

## 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)

<b>I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ</b>
<p>1. Датум и орган који је именовео комисију</p> <p style="padding-left: 40px;">. Наставно научно веће Факултета техничких наука</p> <p>2. Састав комисије са назнаком 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>Др Мирослав Поповић, редовни професор, Рачунарска техника и рачунарске комуникације, 17. 7. 2002, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду;</p> <p>Др Жарко Јанда, виши научни сарадник, Енергетска електроника, машине и погони, 25. 1. 2017, Електротехнички институт "Никола Тесла", Универзитет у Београду;</p> <p>Др Ђура Орос, ванредни професор, Енергетска електроника, машине и погони, 19.2.2014., Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду;</p> <p>Др Небојша Пјевалица, ванредни професор, Рачунарска техника и рачунарске комуникације, 1. 10. 2017, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду;</p> <p>Др Никола Теслић, редовни професор, Рачунарска техника и рачунарске комуникације, 14. 4. 2011, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду.</p>
<b>II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ</b>
<p>1. Име, име једног родитеља, презиме:</p> <p style="padding-left: 40px;">Ненад, Славиша, Петровић</p> <p>2. Датум рођења, општина, држава:</p> <p style="padding-left: 40px;">12. 5. 1961., Љиг, СФР Југославија</p> <p>3. Назив факултета, назив студијског програма дипломских академских студија – мастер и стечени стручни назив</p> <p style="padding-left: 40px;">Електротехнички факултет у Београду, одсек енергетски, смер електропривреда, дипломирани инжењер електротехнике</p> <p>4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија</p> <p style="padding-left: 40px;">, Рачунарство и аутоматика, Рачунарска техника и рачунарске комуникације</p>

<p>5. Назив факултета, назив магистарске тезе, научна област и датум одбране: Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду; "Аналитичка метода мерења губитака у гвожђу монофазног трансформатора"; област: Електротехника и рачунарство; одсек: Енергетика, електроника и телекомуникације; смер: Мерна техника; 23.06.2011.</p>
<p>6. Научна област из које је стечено академско звање магистра наука: Електротехника и рачунарство.</p>
<p><b>III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:</b> Рачунарска имплементација система за рад у реалном времену за детекцију и мерење нивоа асиметрије побуде нисконапонског трансформатора</p>
<p><b>IV ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ</b> Навести кратак садржај са назнаком броја страна, поглавља, слика, шема, графика и сл.</p>
<p>Докторска дисертација је написана на 111 страна и састоји се од шест поглавља и пописа литературе. Дисертација садржи 48 слика, 39 табела, 129 математичких израза и 50 цитата.</p> <p>У уводном поглављу представљен је проблем детекције једносмерне компоненте напона реда величине милivolта присутне у нисконапонским дистрибутивним мрежама, који се може ефикасно решити применом одговарајућег система за детекцију и мерење нивоа асиметрије побуде нисконапонског трансформатора. Дат је кратак преглед узрока који доводе до настанка ове једносмерне компоненте напона, као и њених негативних ефеката на дистрибутивне трансформаторе. Осим наведеног, у уводном поглављу је дат преглед осталих поглавља дисертације.</p> <p>Друго поглавље, под називом „Преглед постојећих метода за детекцију и мерење нивоа асиметрије побуде нисконапонског трансформатора“, пружа увид у две постојеће актуелне научне методе које проблем детекције милivolтне компоненте напона напајања торусног трансформатора третирају детекцијом нивоа асиметрије побудне струје тог трансформатора. Прва метода се реализује у временском домену и носи назив „метода вршине детекције“, док се друга метода реализује у фреквенцијском домену и носи назив „метода парних хармоника“. Уводе се потребне декомпозиције побудне струје трансформатора, на основу којих се омогућава упоредна аналитичка и експериментална анализа тачности коју методе постижу у еквивалентним експерименталним условима. Резултат поменуте анализе даје непосредан аналитички увид у разлоге због којих друга метода постиже бољу тачност у односу на прву.</p> <p>Треће поглавље носи назив „Предлог унапређења детекције и мерења нивоа асиметрије побуде нисконапонског трансформатора“. У одељку 3.1 анализирана је пропагација систематске грешке методе парних хармоника у зависности од флукуације напона напајања и усвојеног броја парних хармоника којима се дефинише ниво асиметрије побуде торусног трансформатора. Као оптималана варијанта по критеријуму најбоље постигнуте прецизности, на основу експерименталне анализе, показало се решење које ниво асиметрије дефинише као збир прва четири парна хармоника. Истовремено, показало се да је ова варијанта најповољнија и са аспекта интерполације. На тај начин је разрешено и питање комплексности рачунарског система за имплементацију, будући да је његов основни задатак сведен на демодулацију основног и прва четири хармоника побудне струје торусног трансформатора. У одељку 3.2, као кључни допринос дисертације, представљен је интерполациони поступак калибрације торусног трансформатора. Резултат овог поступка је интерполациони полином чијом се применом систематска грешка услед флукуације напона напајања смањује за ред величине у односу на досадашњи начин представљен у методи парних хармоника. Експерименталном валидацијом спроведеном у одељку 3.3, показало се да се применом интерполационог поступка калибрације, систематска грешка услед флукуације ефективних вредности напона напајања <math>U_n \pm 15\%</math> своди у границе <math>\pm 4\%</math>, док се код методе парних хармоника ова систематска грешка за исту флукуацију напона напајања кретала у опсегу <math>\pm 50\%</math>.</p> <p>У четвртном поглављу, под називом „Реализација и функционално испитивање прототипа система за рад у реалном времену“, представљена је рачунарска имплементација прототипа за рад у реалном времену. Одељак 4.1 даје детаље аналогног кола за за кондиционирање побудне струје торусног трансформатора у напон прилагођен АД конвертору, док је у одељку 4.2 представљено</p>

синхронизационо аналогно коло за генерисање правоугаоне бинарне поворке сигнала који су у фази са напонам напајања трансформатора. На основу разматрања избора платформе за имплементацију рачунарског мерно аквизиционог система за рад у реалном времену спроведеног у одељку 4.3 и анализа захтева у погледу реалног времена за аквизицију и обраду мерних података дате у одељку 4.4, развијене су две варијанте рачунарског система за рад у реалном времену. Као прва варијанта, у одељцима 4.5 и 4.6, представљен је микропроцесорски систем који обавља аквизицију и обраду мерних података у реалном времену. Друга варијанта система, представљена у одељцима 4.7 и 4.8, базирана је на RTL (Register Transfer Level) имплементацији, састављеној од наменских блокова који обављају аквизицију и обраду мерних података. Урађена је егзактна компарација обе варијанте по критеријумима утрошка ресурса и брзине обраде, односно времена потребног за извршење обраде мерних података, на основу које је за коначну реализацију прототипа система за рад у реалном времену одабрана друга варијанта.

У петом поглављу, под називом „Нумерички резултати“, испитана је прецизност мерног уређаја за детекцију нивоа асиметрије побуде торусног трансформатора за седам ефективних вредности напона напајања у опсегу  $U_n \pm 15\%$ . Нивои асиметрије побудне струје трансформатора генерисани су упоредно директним мерењем применом прототипа кола за демодулацију хармоника и ДФТ анализом таласних облика побудне струје снимљених осцилоскопом. Упоредним прегледом резултата свих седам серија података утврђено је да се одступања вредности нивоа асиметрије добијених са прототипа уређаја крећу у границама од  $\pm 0.5\%$  у односу на вредности добијене софтверском ДФТ анализом. Стога, на основу спроведене нумеричке верификације прототипа уређаја, произилази да његова прецизност у потпуности обезбеђује реализацију интерполационог поступка калибрације представљеног у трећем поглављу.

Поглавље број шест је закључно поглавље и носи назив „Закључак“. У том поглављу дат је концизан осврт на суштински допринос истраживаког рада представљеног у дисертацији. Такође, дата је ретроспектива добијених резултата по поглављима и представљени су правци будућег истраживања.

Списак литературе садржи 50 референци, на српском и енглеском језику.

## V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Проблем који се представља у уводном поглављу је актуелан, поготову што је планирање и изградња дистрибуираних извора електричне енергије који ће бити прикључени на нисконапонске дистрибутивне мреже, а који су значајан извор једносмерне компоненте напона, детерминисано законском регулативом проистеклом из контекста који превазилази националне оквире и која има обавезујући карактер. Са друге стране, током експерименталног дела истраживања, уочено је присуство милivolтне компоненте једносмерног напона и код савремених полупроводничких калибрациони уређаја и система високе класе тачности, какви су национални еталони периодичног напона. Проблем који хипотеза дисертације третира је јасно постављен.

Преглед постојећих метода за детекцију и мерење нивоа асиметрије побуде нисконапонског трансформатора, на основу којих се детектују милivolтне компоненте једносмерног напона суперпониране наизменичном напону дистрибутивне мреже, јасно представља постојећа актуелна решења – методу вршне детекције која се реализује у временском домену и методу парних хармоника која се реализује у фреквенцијском домену. Такође, егзактно је изведен и експлицитно постављен математички поступак којим се дефиниција нивоа асиметрије методе вршне детекције преводи из временског у фреквенцијски домен, чиме је омогућена упоредна компарација утицаја дефиниција нивоа асиметрије обе методе на тачност детекције под еквивалентним експерименталним условима. Овим је утврђена чињеница да се дефиниције нивоа асиметрије обе анализиране методе заснивају на истом физичком феномену и да се нивои асиметрије према тим дефиницијама разликују за аналитички предвидив износ. На тај начин је аналитички детерминисан и експериментално потврђен узрок значајне систематске грешке методе вршне детекције у односу на методу парних хармоника.

У предлогу унапређења детекције и мерења нивоа асиметрије побуде нисконапонског трансформатора, представљен је математички поступак интерполационе калибрације мерења нивоа асиметрије торусног трансформатора којим се систематска грешка формално може редуковати на жељени опсег вредности. Показано је да је у практичној примени опсег вредности редуковане систематске грешке условљен прецизношћу лабораторијског извора и резолуцијом примењеног система за мерење нивоа асиметрије, будући да је последњом детерминисан максимални број калибрационих тачака. Применом лабораторијског извора простопериодичног напона Fluke 6100A и развијеног прототипа рачунарског система за мерење нивоа асиметрије, детерминисан је максимални број од 13 калибрационих тачака. Са овим бројем калибрационих тачака постигнута је редукација максималне вредности систематске грешке са вредности сса 50% код примене методе парних хармоника, на вредност 4% код примене предложеног калибрационог поступка за интервал флукуације напона напајања  $U_n \pm 15\%$ . Додатном анализом, број калибрационих тачака сведен је на 8, без повећења вредности систематске грешке.

Реализација и функционално испитивање прототипа система за рад у реалном времену даје прецизан увид свих релевантних аспеката приликом пројектовања и имплементације прототипа система за детекцију и мерење нивоа асиметрије торусног трансформатора у реалном времену уз коректно изведену нумеричку валидацију система представљену нумеричким резултатима.

Закључак на јасан начин излаже суштински допринос који предложено решење отворује, пружа ретроспективу експерименталних резултата по поглављима и даје предлог будућих праваца истраживања.

Укупно посматрано, дисертација је систематича, јасна и садржајна. Предложено решење је јединствено и као такво чини вредан допринос науци. Добро је теоријски подржано, експериментално потврђено и математички уобличено.

**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 часопису са ISI листе односно са листе министарства надлежног за науку када су у питању друштвено-хуманистичке науке или радове који могу заменити овај услов до 01. јануара 2012. године. У случају радова прихваћених за објављивање, таксативно навести називе радова, где и када ће бити објављени и приложити потврду о томе.

Petrović Nenad, Pjevalica Nebojša, Pjevalica Velibor, Teslić Nikola; "Linearization Approach for Symmetric Hysteresis Loop Modeling and Core Loss Prediction"; *Elektronika ir Elektrotehnika*; (2017) Vol: 23, Br: 4, Str: 9-17, doi: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eie.23.4.18716>, ISSN: 2029-5731;

Pjevalica Nebojša, Petrović Nenad, Pjevalica Velibor, Teslić Nikola; "Experimental Detection of Transformer Excitation Assymetri through the Analysis of the Magnetizing Current Harmonic Content "; *Elektronika ir Elektrotehnika*; (2016) Vol: 22, Br: 2, Str: 43-48, doi: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eie.22.2.14590>, ISSN: 2029-5731;

Pjevalica Velibor, Pjevalica Nebojša, Petrović Nenad, Teslić Nikola; "A Novel Simulation Approach for Measuring of DC Voltage Offset Influence on Magnetizing Current Even Harmonics in the Power Transformer by Using Dither"; 24th IEEE Telecommunications Forum (TELFOR), Belgrade, Serbia, November 22-23, 2016, Str: 1-4, doi: 10.1109/TELFOR.2016.7818838;

Pjevalica Nebojša, Petrović Nenad, Nikolić Miloš; "Detection of the External Magnetic Field Polarity through the Inductance Voltage Harmonic Phase Order"; 23th IEEE Telecommunications Forum (TELFOR), Belgrade, Serbia, November 24-26, 2015, Str: 599-602, doi: 10.1109/TELFOR.2015.7377539;

Petrović Nenad, Pjevalica Velibor, Pjevalica Nebojša, Teslić Nikola; "Analysis of Symmetric Hysteresis Loop Curves Using the Chebyshev nodes of the First Kind"; 18th International Symposium on Power Electronics – Ee 2015, Novi Sad, Serbia, October 28-30, 2015, Paper No. DS1-T4-1 Str:1-5;

Petrović Nenad, Pjevalica Velibor, Pjevalica Nebojša, Teslić Nikola; "Comparative Analysis of Error Distribution for Symmetric Hysteresis Loop Curves Approximation by Means of Cosine and Trigonometric Polynomial"; 2nd International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN), 8-11 Jun 2015, Srebno jezero, Srbija; Vol: MLI1.6.1-6, ISBN: 978-86-80509-71-6, Društvo za ETRAN;

Petrović Nenad, Pjevalica Velibor, Vujičić Vladimir; "The Theorem About the Transformer Excitation Current Waveform Mapping into the Dynamic Hysteresis Loop Branch for the Sinusoidal Magnetic Flux Case "; *Serbian Journal of Electrical Engineering*; (2015) Vol: 12, Br: 1, Str: 33-52, doi: 10.2298/SJEE1501033P;

## **VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА**

Детаљна анализа актуелних метода за детекцију и мерење нивоа асиметрије побуде торусног трансформатора прикљученог на нисконапонску дистрибутивну мрежу указала је да постојеће методе нису понудиле експлицитно решење за проблем систематске грешке која се јавља приликом детекције нивоа асиметрије услед флукуације напона нисконапонске дистрибутивне мреже. Вредности уочене систематске грешке постојећих метода монотono расту са одступањем ефективне вредности напона мреже од номиналне вредности  $U_n$ . У циљу превазилажења овог проблема, током истраживања је развијен и експериментално верификован интерполациони поступак калибрације мерења нивоа асиметрије торусног трансформатора, чијом се применом уочена систематска грешка успешно потискује у контролисане границе. За имплементацију предложеног интерполационог поступка развијен је рачунарски систем, који у спреси са испитаним сензорским елементом и потребним прилагодним колима, реализује систем за аквизицију и мерење нивоа асиметрије у реалном времену.

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

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

Једну од одлика представљеног истраживања чини темељна и систематична провера предложених решења извођењем експеримената. Скоро кроз сва поглавља се изведени закључци испитују извођењем експеримената, што је јасно евидентирано у табелама, којих у раду има 39. Резултати експеримената су представљени јасно и систематично, користећи табеле и дијаграме, чиме се остварује боља визуализација добијених резултата. Тумачење добијених резултата је урађено детаљно и разложно, уз напомену да су поједини делови предложених решења и резултата током истраживања публиковани са два рада у часопису категорије М23, једним радом у часопису категорије М24 и четири конференцијска рада у категорији М33. Дисертација је проверена у софтверу за детекцију плагијаризма (iThenticate). Извештај о подударности је показао да је индекс сличности 3%. Комисија позитивно оцењује начин приказа и тумачења резултата истраживања.

**IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

Експлицитно навести да ли дисертација јесте или није написана у складу са наведеним образложењем, као и да ли она садржи или не садржи све битне елементе. Дати јасне, прецизне и концизне одговоре на 3. и 4. питање:

1.	Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме Да.
2.	Да ли дисертација садржи све битне елементе Да.
3.	<p>По чему је дисертација оригиналан допринос науци</p> <p>Први допринос представља поступак декомпозиције побудне струје торусног трансформатора на четири компоненте: симетричну хистерезисну и асиметричну хистерезисну које су у фази са напоном напајања, односно на симетричну нехистерезисну и асиметричну нехистерезисну које фазно касне за четвртину периоде у односу на напон напајања. Досадашње декомпозиције, представљене у литератури, односиле су се искључиво на побудну струју трансформатора без асиметрије и реализоване су на читавој периоди побудне струје. У ситуацији када је побудна струја трансформатора асиметрична, овакав приступ није био довољан, те су стога након прве декомпозиције на читавој периоди, уведене додатне декомпозиције на свакој половини периоде побудне струје. Ове декомпозиције омогућавају превођење мере нивоа асиметрије добијене помоћу методе вршне детекције из временског у фреквенцијски домен. У фреквенцијском домену је ниво асиметрије мерен помоћу методе вршне детекције експлицитно изражен збиром косинусних компонената свих парних хармоника побудне струје трансформатора, тако да се његов утицај на тачност детекције може директно поредити са утицајем на тачност детекције нивоа асиметрије мереног методом парних хармоника, који је оригинално дефинисан збиром прва четири парна хармоника побудне струје трансформатора. Други допринос представља интерполациони поступак калибрације мерења нивоа асиметрије торусног трансформатора над скупом вредности напона напајања које се подударају са Чебишевљевићим чворовима друге врсте. Овакав избор калибрационих тачака формално обезбеђује потискивање систематске грешке у жељене границе. Трећи допринос представља практична имплементација интерполационог поступка на развијеном рачунарском систему за мерење нивоа асиметрије у реалном времену, будући да резолуција примењеног мерног система детерминише максимални број Чебишевљевићевих чворова на основу кога се постиже потискивање систематске грешке у фактичке границе реалног мерног система.</p>
4.	<p>Недостаци дисертације и њихов утицај на резултат истраживања</p> <p>У дисертацији нису уочени битни недостаци који би утицали на резултат истраживања.</p>

<b>X ПРЕДЛОГ:</b>
На основу укупне оцене дисертације, комисија предлаже:
- да се извештај о оцени докторске дисертације кандидата Петровић Ненада под називом „Рачунарска имплементација система за рад у реалном времену за детекцију и мерење нивоа асиметрије побуде нисконапонског трансформатора“ прихвати, а кандидату одобри одбрана тезе.

НАВЕСТИ ИМЕ И ЗВАЊЕ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ  
ПОТПИСИ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ

1. Председник:

---

др Мирослав Поповић  
редовни професор

2. Члан:

---

др Жарко Јанда  
виши научни сарадник

3. Члан:

---

др Ђура Орос  
ванредни професор

4. Члан:

---

др Небојша Пјевалица  
ванредни професор

5. Ментор:

---

др Никола Теслић  
редовни професор

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.