

## ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА

## ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

-обавезна садржина- свака рубрика мора бити попуњена

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

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ
<p>1. Датум и орган који је именовao комисију</p> <p>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 021-199/46-2018 од 26. 11. 2020.</p> <p>2. Састав комисије са знаком имена и презимена сваког члана, звања, назива уже научне области за коју је изабран у звање, датума избора у звање и назив факултета, установе у којој је члан комисије запослен:</p> <p>1. <b>Др Зоран Јеличић</b>, редовни професор, у.н.о.: Аутоматика и управљање системима, датум избора у звање: 20.06.2013. Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду; Председник комисије;</p> <p>2. <b>Др Филип Кулић</b>, редовни професор, у.н.о.: Аутоматика и управљање системима, датум избора у звање: 12.09.2013. Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду; Члан комисије;</p> <p>3. <b>Др Мирна Капетина</b>, доцент, у.н.о.: Аутоматика и управљање системима, датум избора у звање: 01.05.2018. Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду; Члан комисије;</p> <p>4. <b>Др Јован Микуловић</b>, редовни професор, у.н.о.: Електронергетски системи, 01.01.2020. Електротехнички факултет Универзитета у Београду; Члан комисије;</p> <p>5. <b>Др Милан Рапаић</b>, ванредни професор, у.н.о.: Аутоматика и управљање системима, датум избора у звање: 07.10.2016. Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду; Ментор рада.</p> <p>6. <b>Др Томислав Шекара</b>, редовни професор, у.н.о.: Аутоматика, датум избора у звање: 01.11.2017. Електротехнички факултет Универзитета у Београду; Ментор рада.</p>

**II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ**

1. Име, име једног родитеља, презиме:

**Марко (Чедомир) Бошковић**

2. Датум рођења, општина, држава:

**17.10.1991., Сарајево, Босна и Херцеговина**

3. Назив факултета, назив студијског програма дипломских академских студија – мастер и стечени стручни назив

**Електротехнички факултет Универзитета у Источном Сарајеву  
Студијски програм: Аутоматика и електроника  
Мастер електротехнике – 300 ЕСПБ – Аутоматика и електроника**

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

**2016,  
Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду  
Студијски програм: Рачунарство и аутоматика**

5. Назив факултета, назив магистарске тезе, научна област и датум одбране:

-

6. Научна област из које је стечено академско звање магистра наука:

-

**III НАСЛОВ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

**Савремене методе пројектовања конвенционалних индустријских регулатора под ограничењима на робусност**

#### **IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

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

Докторска дисертација под насловом **Савремене методе пројектовања конвенционалних индустријских регулатора под ограничењима на робусност**, кандидата Марка Бошковића садржи (поред 19 страна пратећег уводног материјала), укупно 7 поглавља на 160 страница писаног текста.

Главном делу рада претходи пратећи уводни материјал (стр. *i-xix*), која садржи: насловну страницу дисертације, обавезну општу документацију на српском и енглеском језику, посвету, захвалницу, садржај рада, списак слика и списак табела. Докторска дисертација садржи 7 поглавља, и то:

1. Увод.
2. Преглед стања у научној области и полазне основе у истраживању.
3. Структуре управљања са конвенционалним регулаторима.
4. Основни квантитативни показатељи понашања система.
5. Савремене методе пројектовања конвенционалних регулатора.
6. Аналитичке формуле подешавања параметара PIDC и PID регулатора за секундарну регулацију фреквенције у електроенергетском систему.
7. Закључак.

Сем наведених поглавља, дисертација садржи и преглед литературе (библиографију). Дисертација је написана на 160 страна, позива се на 214 референци, садржи 21 табелу и 75 графикона.

#### **V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

##### **Наслов**

Наслов докторске дисертације је коректно и прецизно формулисан. Јасно указује на разматрану проблематику и у потпуности изражава предмет и суштину теме.

##### **Поглавље 1. Увод**

У уводном поглављу јасно је прецизирана проблематика којом се дисертација бави, наведене су новоразвијене методе пројектовања конвенционалних регулатора и значај остварених резултата. У уводу је такође детаљно приказана структура и организација дисертације.

##### **Поглавље 2. Преглед стања у научној области и полазне основе у истраживању**

У другом поглављу је дат приказ литературе од значаја за истраживање, односно, све оне методе пројектовања конвенционалних регулатора за индустријске процесе под ограничењима на перформансе/робусност, које додатно расветљавају централну тему истраживања. У овом одељку су описане како нумеричке методе пројектовања, тако и аналитичке методе пројектовања које су доступне у широј научној и стручној литератури. Описани су разлози зашто су конвенционални управљачки алгоритми заступљени у индустрији без обзира на развој софистицираних техника управљања и наглашени мотиви за даље истраживање у овој области.

##### **Поглавље 3. Структуре управљања са конвенционалним регулаторима**

У овом одељку су описане структуре управљачких петљи са конвенционалним регулаторима које се користе у дисертацији, уведена је нотација и терминологија која се користи у развоју метода пројектовања регулатора, описане су карактеристичне функције преноса односно функције осетљивости на основу којих је дата анализа робусности система услед неодређености параметара процеса.

##### **Поглавље 4. Основни квантитативни показатељи понашања система**

У оквиру четвртог поглавља је истакнуто да код савремених метода пројектовања, пројектант треба да има могућност да квантитативно специфицира жељену перформансу/робусност система. Стога су у овом одељку дате дефиниције релевантних показатеља понашања (индекса перформансе и робусности) система управљања који се користе у новоразвијеним метода пројектовања конвенционалних регулатора. Описани су интегрални показатељи, од којих се интеграл апсолутне грешке користи у дисертацији, како би се вредновала ефикасност потискивања поремећаја. Поред тога, додатно су наведене

основне дефиниције показатеља пеформансе на основу карактеристике прелазног режима система. У наставку су на основу функција осетљивости, уведених у претходном поглављу, дефинисане квантитативне мере робусности система и осетљивости на мерни шум.

#### **Поглавље 5. Савремене методе пројектовања конвенционалних регулатора**

У овом одељку приказане су новоразвијене, оригиналне методе пројектовања конвенционалних регулатора проистекле током рада на дисертацији. Прво су представљене методе засноване на нумеричком решавању погодне дефинисаних оптимизационих проблема, у којима се робусност обезбеђује наметањем одговарајућих ограничења. У оквиру дисертације методи овог типа се називају нумеричким методама. У наставку су представљене аналитичке методе пројектовања код којих се променом вредности подесивог параметра усклађује компромис између перформансе и робусности система. На примеру изабраних структура конвенционалних регулатора извршена је верификација свих развијених метода пројектовања, нумеричких и аналитичких. У основи, пројектовање конвенционалних регулатора на основу развијених метода омогућава ефикасно потискивање поремећаја (и обликовање референце).

#### **Поглавље 6. Аналитичке формуле подешавања параметара PIDC и PID регулатора за секундарну регулацију фреквенције у електроенергетском систему**

У овом одељку приказана је оригинална методологија аналитичког пројектовања конвенционалних регулатора (PID и PIDC) у оквиру система за секундарну регулацију фреквенције, односно размене активне снаге, конвенционалних електроенергетских система. У овом контексту разликована су два типа PIDC регулатора, PIDC1 и PIDC2, у зависности од тога да ли је редно везани компензатор првог или другог реда. Дата је детаљна анализа утицаја подесивих параметара на успостављање компромиса између перформансе и робусности. Најпре је приказан оригиналан поступак пројектовања PIDC регулатора за електроенергетски систем са једном регулационом области. Разматрана су три карактеристична случаја. У првом случају посматрана област је напајана генератором са парном турбином без поновног загревања паре, у другом случају разматран је генератор са парном турбином која користи поновно загревање паре. Коначно, у трећем случају разматран је генератор са хидротурбином. Према најбољим сазнањима Комисије, ово је прва студија у којој је примењена јединствена методологија пројектовања применљива за електроенергетске системе са агрегатима са сва три типа турбина. На основу описане методологије пројектовања изведене су компактне аналитичке формуле подешавања PIDC и PID регулатора за секундарну регулацију фреквенције. Такође је детаљно описан поступак апроксимације добијених PIDC регулатора једноставнијим PID управљачким алгоритмима, уз одржавање жељеног нивоа робусности. Предложена метода пројектовања регулатора је једноставна и директна, описана са два подесива параметра. Први од ових параметара, обележен са  $\lambda$ , првенствено утиче на индексе перформансе, односно брзину одзива, система у затвореној спреси, док други, обележен са  $N$ , примарно одређује робусност и осетљивост на мерни шум. На крају је дата детаљна нумеричка анализа као и поређење остварене перформансе и робусности са недавно објављеним методама пројектовања. У контексту предложене методологије пројектовања испитана је појава ограничења брзине производње (*Generation Rate Constraint – GRC*) као једног типа нелинеарности који је укључен у модел електроенергетског система. Коначно, представљено је проширење предложене процедуре на електроенергетске системе са више умрежених области.

#### **Закључак**

У закључку се даје квалитативни осврт на предности и мане различитих метода пројектовања конвенционалних регулатора разматраних у оквиру саме дисертације. Истиче се да предност нумеричких метода пројектовања у односу на аналитичке методе лежи у томе што критеријум оптималности укључује модел процеса (у општем случају вишег реда) без потребе за редукцијом реда модела. Насупрот томе, као недостатак нумеричких метода пројектовања наводи се чињеница да успешност поступка оптимизације параметара у великој мери зависи од задатих почетних вредности (почетних погађања). Такође се примећује да аналитичке методе дају једноставне, експлицитне формуле за подешавање параметара регулатора, што их чини веома погодним у пракси. Истиче се да предложене методе пројектовања имају општи карактер, те да нису ограничене на неку посебну (ужу)

класу процеса, већ се могу користити за пројектовање регулатора за широку класу представника индустријских процеса. Са аспекта регулације електроенергетских система, идентификовано је неколико могућих смерова у даљем истраживању. Као први корак, наводи се развој аналитичких правила за подешавање параметара конвенционалних регулатора у склопу система за аутоматску регулацију напона (*Automatic Voltage Regulator* – AVR), односно токова реактивне снаге, те проширење предложених поступака у случају проблема једновремене регулације фреквенције и напона у савременим електроенергетским мрежама (нарочито у оквиру концепта микро-мрежа).

#### **Литература**

Литература је адекватног обима, одговарајућа проблематици која је разматрана у дисертацији.

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

**М.Ћ. Бошковић**, Т.В. Šekara, М.Р. Rapačić, Novel tuning rules for PIDC and PID load frequency controllers considering robustness and sensitivity to measurement noise, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 114, p. 105416, January 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105416> - M21

**М.Ћ. Бошковић**, М.Р. Rapačić, Z.D. Jeličić, Particle swarm optimization of PID controller under constraints on performance and robustness, *International Journal of Electrical Engineering and Computing*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-10, 2018. <http://dx.doi.org/10.7251/IJEEEC1801001B> - M53

**М.Ћ. Бошковић**, Т.В. Šekara, М. Radulović, В. Cvetković, A novel method for optimization of PID/PIDC controller under constraints on phase margin and sensitivity to measurement noise based on nonsymmetrical optimum method, *ETF Journal of Electrical Engineering*, Faculty of Electrical Engineering, University of Montenegro, Vol. 22, No. 1, pp. 15-23, November 2016. [http://www.jee.ac.me/index.php?id=22\\_2016](http://www.jee.ac.me/index.php?id=22_2016) – M53

**М. Бошковић**, Т.В. Šekara, М.Р. Rapačić, В. Jakovljević, A New Combined Performance Criterion for Optimization of PI Controller, *International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2016)*, pp. AUI2.3. 1-4, Zlatibor, Serbia, June 13-16, 2016. ISBN 978-86-7466-618-0. - ISBN 978-86-7466-618-0. – M33

Т.В. Šekara, **М. Бошковић**, М. Radulović, В. Cvetković, Nova metoda za optimizaciju PIDC regulatora pod ograničenjima na pretek faze i osjetljivost na mjerni šum, XXI međunarodni naučno-stručni skup Informacione tehnologije (IT 2016), pp. 57-60, Žabljak, Crna Gora, 29. februar-05. mart 2016. ISBN 978-86-85775-18-5. – M63

**М. Бошковић**, Т.В. Šekara, P. Mandić, M.P. Lazarević, V. Govedarica, Jedna nova metoda projektovanja PID regulatora primjenom spektra polova i D-razlaganja pod ograničenjima na performanse, XIV međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH-JAHORINA, Vol. 14, pp. 808-812, Jahorina, Bosna i Hercegovina, 18. mart – 20. Mart 2015. ISBN 978-99955-763-6-3, <https://infotech.etf.ues.rs.ba/zbornik/2015/radovi/SUP/SUP-3.pdf> - M63

**М.Ћ. Бошковић**, М.Р. Rapačić, Т.В. Šekara, P.D. Mandić, M.P. Lazarević, Pole placement based design of PIDC controller under constraint on robustness, XV međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH-JAHORINA, Vol. 16, pp. 664-668, Jahorina, Bosna i Hercegovina, 22. Mart - 24. Mart 2017, <https://infotech.etf.ues.rs.ba/zbornik/2017/radovi/SUP/SUP-3.pdf> , ISBN978-99976-710-0-4, - M33

**М.Ћ. Бошковић**, Т.В. Šekara, М.Р. Rapačić, V. Govedarica, Tuning rules of PI/PID controllers with robustness constraint for industrial processes without dead-time, XXII međunarodni naučno-stručni skup Informacione Tehnologije (IT 2017), pp. 90-93, Žabljak, Crna Gora, februar 2017. ISBN 978-86-85775-20-8. – M63

**М.Ћ. Бошковић**, М.Р. Rapačić, Т.В. Šekara, М. Ponjavić, М. Barjaktarović, В. Lutovac, Novel Tuning Rules of PD Controller for Industrial Processes, 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO 2019), Budva, Montenegro, 10-14 June 2019. <https://doi.org/10.1109/MECO.2019.8760157> - M33

## VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

Кандидат Марко Бошковић у закључку своје докторске дисертације под насловом **Савремене методе пројектовања конвенционалних индустријских регулатора под ограничењима на робусност** даје одговоре на постављена истраживачка питања, приказује резултате истраживања и потврђује хипотезе дефинисане у уводном делу докторске дисертације.

У оквиру ове докторске дисертације предложен је већи број оригиналних, како аналитичких, тако и нумеричких савремених метода пројектовања конвенционалних индустријских регулатора. Заједнички именитељ свих описаних метода јесте ефикасно потискивање поремећаја, уз очување робусности система након затварања повратне спреге.

Основно својство новоразвијених нумеричких метода јесте да се успешно могу применити на широку класу линеарних модела процеса, укључујући ту процесе са и без астатизма, процесе са и без временског кашњења, процесе неминималне фазе, па чак и процесе бесконачног реда, као што су процеси са просторно дистрибуираним параметрима. Основни допринос дисертације, у контексту нумеричких метода, лежи у оригинално дефинисаним оптимизационим проблемима чијим се решавањем добијају одговарајуће вредности параметара. Сами поступци оптимизације, који се до тих параметара долази, нису предмет детаљног разматрања. У том смислу, кандидат је успешно користио конвенционалне методе оптимизације (као што је секвенцијално квадратно програмирање) и савремене глобалне методе оптимизације (као што су генетски алгоритам и алгоритам оптимизације ројем честица). Посебно наглашавамо прву предложену нумеричку методу у којој је дефинисан оригинални комбиновани критеријум оптималности са циљем повећања пропусног опсега система и ефикаснијег потискивања поремећаја.

Основно својство новоразвијених аналитичких метода лежи у томе да се њиховом применом добијају готове формуле, односно изрази у затвореном облику, које се могу веома једноставно применити у пракси. Као што је уобичајено, мана ових метода лежи у томе што њихова примена подразумева претходну редукцију реда модела објекта управљања, односно његово свођење на стандардни облик. Примера ради, приказана је аналитичка метода пројектовања заснована на примени методе D-разлагања, којом се утврђују границе области стабилности у простору параметара конвенционалних регулатора. Основно својство других приказаних аналитичких метода лежи у њиховој униформности, односно у чињеници да се свака од њих заснива на погодном избору функције комплементарне осетљивости. У том смислу, може се рећи да је приказаним аналитичким методама успостављен један општи методолошки оквир за аналитичко пројектовање регулатора. Овај оквир је применљив и на сложеније функције преноса објекта управљања, односно чак и без претходне редукције реда система, једино би се његовом непосредном применом развили регулатори који су сложеније структуре у односу на конвенционалне индустријске регулаторе који се разматрају у оквиру тезе. Из тих разлога, описана уопштења и генерализације предложених метода нису разматране.

Оригинална аналитичка методологија пројектовања параметара PID и PIDC регулатора, заснована на задавању адекватне функције комплементарне осетљивости, је примењена и на примеру пројектовања регулатора учестаности, односно баланса размене активне снаге, електроенергетских система. Првенствено су разматрани електроенергетски системи са једном регулационом облашћу, премда су кратко приказане и могућности уопштења на електроенергетске системе са више регулационих области. Према најбољим сазнањима Комисије, ово је прва студија у којој је примењена јединствена методологија пројектовања за три различита типа генератора: са хидротурбином, те са парном турбином са и без поновног загревања паре. Извршена је детаљна анализа утицаја подесивих параметара на успостављање компромиса између ефикасности компензације поремећаја (показатеља перформансе) и отпорности система у затвореној спреси на грешке моделовања и мерни шум (показатеља робусности).

Комисија са задовољством изјављује како је кандидат испунио све задатке које је поставио у пријави дисертације, и тиме остварио оригиналан и значајан допринос у области система управљања.

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

Након пажљиве, детаљне и свеобухватне анализе, Комисија констатује: докторска дисертација Марка Бошковића под насловом **Савремене методе пројектовања конвенционалних индустријских регулатора под ограничењима на робусност** је написана јасно и квалитетно, начин приказа и тумачење резултата истраживања спроведеног у оквиру дисертације су коректни и исцрпни, сам рад представља значајан допринос у односу на постојеће методе пројектовања конвенционалних регулатора. 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.*

## **IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

Комисија за оцену докторске дисертације Марка Бошковића под насловом „Савремене методе пројектовања конвенционалних индустријских регулатора под ограничењима на робусност“, након пажљиве, детаљне и свеобухватне анализе, закључује следеће:

1. Дисертација је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме ове докторске дисертације;
2. Дисертација садржи све битне елементе неопходне за позитивну оцену дисертације;
3. Дисертација представља оригиналан допринос науци;
4. Комисија није уочила битне недостатке дисертације, па тиме ни њихов утицај на резултате истраживања.

**X ПРЕДЛОГ:**

На основу укупне оцене дисертације, комисија предлаже:

да се докторска дисертација кандидата Марка Бошковића под насловом **Савремене методе пројектовања конвенционалних индустријских регулатора под ограничењима на робусност** прихвати, а кандидату одобри јавна одбрана дисертације.

У Новом Саду, 20. јануар 2021. године

**Др Зоран Јеличић**, редовни професор,  
Аутоматика и управљање системима,  
Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду;  
Председник комисије;

**Др Филип Кулић**, редовни професор,  
Аутоматика и управљање системима,  
Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду;  
Члан комисије;

**Др Мирна Капетина**, доцент,  
Аутоматика и управљање системима,  
Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду;  
Члан комисије;

**Др Јован Микуловић**, редовни професор,  
Електроенергетски системи,  
Електротехнички факултет Универзитета у Београду;  
Члан комисије;

**Др Милан Рапаић**, ванредни професор,  
Аутоматика и управљање системима,  
Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду;  
Ментор рада.

**Др Томислав Шекара**, редовни професор,  
Аутоматика,  
Електротехнички факултет Универзитета у Београду;  
Ментор рада.