

**НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ  
ФАКУЛТЕТА ТЕХНИЧКИХ НАУКА У ЧАЧКУ**

Предмет: Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Драгана Ћетеновића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства

Одлуком Већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу број IV-04-772/9 од 10.10.2018. године, на предлог Наставно-научног већа Факултета техничких наука у Чачку (одлука бр. 60-1837/9 од 05.09.2018. године), именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Драгана Ћетеновића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, под насловом:

**„Динамичка естимација стања несиметричних електродистрибутивних мрежа и оптимално подешавање параметара Калмановог филтра“**

На основу увида у приложену докторску дисертацију и Извештаја Комисије за оцену подобности кандидата и научне заснованости теме докторске дисертације, која је одобрена за израду Одлуком Наставно-научног већа Факултета техничких наука у Чачку бр. 44-2593/4 од 27.12.2017. године и одлуке Већа за техничко-технолошке науке бр. IV-04-1205/7 од 11.01.2018. године, на основу Правилника о пријави, изради и одбрани докторске дисертације Универзитета у Крагујевцу, Комисија подноси Наставно-научном већу следећи

**ИЗВЕШТАЈ**

**1. Значај и допринос докторске дисертације са становишта актуелног стања у одређеној научној области**

Докторска дисертација кандидата Драгана Ћетеновића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, под називом „Динамичка естимација стања несиметричних електродистрибутивних мрежа и оптимално подешавање параметара Калмановог филтра“ настала је као резултат кандидатовог самосталног научно-истраживачког рада у области естимације стања савремених електродистрибутивних мрежа. Предмет истраживања докторске дисертације је трофазна динамичка естимација стања у реалним несиметричним електродистрибутивним мрежама са интегрисаним дистрибуираним генераторима.

Естимација стања је једна од кључних функција система управљања у реалном времену, чији се резултати користе у готово свим осталим функцијама за анализу, управљање и планирање погона електроенергетских система (ЕЕС-а). Проблем естимације стања у преносним мрежама је у значајној мери истражен и предложена решења су пронашла успешну примену. Проблем естимације стања у дистрибутивним мрежама знатно је комплекснији него у преносним. Дистрибутивне мреже су слабо мониторисане и

за разлику од преносних неопсервабилне, па захтевају генерисање фиктивних псеудо мерења у циљу постизања опсервабилности система. То уједно доводи до слабијег квалитета естимације стања у поређењу са преносним мрежама. Естиматори у преносним мрежама најчешће естимирају стање на основу мерења напона и активних/реактивних снага, док естиматори у дистрибутивним мрежама стандардно користе и мерења струје.

За разлику од преносне мреже, дистрибутивну мрежу карактерише присуство радијално напајаних кратких, нетранспонованих и несиметрично оптерећених надземних и кабловских водова, високог односа  $R/X$ , који могу бити монофазни, двофазни и трофазни. Због тога, решења развијена за примену у преносним не могу бити успешно примењена у дистрибутивним мрежама. Развој трофазних естиматора стања је неопходан за правилно естимирање стања у дистрибутивним мрежама.

Естимација стања у већини управљачких центара постојећих ЕЕС-а базира се стандардно на статичкој естимацији, чији је задатак да у складу са расположивим пресеком мерења (*Snapshot*) изврши прорачун променљивих стања, којима се описује радни режим система у изабраном тренутку. Све већа потреба за активнијим учешћем у управљању дистрибутивном мрежом захтева коришћење динамичких естиматора стања, који за спровођење естимације осим тренутног пресека мерења користе и податак о томе како је се стање у систему мењало у непосредној прошлости.

Предности и недостаци употребе динамичких естиматора стања у поређењу са статичким естиматорима нису истражени у довољној мери. Тренутно постоји мали број оперативних центара у свету који имају искуства са имплементацијом динамичких естиматора стања, због чега развој и усавршавање алгоритама динамичке естимације представљају изазов. Последњих година врше се интензивна истраживања у овој области, што јасно указује на актуелност истраживања спроведеног у оквиру ове докторске дисертације.

Циљ спроведених истраживања био је развити трофазне алгоритме динамичке естимације намењене естимацији стања несиметричних дистрибутивних мрежа, са намером да се квалитет естимације поправи у односу резултате који се могу добити конвенционалном статичком естимацијом стања. У ту сврху, развијена су два алгорита заснована на примени Калмановог филтра: *Extended Kalman Filter* - *EKF* првог реда и *Unscented Kalman Filter* – *UKF*. Најпре су испитани ефекти које на квалитет динамичке естимације стања имају следећи параметри Калмановог филтра: иницијално естимиран вектор стања  $\mathbf{x}_0^+$ , матрица коваријанси иницијално естимираног вектора стања  $\mathbf{P}_0^+$  и матрица коваријанси грешака динамичког модела  $\mathbf{Q}$ . Након тога, развијене су технике и методе за оптимално подешавање ових параметара.

Утврђено је да се иницијално решење у реалним дистрибутивним мрежама може правилно проценити употребом статичког естиматора стања. Посебан допринос дат је у развоју нових метода за подешавање матрице коваријанси  $\mathbf{Q}$ . Постојеће методе заснивају се на употреби линеарних модела мерења и динамике система, који се ослањају на употребу синхрофазорских мерења (*Phasor Measurement Unit* - *PMU*). Имплементација *PMU* мерења није карактеристична за дистрибутивне мреже на тренутном нивоу њиховог развоја, па је потребно развити методе у складу са актуелном мерном инфраструктуром дистрибутивних мрежа.

Развијене методе за подешавање матрице коваријанси  $\mathbf{Q}$  могу се применити у дистрибутивним мрежама са конвенционалним мерењима напона, струје и

активних/реактивних снага, а могу се успешно применити и уколико су у алгоритмама естимације стања укључена и *PMU* мерења. Предложене методе развијене су са намером да се минимизира грешка динамичког естиматора стања. Показано је да се подешавањем параметара динамичког естиматора квалитет естимације стања у дистрибутивној мрежи може поправити у поређењу са резултатима који се добијају статичким естиматором стања.

Методe за подешавање матрице коваријанси  $Q$  развијене су тако да омогућавају адекватно подешавање у квазистационарном режиму рада и при наглим променама стања у систему. Додатни допринос је да су формиране методе примењиве у практичним апликацијама намењеним за естимацију стања реалних дистрибутивних мрежа.

Верификација предложених метода је извршена на два модификована *IEEE* дистрибутивна тест система и на делу реалне дистрибутивне мреже Електропривреде Србије. Метода за фиксно подешавање верификована је на *EKF* и *UKF* алгоритму динамичке естимације стања. Метода за адаптивно подешавање верификована је на *EKF* алгоритму динамичке естимације стања.

У оквиру истраживања показано је да значај избора иницијалног вектора стања и њему припадајуће матрице коваријанси, неопходних за иницијализацију алгоритма динамичке естимације стања, зависи од тога колико је добро подешена матрица коваријанси грешака динамичког модела.

## **2. Оцена да је урађена докторска дисертација резултат оригиналног научног рада кандидата у одговарајућој научној области**

На основу позитивног Извештаја о провери на плагијаризам докторске дисертације кандидата Драгана Тетеновића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, под називом „Динамичка естимација стања несиметричних електродистрибутивних мрежа и оптимално подешавање параметара Калмановог филтра“ (одлука бр. IV-04-925/1 од 21.11.2018. године) потврђено је да је докторска дисертација резултат оригиналног научног рада кандидата.

Комисија сматра да је тема докторске дисертације изузетно актуелна: са порастом степена интегрисања дистрибуиране производње расту и захтеви за активнијим учешћем у мониторингу и управљању дистрибутивним мрежама, чиме проблем естимације стања у дистрибутивним мрежама последњих година добија све више на значају.

Кандидат је детаљно, уз поштовање научних принципа, прегледао референтну литературу из предметне области, развио алгоритме динамичке естимације стања базиране на примени Калмановог филтра, бавио се њиховим испитивањем и дошао до нових сазнања која омогућавају скоро оптимално подешавање параметара Калмановог филтра. Имајући у виду карактеристике реалних дистрибутивних мрежа, развој нових метода за подешавање параметара Калмановог филтра је неизбежан.

Оригиналност научног рада, истраживања и резултата до којих је кандидат дошао огледају се у:

- Развоју два трофазна алгоритма динамичке естимације стања прилагођена карактеристикама несиметричних електродистрибутивних мрежа;
- Испитивању ефеката које на квалитет динамичке естимације стања имају следећи параметри Калмановог филтра: иницијално естимирани вектор стања  $x_0^+$  и матрица

коваријанси иницијално естимираног вектора стања  $P_0^+$ . Избор иницијалног решења и његови ефекти на квалитет естимације стања у ЕЕС-има нису до сада анализирани у литератури;

- Идеји да се промене у подешавању матрице коваријанси грешака динамичког модела  $Q$  одражавају на грешку естимације стања и на иновације појединих типова телеметрисаних мерења на сличан начин;
- Идеји да се корелисаност грешке естимације и функције циља примењене на иновације телеметрисаних мерења тока снаге/струје искористи за развој метода за подешавање матрице коваријанси  $Q$ ;
- Идеји да се приликом формирања функције циља ова функција дефинише у математички истој форми као и грешка естимације како би се постигла што боља корелисаност грешке естимације и функције циља;
- Идеји да се при подешавању матрице коваријанси  $Q$  у обзир узме тренутни ниво промене стања у систему како би се поправио квалитет естимације у квазистационарном режиму рада и избегла појава велике грешке у естимацији стања при наглим променама;
- Идеји да се као индикатор нивоа промене у тренутку  $k$  користи одступање средње вредности апсолутних нормализованих иновација свих телеметрисаних мерења добијене у тренутку  $k$  од средње вредности која се очекује у квазистационарном режиму рада;
- Развоју метода за подешавање матрице коваријанси  $Q$  које не захтевају симулирање тачног стања у систему.

### 3. Преглед остварених резултата кандидата у одређеној области

Драган Ћетеновић рођен је 13. септембра 1988. године у Ужицу. Основну школу и Гимназију “Венијамин Маринковић” завршио је у Ивањици 2007. године. Основне академске студије уписао је школске 2007/08. године на Техничком факултету (данас Факултет техничких наука) у Чачку, смер Електротехника, модул Електроенергетика, у трајању од четири године, обима 240 ЕСПБ бодова. Основне академске студије завршио је 10. октобра 2011. године, одбравивши дипломски рад под називом “Софтверски пакет EPLAN у пројектовању и анализи нисконапонских електричних инсталација” са оценом 10. Добитник је награде “Александар Аврамовић” за најбољег дипломираног студента генерације на смеру Електроенергетика, са просечном оценом у току студија 9,16.

Дипломске академске (мастер) студије уписао је на истом факултету, смер Електротехничко и рачунарско инжењерство, модул Електроенергетика, у трајању од годину дана, обима 60 ЕСПБ бодова. Мастер академске студије завршио је 28. фебруара 2013. године одбраном мастер рада под називом “Утицај дистрибуираних генератора на рад релејне заштите у средњенапонској дистрибутивној мрежи”, са оценом 10 и просечном оценом у току студија 10,00.

Кандидат је докторске студије уписао школске 2013/14. године на Факултету техничких наука у Чачку, Универзитета у Крагујевцу, смер Електротехничко и рачунарско инжењерство, модул Електроенергетика, где је положио све испите са просечном оценом 10,00 и испунио све обавезе предвиђене планом и програмом докторских студија.

Након завршених основних академских студија ангажован је на Факултету техничких наука као стручни сарадник на Катедри за електроенергетику. У фебруару 2014. године изабран је у звање асистент на истој Катедри. Као асистент на Катедри за електроенергетику, кандидат је ангажован у извођењу вежби из предмета: Дистрибутивне и индустријске мреже, Експлоатација електроенергетских система, Управљање електроенергетским системима, Релејна заштита, Пројекат из дистрибутивних и индустријских мрежа, Методички практикум из електроенергетских мрежа, Менаџмент енергетским ресурсима и Електромагнетна компатибилност. Тренутно обавља функцију секретара Катедре за електроенергетику.

У току досадашњег рада кандидат је ангажован на два пројекта финансирана од стране Министарства за науку и технолошки развој. Објавио је 3 рада у међународним часописима, 1 рад у водећем часопису националног значаја, 1 рад на конференцији међународног значаја и 7 радова на конференцијама националног значаја. Сви објављени радови су из области електроенергетике.

### **Објављени радови**

#### **Радови у часописима међународног значаја:**

- [1] **D. Ćetenović**, A. Ranković, “Optimal parameterization of Kalman filter based three-phase dynamic state estimator for active distribution networks”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 101, pp. 472-481, 2018, ISSN: 0142-0615, DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.04.008, (M21).
- [2] V. Mijailović, **D. Ćetenović**, A. Ranković, P. Petrović, D. Rozgić, “Analysis of Faults in Active Distribution Network with and without Synchronous Generator Using Instantaneous Symmetrical Components in Time Domain”, *Electrical Engineering*, Vol. 100, No. 3, pp. 2117-2127, 2018, ISSN: 0948-7921, DOI: 10.1007/s00202-018-0689-5, (M23).
- [3] A. Ranković, **D. Ćetenović**, “Modeling of Photovoltaic Modules Using a Gray-Box Neural Network Approach”, *Thermal Science*, Vol. 21, No. 6, pp. 2837-2850, 2017, ISSN: 0354-9836, DOI: 10.2298/TSCI160322023R, (M22).

#### **Рад у врхунском часопису националног значаја:**

- [1] A. Ranković, V. Mijailović, D. Rozgić, **D. Ćetenović**, “Optimization of Electric and Magnetic Field Emissions Produced by Independent Parallel Overhead Power Lines”, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 199-216, 2017, ISSN: 1451-4869, DOI: 10.2298/SJEE161115002R, (M51).

#### **Рад саопштен на међународном научном скупу:**

- [1] D. Klimenta, **D. Ćetenović**, B. Perović, J. Klimenta, “Modelling the passive cooling of roof-mounted PV modules by using the modified correlations for heat transfer coefficients due to wind-induced convection”, *Proceedings of 4th International Conference on Renewable Electrical Power Sources - ICREPS 16*, Paper No. 38, pp. 337-344, Belgrade, October 17-18, 2016, ISBN: 978-86-81505-80-9, (M33).

## **Радови саопштени на домаћим научним скуповима:**

- [1] Д. **Ћетеновић**, В. Мијаиловић, А. Ранковић, “Склопни пренапони на прекидачима услед искључења струје квара – случај прикључења индукционог генератора на мрежу”, *XI Саветовање о електродистрибутивним мрежама Србије CIRED*, Реферат R-1.20, стр. 1-10, Копаоник, септембар 2018, ISBN: 978-86-83171-23-1, (M63).
- [2] В. Остраћанин, С. Ђуровић, Д. **Ћетеновић**, “Додатна опрема и мерни уређаји за дијагностику стања металоксидних одводника пренапона средњег и високог напона”, *X Саветовање о електродистрибутивним мрежама Србије CIRED*, Извештај I-1.20, стр. 1-7, Врњачка Бања, септембар 2016, ISBN: 978-86-83171-20-0, (M63).
- [3] Д. **Ћетеновић**, В. Мијаиловић, А. Ранковић, “Предлог мера за смањење техничких губитака у средњенапонској дистрибутивној мрежи 10 kV”, *X Саветовање о електродистрибутивним мрежама Србије CIRED*, Реферат R-5.08, стр. 1-8, Врњачка Бања, септембар 2016, ISBN: 978-86-83171-20-0, (M63).
- [4] Д. **Ћетеновић**, А. Ранковић, “Динамичка естимација стања у дистрибутивним системима са микро мрежама”, *60. Конференција за електронику, телекомуникације, рачунарство, аутоматику и нуклеарну технику ЕТРАН 2016*, Реферат EE1.3, стр. 1-6, Златибор, јун 2016, ISBN: 978-86-7466-618-0, (M63).
- [5] Д. **Ћетеновић**, А. Ранковић, “Прорачун снаге на излазу фотонапонских панела применом вештачких неуралних мрежа”, *59. Конференција за електронику, телекомуникације, рачунарство, аутоматику и нуклеарну технику ЕТРАН 2015*, Реферат EE1.4, стр. 1-6, Сребрно језеро, јун 2015, (Рад проглашен за **најбољи рад младог истраживача** на секцији EE: "Електроенергетика"), ISBN: 978-86-80509-71-6, (M63).
- [6] Д. Миладиновић, Ј. Живанић, Д. **Ћетеновић**, М. Шућуровић, “Мерење ефективног времена рада БТД система погона Тамнава Источно поље, РБ Колубара д.о.о.”, *2. Национална конференција са међународним учешћем РППО13*, 4.10, стр. 376-384, Чачак, септембар 2013, ISBN: 978-86-7776-143-1, (M63).
- [7] Ј. Живанић, Д. **Ћетеновић**, М. Шућуровић, Д. Лазаревић, “Дијагностиковање стања изолације енергетског трансформатора мерењем интензитета парцијалних пражњења”, *57. Конференција за електронику, телекомуникације, рачунарство, аутоматику и нуклеарну технику ЕТРАН 2013*, Реферат EE2.4, стр. 1-5, Златибор, јун 2013, ISBN: 978-86-80509-68-6, (M63).

## **Учешће на пројектима ресорног министарства**

- [1] Истраживач на пројекту ИИИ 42009 “Интелигентне енергетске мреже”, носилац пројекта Електротехнички факултет Београд, руководилац др Жељко Ђуришић, доцент, пројекат у подручју интегралних и интердисциплинарних истраживања, Министарство за науку и технолошки развој Републике Србије.
- [2] Истраживач на пројекту “Развој курикулума предмета Пројектовање помоћу рачунара у електроенергетици у циљу унапређења дигиталних и предузетничких компетенција студената (РаППРЕ)”, носилац пројекта Факултет техничких наука у Чачку, руководилац др Марко Росић, доцент, пројекат у оквиру програмске активности “Развој високог образовања”.

#### 4. Оцена о испуњености обима и квалитета у односу на пријављену тему

Докторска дисертација кандидата Драгана Ћетеновића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, под називом „Динамичка естимација стања несиметричних електродистрибутивних мрежа и оптимално подешавање параметара Калмановог филтра“ одговара по садржају теми прихваћеној од стране Наставно-научног већа Факултета техничких наука у Чачку и Већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу. По квалитету и обиму истраживања у потпуности задовољава све научне, стручне и законске услове за докторску дисертацију.

Докторска дисертација написана је на 121 страни, садржи 32 слике и 7 табела, а цитирано је 87 библиографских наслова.

Рад је организован у 11 поглавља и то:

1. УВОД
2. МОДЕЛОВАЊЕ ДИНАМИКЕ СИСТЕМА
3. МОДЕЛОВАЊЕ МЕРЕЊА
4. АЛГОРИТМИ ЕСТИМАЦИЈЕ СТАЊА
5. НОВА МЕТОДА ЗА ФИКСНО ПОДЕШАВАЊЕ МАТРИЦЕ КОВАРИЈАНСИ  $Q$  У  $EKF$  И  $UKF$  АЛГОРИТМУ ДИНАМИЧКЕ ЕСТИМАЦИЈЕ СТАЊА
6. ВЕРИФИКАЦИЈА НОВЕ МЕТОДЕ ЗА ФИКСНО ПОДЕШАВАЊЕ МАТРИЦЕ КОВАРИЈАНСИ  $Q$  У КВАЗИСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМУ
7. НОВА МЕТОДА ЗА АДАПТИВНО ПОДЕШАВАЊЕ МАТРИЦЕ КОВАРИЈАНСИ  $Q$  У  $EKF$  АЛГОРИТМУ ДИНАМИЧКЕ ЕСТИМАЦИЈЕ СТАЊА
8. ВЕРИФИКАЦИЈА НОВЕ МЕТОДЕ ЗА АДАПТИВНО ПОДЕШАВАЊЕ МАТРИЦЕ КОВАРИЈАНСИ  $Q$  У КВАЗИСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМУ И ПРИ НАГЛИМ ПРОМЕНАМА
9. ЗАКЉУЧАК
10. ДОДАТАК
11. ЛИТЕРАТУРА

У првом поглављу наведени су основни мотиви за рад и организација саме дисертације. Објашњен је значај функције естимације стања у управљању дистрибутивним мрежама, наведене су предности употребе динамичких естиматора стања у односу на конвенционалну статичку естимацију и указано је на потребу за развојем нових метода за подешавање параметара динамичких естиматора заснованих на примени Калмановог филтра.

У другом поглављу дат је преглед најчешће коришћених модела за описивање динамике система и извршено је њихово поређење. Описана је метода линеарног експоненцијалног изравнања за подешавање параметара динамичког модела.

У трећем поглављу описан је математички модел мерења, мерна инфраструктура електродистрибутивних мрежа на тренутном нивоу њиховог развоја и начин моделовања матрице коваријанси грешака мерења  $R$ . Анализирани су временски оквири прикупљања мерења и спровођења естимација стања у реалним системима.

Алгоритми динамичке естимације стања засновани на примени Калмановог филтра приказани су у четвртом поглављу. Описана су два најчешће коришћена Калман-филтар алгоритма намењена естимацији стања у нелинеарним системима: *Extended Kalman Filter - EKF* првог реда и *Unscented Kalman Filter – UKF*. Такође, у кратким цртама описан је *Weighted Least Square – WLS* алгоритам статичке естимације стања, који је коришћен да би се показале предности употребе динамичких естиматора стања у односу на њега.

У петом поглављу, након прегледа постојећих метода и анализе њихових недостатака, представљена је нова *offline* метода за фиксно подешавање матрице коваријанси грешака динамичког модела  $Q$  заснована на комбиновању Калмановог филтра са неком од статистичких метода. У складу са тим, формиране су две функције циља на иновацијама телеметрираних мерења. Прва функција циља дефинисана је у истој форми као грешка естимације, док је друга функција циља дефинисана на основу методе максималне веродостојности. Претпоставке на основу којих је развијена метода су да систем ради у квазистационарном режиму рада и да се корелисаност између функције циља и грешке естимације може поправити уколико се функција циља дефинише на иновацијама одређеног типа телеметрираних мерења.

У шестом поглављу спроведена је анализа осетљивости грешке естимације на промене вредности матрице коваријанси  $Q$  и испитан значај подешавања иницијалних вредности естимираног вектора стања  $x_0^+$  и њему припадајуће матрице коваријанси  $P_0^+$ . Метода за фиксно подешавање матрице коваријанси  $Q$  у квазистационарним условима рада верификована је на оба Калман-филтар алгоритма и на три дистрибутивне мреже: на модификованом *IEEE 13* и *IEEE 37* дистрибутивном тест систему, као и на делу реалне дистрибутивне мреже са 47 чворова.

Нова *online* метода за адаптивно подешавање матрице коваријанси  $Q$  представљена је у поглављу 7. За разлику од методе за фиксно подешавање, адаптивна техника прати ниво промене стања и настоји да вредности матрице коваријанси прилагоди нивоу промене стања у систему, те се стога може применити и у квазистационарном режиму рада и при наглим променама. Урађен је преглед начина за нормализацију иновација и објашњена ограниченост примене адаптивне технике на *UKF* алгоритам динамичке естимације.

Анализа начина нормализације иновација спроведена је у поглављу 8. Извршено је подешавање параметара неопходних за рад предложене адаптивне технике. Адаптивна техника за подешавање матрице коваријанси  $Q$  верификована је у квазистационарном режиму рада и при наглим променама на *EKF* алгоритму динамичке естимације стања.

У деветом поглављу изведени су главни закључци до којих се дошло у овој докторској дисертацији и дате смернице за будућа истраживања.

У десетом поглављу дефинисани су неки основни појмови из области статистике и вероватноће који су у више наврата коришћени у оквиру докторске дисертације. Дати су и параметри дела реалне дистрибутивне мреже за који су рађене анализе, нормализовани дневни хронолошки дијаграми потрошње/производње за поједине типове потрошача/дистрибуираних генератора и подаци о дистрибуираним генераторима.

Преглед коришћене литературе дат је у поглављу 11.



## 5. Научни резултати докторске дисертације

Драган Тетеновић, мастер инжењер електротехнике и рачунарства, у оквиру своје дисертације извршио је систематизацију и анализу досадашњих теоријских и емпиријских знања из области естимације стања и дошао до значајних резултата када је у питању подешавање параметара динамичких естиматора заснованих на примени Калмановог филтра. Научни резултати ове докторске дисертације су:

- Користећи референтну литературу из области динамичке естимације стања ЕЕС-а и програмски језик *Matlab*, развијена су два трофазна алгорита динамичке естимације стања (*EKF* првог реда и *UKF*) тако да омогућавају спровођење естимације стања у несиметричним електродистрибутивним мрежама;
- Испитани су ефекти које на квалитет естимације стања имају следећи параметри Калмановог филтра: матрица коваријанси грешака динамичког модела  $\mathbf{Q}$ , иницијално естимирани вектор стања  $\mathbf{x}_0^+$  и матрица коваријанси иницијално естимираног вектора стања  $\mathbf{P}_0^+$ . Утврђено је да се вектор  $\mathbf{x}_0^+$  и матрица  $\mathbf{P}_0^+$  могу правилно проценити помоћу статичког *WLS* естиматора стања. Правилна процена иницијалног решења није довољна да оправда употребу динамичких естиматора уколико матрица коваријанси  $\mathbf{Q}$  није довољно добро подешена. Адекватним подешавањем матрице  $\mathbf{Q}$  квалитет естимације у дистрибутивним мрежама може се поправити у поређењу са резултатима који се добијају конвенционалном статичком естимацијом стања;
- Експерименталним путем (симулацијама) утврђено је да се промене у подешавању матрице коваријанси  $\mathbf{Q}$  на сличан начин одражавају на грешку естимације стања и на иновације телеметрисаних мерења тока снаге/струје;
- Развијена је нова *offline* метода за фиксно подешавање матрице коваријанси  $\mathbf{Q}$  намењена квазистационарним условима рада дистрибутивне мреже. Ова метода моделује матрицу коваријанси у дијагоналној форми  $\mathbf{Q} = 10^q \cdot \mathbf{I}_n$ , као временски непроменљиву матрицу. Развијена метода се заснива на идентификацији параметра  $q$  као вредности која минимизира одговарајућу функцију циља  $C_{\tilde{m}}$  дефинисану на иновацијама телеметрисаних мерења токова снага/струја;
- За потребе рада методе за фиксно подешавање, формиране су и испитане две функције циља. Прва функција циља дефинисана је у истој форми као грешка естимације, тако да је функција циља  $C_{\tilde{m}}^{ARMS}$  просечна средње-квадратна вредност (*Average Root Mean Square - ARMS*) иновација телеметрисаних мерења токова снага/струја на посматраном интервалу динамичке естимације стања. Друга функција циља  $C_{\tilde{m}}^{ML}$  дефинисана је на основу методе максималне веродостојности (*Maximum Likelihood - ML*). Утврђено је да се употребом прве функције циља постиже скоро оптимална тачност филтра;
- Сасвим задовољавајући резултати у погледу идентификације параметра  $q$  могу се постићи уколико мерење тока снаге/струје постоји само у напојној трансформаторској станици, што указује на робусност предложене методе;

- С обзиром да је установљено да метода за фиксно подешавање даје добре резултате само у квазистационарном режиму рада, развијена је нова *online* метода за адаптивно подешавање матрице коваријанси  $Q$  која је примењива на *EKF* алгоритму и у квазистационарном режиму и при наглим променама стања у дистрибутивној мрежи. Ова метода такође моделује матрицу коваријанси у дијагоналној форми, али као временски променљиву матрицу  $Q_k = 10^{q_k} \cdot I_n$ . Метода за адаптивно подешавање матрице коваријанси  $Q$  прилагођава вредности матрице нивоу промене стања у систему. На тај начин се избегавају огромне грешке у естимацији стања до којих би дошло при наглим променама када би вредност параметра  $q$  остала непромењена;
- Обе методе за подешавање матрице коваријанси  $Q$  у свом раду користе податке који су доступни у реалним дистрибутивним мрежама, тј. мерења токова снага/струја у гранама и њихових предвиђених вредности. На тај начин је елиминисана потреба за симулирањем тачног стања у систему.

## 6. Примењивост резултата у теорији и пракси

Докторска дисертација кандидата Драгана Ћетеновића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, под називом „Динамичка естимација стања несиметричних електродистрибутивних мрежа и оптимално подешавање параметара Калмановог филтра“, даје веома значајне резултате, који представљају нова сазнања у области естимације стања електродистрибутивних мрежа.

Показано је да се применом динамичких *EKF* и *UKF* естиматора стања може поправити квалитет естимације у односу на квалитет који се постиже применом статичког *WLS* естиматора, али само уколико је матрица коваријанси  $Q$  адекватно подешена.

Рад предложених метода за подешавање матрице коваријанси  $Q$  верификован је најпре на два дистрибутивна тест система: *IEEE 13* и *IEEE 37*, која су модификована како би се метода тестирала и у условима прикључене дистрибуиране производње на дистрибутивну мрежу. Након тога, методе су верификоване и на делу реалне дистрибутивне мреже Електропривреде Србија са 47 чворова.

Показано је да методе за подешавање матрице коваријанси  $Q$  успешно раде и када се подешавање врши на основу иновација мерења тока снаге и на основу иновација мерења тока струје. При томе, повећавање броја мерења тока снаге/струје у систему поправља корелисаност између грешке естимације и функције циља  $C_m^{ARMS}$  примењене на ова мерења, што доводи до прецизније идентификације параметра  $q$ . Међутим, сасвим задовољавајући резултати у погледу идентификације параметра  $q$  могу се постићи уколико мерење тока снаге постоји само у напојној трансформаторској станици, што указује на робусност предложених метода.

Предложене методе могу се применити на све дистрибутивне мреже, с обзиром да су мерења тока снаге/струје у гранама увек доступна, барем у напојној трансформаторској станици.

Тачност алгоритма естимације обично се проверава симулирањем тачног стања у систему. У реалним дистрибутивним мрежама познавање тачног стања у систему није оствариво, због чега овакве врсте провере нису практично изводљиве, изузев кроз

симулације. На основу потврђене високе корелисаности између грешке естимације и функције циља  $C_m^{ARMS}$  примењене на иновације телеметрираних мерења токова снага/струја, матрица коваријанси  $Q$  може се скоро оптимално подесити коришћењем података доступних у реалним системима, без потребе за симулирањем тачног стања у систему, што поменуто методе чини подобним за практичну примену.

## 7. Начин презентовања резултата научној јавности

Као непосредни резултат рада на овој докторској дисертацији кандидат је публикувао један рад у међународном часопису категорије M21. Рад је до сада цитиран 1 пут од стране других аутора у водећим међународним часописима.

## ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ КОМИСИЈЕ

Докторска дисертација кандидата **Драгана Ћетеновића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства**, под називом „**Динамичка естимација стања несиметричних електродистрибутивних мрежа и оптимално подешавање параметара Калмановог филтра**“, одговара прихваћеној теми од стране Наставно-научног већа Факултета техничких наука у Чачку, односно Већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу.

Кандидат је у приказу свог рада користио одговарајућу и стандардизовану стручну терминологију, а структура докторске дисертације и методологија излагања су у складу са универзитетским нормама.

У оквиру докторске дисертације кандидат је кроз свеобухватан теоријско-истраживачки рад дошао до низа оригиналних научних резултата када је у питању естимација стања у електродистрибутивним мрежама. Део ових резултата публикован је у врхунском међународном часопису категорије M21.

Докторска дисертација по квалитету, обиму и приказаним резултатима истраживања у потпуности задовољава законске услове и универзитетске норме прописане за израду докторске дисертације.

Кандидат је показао да влада методологијом научно-истраживачког рада и поседује способност системског приступа и коришћења литературе. При томе је, користећи своје професионално образовање, показао способност да сложеној проблематици приступи свеобухватно, у циљу добијања конкретних и примењивих резултата.

С обзиром на актуелност проблематике која је обрађена и остварене резултате, чланови Комисије сматрају да кандидат **Драган Ћетеновић, мастер инжењер електротехнике и рачунарства**, и поднета докторска дисертација, испуњавају све услове, који се у поступку оцене писаног дела докторске дисертације захтевају Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Крагујевцу и Статутом Факултета техничких наука у Чачку.



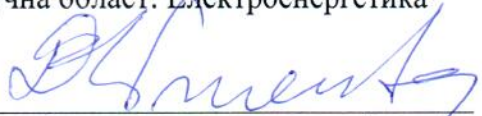
На основу претходно наведеног, Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Драгана Ћетеновића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства**, предлаже Наставно-научном већу Факултета техничких наука у Чачку и Стручном већу за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу да докторску дисертацију кандидата под називом:

**„Динамичка естимација стања несиметричних електродистрибутивних мрежа и оптимално подешавање параметара Калмановог филтра“**

прихвате као успешно урађену и да кандидата позову на усмену јавну одбрану докторске дисертације.

У Чачку, Новом Саду и Косовској Митровици, октобра 2018. године.

**ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ**

1.   
др Владица Мијаиловић, редовни професор, председник  
Универзитет у Крагујевцу – Факултет техничких наука у Чачку  
Ужа научна област: Електроенергетика
2.   
др Андрија Сарић, редовни професор, члан  
Универзитет у Новом Саду – Факултет техничких наука у Новом Саду  
Ужа научна област: Електроенергетика
3.   
др Дардан Климента, редовни професор, члан  
Универзитет у Приштини – Факултет техничких наука у Косовској Митровици  
Ужа научна област: Електроенергетика



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ  
 Број IV-04-925/1  
 Датум 21. NOV. 2018  
 КРАГУЈЕВАЦ

## ИЗВЕШТАЈ О ПРОВЕРИ НА ПЛАГИЈАРИЗАМ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

НАЗИВ ДИСЕРТАЦИЈЕ	ДИНАМИЧКА ЕСТИМАЦИЈА СТАЊА НЕСИМЕТРИЧНИХ ЕЛЕКТРОДИСТРИБУТИВНИХ МРЕЖА И ОПТИМАЛНО ПОДЕШАВАЊЕ ПАРАМЕТАРА КАЛМАНОВОГ ФИЛТРА
Кандидат	Драган Ћетеновић
Ментор	др Александар Ранковић, ванредни професор
Датум приспећа дисертације на проверу	19.11.2018.

## РЕЗУЛТАТ ПРОВЕРЕ:

<input checked="" type="checkbox"/>	УПУЋУЈЕ СЕ У ДАЉУ ПРОЦЕДУРУ
<input type="checkbox"/>	ВРАЋА СЕ НА ДОРАДУ

## ОБРАЗЛОЖЕЊЕ:

Докторска дисертација колеге Драгана Ћетеновића, под називом „Динамичка естимација стања несиметричних електродистрибутивних мрежа и оптимално подешавање параметара калмановог филтра“, према софтверу за детекцију плагијаризма iThenticate, пронађено је укупно 7% идентичног текста.

Детаљним прегледом докторске дисертације уочено је да су пронађена преклапања текста настала услед коришћења широко усвојених ознака у области којој припада докторска дисертација, укључујући и преклапања насталих приликом навођења литературе. Сва појединачна преклапања су мања од 1%.

## ПРИЛОЗИ:

iThenticate\_izvestaj\_doktorska\_disertacija\_Dragan\_Cetenovic.pdf

Датум формирања извештаја	20.11.2018.
Име и презиме, функција	Доц. др Марко Ђапан, члан Комисије за претходна питања за област техничко технолошких наука Универзитета у Крагујевцу
Потпис	

ИЗВЕШТАЈ ЈЕ ИЗРАЂЕН У ДВА ПРИМЕРКА.