorović, S. Grabić and M. Bašić, "Secondary and Primary Goal-Function-Based Control in Inverter-Interfaced Microgrids," 2023 22nd International Symposium on Power Electronics (Ee), Novi Sad, Serbia, 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/Ee59906.2023.10346112. – **M33**

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

Кандидаткиња Ивана Тодоровић је у својој докторској дисертацији под насловом „Примарна регулација и стабилизација микромрежа са претварачима енергетске електронике у условима непосредне размене електричне енергије“ предпочила досадашње проблеме и изазове у управљању микромрежама, фокусирала се на оне кључне и справ њих дефинисала истраживачке циљеве. Главни постављени циљеви су одржавање учестаности и напона чворова микромреже у унапред дефинисаним границама, као и омогућавање непосредне размене активне снаге између чворова у којима су повезани купци-произвођачи. Поред тога, подржавање скалабилног рада микромреже у различитим режимима рада, као и једноставна имплементација управљачке структуре користећи стандардне микроконтролере, су такође предочени као важни задаци у управљању микромрежа, а из њих следи и могућност подршке различитим актуелним „grid codes“.

На основу постављених циљева истраживања, кандидаткиња је формулисала управљачки закон који се примењује у контроли претварача енергетске електронике и који успешно врши све функције очекиване од стандардног претварача енергетске електронике повезаног на (микро)мрежу. Поред основних функција, остварене су и одређене напредне функције попут ограничења одступања остварене учестаности и напона у чворовима.

Управљачки закон заснован је на примени тзв. функције циља (која у обзир узима управљачке циљеве и тежи да их квантификује, односно да „казни“ одступања величина од значаја од задатих вредности) и осмишљен је тако да минимизује вредност функције циља. Како је ово задатак сваког претварача енергетске електронике у микромрежи, њихов рад је међусобно усклађен и то без нужно неопходне комуникационе мреже. На овај начин је подржана скалабилност микромрежа. Поред тога, коначан облик предложеног управљачког закона је једноставан и зависи искључиво од локалних величина, те је остварено управљање у потпуности децентрализовано и независно од топологије мреже у којој се примењује. Предложени управљачки закон је оригиналан и заснован на савременим приступима у теорији управљања.

Аналитички је доказана и стабилност предложеног управљачког закона, применом Љапуновљеве теорије стабилности. Дефинисана је глобална функција циља, која у обзир узима појединачне функције циља за сваки чвор у микромрежи. Показано је да је глобална функција циља опадајућа, односно да ће њена вредност након поремећаја тежити нули. Самим тим, загарантовано је да ће након поремећаја постојати устаљено стање у коме ће учестаност и модуо напона чворова бити у унапред дефинисаним границама.

У сврху потврде рада предложене управљачке структуре вршене су бројне рачунарске симулације у којима је испитиван рад управљачког алгорита у устаљеном стању у микромрежама различитих топологија. Потом, вршене су и тзв. HIL симулације у стварном времену у којима је примењен концепт хардвера закључаног у петљи (енгл. *hardware in the loop* – HIL), у којима се предложени управљачки програм претварача енергетске електронике похрањивао у стандардне индустријске микроконтролере. Резултати истраживања су детаљно описани, тумачени и показују да су сви истраживачки циљеви и претпоставке испуњени.

Комисија закључује да докторска дисертација даје одговоре на постављена истраживачка питања, приказује резултате истраживања и потврђује претпоставке дефинисане у уводном делу докторске дисертације. Кандидаткиња је испунила све задатке које је поставила у пријави дисертације, одговарајуће резултате објавила у 3 часописа са СЦИ листе, и тиме остварила оригиналан и значајан допринос у области

примарног управљања микромрежама.

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

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

Након пажљиве, детаљне и свеобухватне анализе, Комисија констатује: докторска дисертација Иване Тодоровић под насловом *„Примарна регулација и стабилизација микромрежа са претвараачима енергетске електронике у условима непосредне размене електричне енергије“* је написана јасно и квалитетно, начин приказа и тумачење резултата истраживања спроведеног у оквиру дисертације су коректни и исцрпни, а сам рад представља значајан допринос у односу на постојеће методе примарне регулације микромрежа.

Рад је проверен у софтверу за детекцију плагијаризма *iThenticate*, у Библиотеци ФТН-а, о чему је Комисија извештена путем електронске поште.

*Комисија позитивно оцењује начин приказа и тумачења резултата.*

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:</b></p> <p>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:</p> <p>1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме?</p> <p>2. Да ли дисертација садржи све битне елементе?</p> <p>3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци?</p> <p>4. Који су недостаци дисертације и какав је њихов утицај на резултат истраживања?</p> <p>Комисија за оцену докторске дисертације Иване Тодоровић под насловом „<i>Примарна регулација и стабилизација микромрежа са претварачима енергетске електронике у условима непосредне размене електричне енергије</i>“, након пажљиве, детаљне и свеобухватне анализе, закључује следеће:</p> <p>1. Дисертација је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме ове докторске дисертације;</p> <p>2. Дисертација садржи све битне елементе неопходне за позитивну оцену дисертације;</p> <p>3. Дисертација представља оригиналан допринос науци – конкретно, предложена децентрализована управљачка структура за претвараче енергетске електронике представљају оригиналан допринос науци;</p> <p>4. Комисија није уочила нити суштинске нити формалне недостатке дисертације.</p> |
| <p><b>X ПРЕДЛОГ:</b></p> <p>На основу наведеног, комисија предлаже да се докторска дисертација кандидаткиње <b>Иване Тодоровић</b> под насловом „<i>Примарна регулација и стабилизација микромрежа са претварачима енергетске електронике у условима непосредне размене електричне енергије</i>“ <b>прихвати</b>, а кандидаткињи одобри јавна одбрана дисертације.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

Место и датум: Нови Сад, 30. јануар 2024.

1. др Борис Думнић, редовни професор  
\_\_\_\_\_, председник

2. др Томислав Шекара, редовни професор  
\_\_\_\_\_, члан

3. др Стеван Грабић, ванредни професор  
\_\_\_\_\_, члан

4. др Дејан Јеркан, ванредни професор  
\_\_\_\_\_, члан

5. др Марко Векић, ванредни професор  
\_\_\_\_\_, ментор

5. др Милан Рапаић, редовни професор  
\_\_\_\_\_, ментор

**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.