

ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА  
10.07.2015

012	1390		
-----	------	--	--

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

**Предмет:** Извештај Комисије за оцену писаног дела и усмену одбрану докторске дисертације мр Бранка Копривице, дипл. инж. ел.

Одлуком Наставно-научног већа Факултета техничких наука у Чачку, бр. 45-768/8 од 13.05.2015. године именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр Бранка Копривице, дипл. инж. ел., под насловом:

**„МОДЕЛОВАЊЕ ГЛАВНЕ ХИСТЕРЕЗИСНЕ ПЕТЉЕ И ПРЕЛАЗНИХ  
ПРОЦЕСА МАГНЕЋЕЊА ФЕРОМАГНЕТСКИХ ЛИМОВА“**

На основу увида у приложену докторску дисертацију и Извештаја о подобности кандидата и теме за докторску дисертацију, која је одобрена за израду Одлуком Факултета техничких наука у Чачку бр. 33-2049/4 од 10.09.2014. 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 мр Бранка Копривице, дипл. инж. ел., под насловом „МОДЕЛОВАЊЕ ГЛАВНЕ ХИСТЕРЕЗИСНЕ ПЕТЉЕ И ПРЕЛАЗНИХ ПРОЦЕСА МАГНЕЋЕЊА ФЕРОМАГНЕТСКИХ ЛИМОВА“ представља резултат научно-истраживачког рада кандидата у области теоријске електротехнике, прецизније електромагнетизма и мерења магнетских величина.

Актуелна истраживања у тој области односе се на мерење магнетских карактеристика феромагнетских лимова (магнетског хистерезиса, основне криве магнећења, прелазних процеса магнећења, специфичних губитака и друго), као и на моделовање ових карактеристика материјала. Посебна пажња се посвећује истраживању једноставнијих модела који би били применљиви у инжењерској пракси.

У овој докторској дисертацији предложен је један такав, релативно једноставан математички модел главне хистерезисне петље и прелазних процеса магнећења, допуњен поступком за конструисање мањих хистерезисних петљи и симулацију сложених процеса магнећења, што представља значајан и најважнији допринос докторске дисертације. Примена предложеног модела хистерезисне петље на примеру струјног мерног трансформатора, при пројектовању његових карактеристика, додатни је допринос дисертације.

Такође, допринос представља и реализација мерно-аквизиционог система, базираног на персоналном рачунару, који је коришћен за мерење свих величина од интереса потребних за одређивање карактеристика феромагнетских лимова, као што су главна хистерезисна петља, крива магнећења, специфични губици и друго.

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

Узимајући у обзир актуелно стање у истраживању у области теоријске електротехнике, конкретно у моделовању и мерењу магнетског хистерезиса, Комисија констатује да је докторска дисертација кандидата мр Бранка Копривице резултат оригиналног научног рада и да садржи оригиналне научне резултате који нису предмет до сада објављених истраживања (радова) у овој области.

Предложени модел хистерезиса карактерише једноставан математички облик, који не подразумева употребу диференцијалног и интегралног рачуна, мали број параметара (укупно четири, који се могу једноставно одредити на основу резултата мерења) и задовољавајућа тачност. На основу таквог модела главне хистерезисне петље и криве магнећења врши се моделовање реверзних кривих првог реда, конструисање мањих петљи и симулација сложених процеса магнећења. Додатно, предложени математички модел хистерезиса је коришћен при прорачуну струјне и фазне грешке струјног мерног трансформатора са торусним језгром од феромагнетског лима, за који је предложен једноставан итеративни поступак.

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

Кандидат мр Бранко Копривица, дипл. инж. ел., је објавио више радова из области теоријске електротехнике, како у међународним и националним часописима, тако и у зборницима са међународних и националних скупова - укупно 31 рад, од којих је 5 радова објављено у часописима са SCI листе. Коаутор је и једног универзитетског уџбеника из области електричних мерења.

Резултати докторске дисертације су приказани у 12 радова. Три рада су објављена у часописима, од којих су два у часописима међународног значаја (категирија М23 и М24), а један рад је објављен у водећем часопису националног значаја. Седам радова је саопштено на међународним научним скуповима (четири су штампана у целини, а три у изводу) и два рада су саопштена на националним научним скуповима, од којих је један награђен. Списак ових радова дат је у наставку.

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

- [1] Alenka Milovanovic, Branko Koprivica, "Mathematical model of major hysteresis loop and transient magnetizations", *Electromagnetics*, Vol. 35, No. 3, 2015, pp. 155-166, DOI:10.1080/02726343.2015.1005202, ISSN 0272-6343. [M23]
- [2] Branko Koprivica, Alenka Milovanovic, Milic Djekic, "Effects of wound toroidal core dimensional and geometrical parameters on measured magnetic properties of electrical steel", *Serbian Journal of Electrical Engineering*, Vol. 10, No. 3, 2013, pp. 459-471, DOI:10.2298/SJEE130928016K, ISSN 1451-4869. [M24]

### **Радови у националним часописима**

- [1] Branko Koprivica, Alenka Milovanovic, Milic Djekic, "Determination of characteristics of ferromagnetic material using modern data acquisition system", *Serbian Journal of Electrical Engineering*, Vol. 6, No. 3, 2009, pp. 451-459, DOI:10.2298/SJEE0903451K, ISSN 1451-4869. [M51]

### **Радови саопштени на међународним скуповима штампани у целини**

- [1] Branko Koprivica, Alenka Milovanovic, "Influences of toroidal core dimensions on measured properties of magnetic material", 57<sup>th</sup> International Scientific Colloquium IWK2012, Ilmenau University of Technology, Ilmenau, Germany, 04-07 Sept. 2012, pp. 47-53. [M33]
- [2] Branko Koprivica, Alenka Milovanovic, Milan Plazinic, "Standard methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet", XI International Conference on Systems, Automatic Control and Measurements, SAUM 2012, Nis, Serbia, 14-16 Nov. 2012, pp. 298-301. [M33]
- [3] Branko Koprivica, Alenka Milovanovic, "Analysis of strip width effect on measured magnetic properties of wound toroidal core", International Scientific Conference – UNITECH'12, Gabrovo, Bulgaria, 16-17. Nov. 2012, Vol.1, pp. 64-68. [M33]
- [4] Branko Koprivica, Alenka Milovanovic, Milic Djekic, "Simplified Chua type model for electrical steel magnetic hysteresis representation", International Scientific Conference – UNITECH 2013, Gabrovo, Bulgaria, 22-23 Nov. 2013, pp. I-137-I-142. [M33]

### **Радови саопштени на међународним скуповима штампани у изводу**

- [1] Branko Koprivica, Alenka Milovanovic, Milic Djekic, "Experimental determination of Chua type model parameters for electrical steel magnetic hysteresis representation", 21<sup>st</sup> Soft Magnetic Materials Conference SMM 21, Budapest, Hungary, 01-04 Sept. 2013, B2-04. [M34]
- [2] Branko Koprivica, Alenka Milovanovic, Jeroslav Zivanic, "Effects of wound toroidal core dimensions on measured specific power loss in electrical steel", 21<sup>st</sup> Soft Magnetic Materials Conference SMM 21, Budapest, Hungary, 01-04 Sept. 2013, G2-06. [M34]
- [3] Branko Koprivica, Alenka Milovanovic, "Electromagnetic characterization of current transformer with toroidal core under sinusoidal conditions", International Symposium on Hysteresis Modeling and Micromagnetics (HMM 2015), Iasi, Romania, 18-20 May 2015, P54. [M34]

#### **Радови саопштени на скупу националног значаја штампани у целини**

- [1] Бранко Копривица, Аленка Миловановић, Милић Ђекић, „Примена савременог мерно аквизиционог система за одређивање карактеристика феромагнетика“, 53. Конференција ЕТРАН-а, Врњачка Бања, 15-19. јун 2009. године, ML3.2-1-4, (награђен рад). [M63]
- [2] Бранко Копривица, „Методe мерења губитака у гвозденим лимовима“, 57. Конференција ЕТРАН-а, Златибор, 03-06. јун 2013. године, EE1.8-1-6. [M63]

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

Докторска дисертација кандидата мр Бранка Копривице је написана на укупно V+111 страна, и састоји се од 9 глава, укључујући увод и закључак, и списка литературе која је коришћена при изради дисертације. У оквиру литературе је наведено 96 библиографских јединица, укључујући и радове аутора. Докторска дисертација садржи 70 слика и једну табелу.

У уводној глави су дате основне напомене о значају анализираних проблема, основним захтевима који су постављени током истраживања, експерименталним методама и очекиваним резултатима.

Друга глава докторске дисертације садржи основну поделу материјала према њиховим магнетским карактеристикама. У овој глави је наведена и подела феромагнетских лимова према садржају силицијума, према анизотропији и према изражености хистерезиса. Објашњен је и процес магнећења феромагнетика заснован на Вајсовој (Weiss) теорији магнетских домена. Осим тога, илустроване су главна хистерезисна петља и мање петље, првобитна крива магнећења и крива специфичних губитака, уз дискусију њихових карактеристичних параметара.

Значајан део докторске дисертације је посвећен методама мерења магнетских карактеристика феромагнетских лимова, што је детаљно представљено у трећој глави. Анализирани су стандардизоване и нестандардизоване методе мерења. Међу стандардизоване методе су сврстани Епштајнов апарат и тестер са једним комадом лима, јер је њихова примена (поступак мерења, облик и димензије мерног узорка) у потпуности дефинисана међународним стандардима. У нестандардизоване методе су сврстане све оне методе које се појављују у литератури, које су коришћене од стране већег броја истраживача, а које нису дефинисане ниједним стандардом. На крају главе је анализирана и примена торусног узорка за мерење карактеристика феромагнетских лимова, коришћеног при мерењима у оквиру истраживања које разматра докторска дисертација.

Четврта глава представља сажетост ове докторске дисертације, а у њој је детаљно објашњен предложени математички модел хистерезиса. На почетку је анализиран један сложен процес магнећења материјала и при томе је описано како се формирају хистерезисне петље и прелазне криве. Дефинисани су појмови реверзне тачке и реверзне криве првог реда, као и правилности „ишчезавање“ и „повратак у претходну тачку“ које су од кључног значаја за правилно моделовање сложеног процеса

магнећења. У овој глави су анализирани и неки од постојећих модела хистерезиса, укључујући два најзначајнија – Прејсахов (Preisach) и Жил-Атертонов (Jiles-Atherton) модел. С обзиром на математичку сложеност, сложен поступак идентификације параметара модела и уску област примене постојећих модела, закључено је да и даље постоји потреба за формирањем нових математичких модела. Стога је у оквиру ове главе предложен један такав модел, а његове основне карактеристике су:

- једноставан математички облик који не подразумева употребу диференцијалног и интегралног рачуна,
- мали број параметара, укупно четири, који се могу једноставно одредити на основу резултата мерења и
- задовољавајућа тачност.

Предложени математички модел главне хистерезисне петље приказан је растућом и опадајућом кривом помоћу аркус тангенс функције. За одређивање вредности параметара модела се користе карактеристичне вредности јачине магнетског поља и магнетске индукције које одговарају засићењу, реманенцији и коерцитивности. Анализирана је тачност модела при моделовању главне хистерезисне петље у односу на резултате мерења. Додатно, извршено је и моделовање криве магнећења. Као и за модел главне петље, у те сврхе је коришћена аркус тангенс функција, уз додавање једног новог параметра модела. Уочена је веза параметара овог модела са параметрима модела главне петље, као и да вредност додатног параметра модела зависи од диференцијалне пермеабилности криве магнећења. Затим је извршено моделовање реверзне криве првог реда (РКПР). Ово моделовање је вршено помоћу модела главне петље и модела криве магнећења померањем опадајуће (растуће) криве главне петље вертикално наниже (навише) до реверзне тачке. Уведени су додатни параметри у моделу РКПР. У постојећој литератури се за одређивање додатних параметара модела РКПР користе експериментални резултати за РКПР. У овој докторској дисертацији је предложен другачији приступ јер је мерење РКПР веома сложено, а резултати таквих мерења се не могу добити од произвођача лимова. Зато је за фитовање РКПР коришћена измерена крива магнећења, уз једноставно одређивање додатног параметра модела. Након што се конструишу РКПР, извршено је симулирање прелазних процеса магнећења и мањих петљи коришћењем одговарајућих делова РКПР. Овакав приступ математичком моделовању омогућио је да се на основу познате главне хистерезисне петље и криве магнећења изврши конструисање мањих петљи и прелазних кривих у сложеном процесу магнећења.

Такође, важан део ове докторске дисертације представља пета глава у којој је описан комплетан мерно-аквизициони систем базиран на персоналном рачунару, а који је коришћен у оквиру експерименталног дела истраживања. На почетку главе су дати сви детаљи који се односе на опрему употребљену при мерењу магнетских карактеристика материјала (хистерезисних петљи, криве магнећења, криве специфичних губитака и прелазних процеса магнећења) и струјне и фазне грешке струјног мерног трансформатора, као и одговарајуће шеме веза. У другом делу ове главе описана су два виртуелна инструмента, направљена у програму LabVIEW, уз детаљан преглед експеримената које је могуће реализовати, приказ резултата које је могуће добити и

анализу услова који су постојали у току мерења. У склопу виртуелног инструмента за мерење магнетских карактеристика извршено је и моделовање главне хистерезисне петље, криве магнећења и РКПР, онако како је то предложено у четвртој глави.

Практична примена математичког модела хистерезиса је приказана на примеру струјног мерног трансформатора. Његов математички модел је дат у шестој глави и добро познат из постојеће литературе. Анализа струјног трансформатора са торусним језгром од феромагнетског лима спроведена у овој докторској дисертацији односи се на простопериодичан режим рада трансформатора, у којем су примарна струја, секундарна струја, секундарни напон, магнетска индукција и магнетско поље простопериодичне функције времена. За такав режим је предложен једноставан итеративни поступак за прорачун секундарне струје (њеног облика у времену) ако су познате вредности за простопериодичну примарну струју и електричне и магнетске параметре струјног трансформатора. При прорачуну су коришћени резултати добијени помоћу предложеног модела хистерезиса.

У седмој глави докторске дисертације су приказани најважнији експериментални и симулациони резултати спроведеног истраживања, а који нису приказани у претходним главама. Када је реч о експерименталним резултатима, то су: фамилија симетричних хистерезисних петљи, крива магнећења, крива специфичних губитака, фамилија несиметричних хистерезисних петљи, прелазни процес магнећења и струјна и фазна грешка струјног мерног трансформатора. Као резултат моделовања приказани су следећи симулациони резултати: мање хистерезисне петље (симетричне и несиметричне), демагнетизациони процес и временски облик секундарне струје и струјна и фазна грешка струјног мерног трансформатора.

Симулациони резултати су упоређени са експерименталним резултатима и другим симулационим резултатима како би се проверила њихова тачност. Утврђено је веома добро слагање приказаних резултата.

Преглед свих резултата приказаних у оквиру докторске дисертације и додатна анализа резултата дати су у осмој глави. Тако су у овој глави сумирани и први резултати који се односе на моделовање магнетског хистерезиса, а који су приказани у четвртој глави. При томе је додатно објашњено како се може инверзним поступком, након моделовања главне петље, за простопериодичну магнетску индукцију одредити временски облик магнетског поља. Уз преглед резултата из пете главе, анализирана је и контрола простопериодичног облика секундарног напона током мерења хистерезисних петљи, као и захтеви који се односе на тачност мерења. При томе је анализиран могућ утицај аквизиционе картице на тачност резултата мерења у случају када се мере мале вредности напона (реда  $mV$ ) и када постоји значајан шум. Уз преглед резултата приказаних у седмој глави посебно је наглашен значај измерених несиметричних петљи, које се могу искористити за добијање експерименталних РКПР. Осим тога, анализирана је грешка која се јавља при моделовању мањих симетричних петљи, као и вредности струјне и фазне грешке струјног мерног трансформатора.

У деветој глави су дати основни закључци до којих се дошло током истраживања и рада на изради докторске дисертације.

На крају докторске дисертације је дат списак коришћене литературе.

Докторска дисертација у потпуности испуњава обим и квалитет у односу на пријављену тему, будући да су достигнути постављени циљеви и доказане полазне хипотезе истраживања.

## 5. Научни резултати докторске дисертације

Кандидат мр Бранко Копривица је у оквиру своје докторске дисертације прво извршио систематизацију и анализу постојећих теоријских и експерименталних знања, искустава и научних резултата у области магнетизма, односно карактеризације и моделовања магнетских карактеристика феромагнетских лимова. Систематизацију истраживања у области испитивања и мерења магнетских карактеристика феромагнетских лимова извршио је кроз преглед постојећих метода мерења и при томе је обухватио како мерне методе које су стандардизоване у електротехници, тако и друге (нестандардизоване) мерне методе које се често користе у различитим специфичним испитивањима карактеристика ових материјала. Систематизацију теоријских знања у области моделовања дао је кроз преглед најзначајнијих постојећих математичких модела хистерезиса, при чему је детаљно анализирао два најважнија и најчешће коришћена модела – Прејсахов и Жил-Атертонов модел, уз дискусију њихових предности и мана, области примене и практичног значаја. Након тога кандидат је спровео обимна експериментална испитивања и успоставио математичке моделе који обухватају теоријска разматрања проблема и резултате експерименталних испитивања.

Реализацијом истраживачког рада кандидат је дошао до резултата и закључака који имају значај како у научно-теоријском, тако и у практичном смислу, од којих се издвајају следећи:

1. Предложен је нови математички модел хистерезиса, заснован на аркус тангенс функцији, који обухвата модел главне хистерезисне петље, модел криве магнећења и модел реверзних кривих првог реда, као и поступак за симулацију мањих хистерезисних петљи и сложеног процеса магнећења. Дефинисане су његове предности у односу на постојеће моделе, као што су једноставан математички облик и мали број параметара модела који се лако израчунавају из експерименталних резултата. Тачност предложеног модела проверена је кроз поређење са експерименталним резултатима и резултатима добијеним коришћењем Прејсаховог модела.
2. Осмишљен је и реализован мерно-аквизициони систем базиран на персоналном рачунару. При томе су одабране његове хардверске компоненте тако да омогућују мерење свих величина од интереса, као и контролу процеса магнећења материјала. Израђена је и сложена апликација преко које се контролише експеримент, врши мерење, приказивање, обрада и чување резултата мерења, као и моделовање главне хистерезисне петље, криве магнећења и реверзних кривих првог реда.
3. Предложен је једноставан поступак за прорачун струјне и фазне грешке струјног мерног трансформатора са торусним језгром од феромагнетског лима који узима у обзир и утицај магнетског хистерезиса језгра.

## **6. Применљивост и корисност резултата у теорији и пракси**

Добијени резултати научно истраживачког рада садржаног у докторској дисертацији имају велики теоријски и практичан значај.

Приказане експерименталне методе и резултати отварају простор за нова теоријска и практична истраживања у области испитивања карактеристика феромагнетских лимова. У том смислу, могуће је направити напредак у побољшању постојећих мерних метода, постизањем боље тачности применом савремених мерних средстава, потпуном аутоматизацијом или бољом контролом помоћу персоналног рачунара, као и увођењем нових специфичних испитивања.

Предложени математички модел хистерезиса представља основу за даља теоријска истраживања у области магнетизма. Могуће је, и у теоријском и у практичном смислу, испитати могућност примене модела и код других меких феромагнетских материјала. Такође, могуће је испитати и зависност параметара модела од фреквенције, температуре и механичких напрезања.

Експериментални резултати приказани у докторској дисертацији, уз резултате моделовања, директно су применљиви за кориснике феромагнетског лима, произвођаче електричних машина, трансформатора и индуктивних елемената са феромагнетским језгром.

Свеукупно, приказани резултати значајно актуелизују истраживања у области електротехнике, физике и математике са аспекта теорије, а са аспекта практичне примене у области електротехнике и у индустрији.

## **7. Начин презентирања резултата научној јавности**

Резултате истраживања у оквиру докторске дисертације кандидат је објавио у радовима у међународним и националним часописима (укупно три рада, категорија М23, М24 и М51), као и у радовима саопштеним на међународним и домаћим конференцијама (укупно девет радова).

Део резултата истраживања је представљен и у оквиру пројекта ТР33016 „Истраживање, развој и примена програма и мера енергетске ефикасности електромоторних погона“, финансираном од стране Министарства за просвету, науку и технолошки развој Републике Србије.

## **8. Закључак и предлог Комисије**

На основу претходно изложеног, Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр Бранка Копривице, дипл. инж. ел., доноси следећи

## **ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ**

На основу анализе докторске дисертације са аспекта актуелности теме, дефинисаног проблема и циља истраживања, полазних и доказаних хипотеза истраживања, као и научног доприноса и практичне вредности добијених резултата, Комисија позитивно оцењује урађену докторску дисертацију под насловом „МОДЕЛОВАЊЕ ГЛАВНЕ



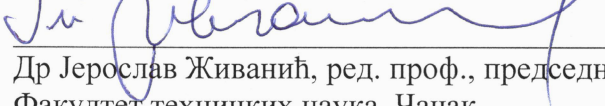

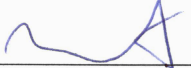
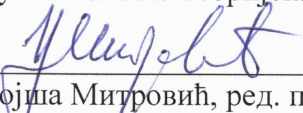
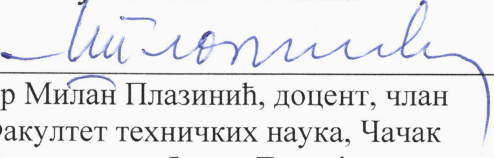
ХИСТЕРЕЗИСНЕ ПЕТЉЕ И ПРЕЛАЗНИХ ПРОЦЕСА МАГНЕЋЕЊА ФЕРОМАГНЕТСКИХ ЛИМОВА“, кандидата мр Бранка Копривице, дипл. инж. ел.

Комисија сматра да је докторска дисертација резултат самосталног рада кандидата и да по квалитету, обиму и приказаним резултатима истраживања у потпуности задовољава законске услове и универзитетске норме прописане за израду докторске дисертације. Комисија истиче да су у дисертацији представљени нови и оригинални резултати који представљају значајан научни допринос теорији моделовања магнетског хистерезиса и њеној примени у пракси.

На основу претходно изнетих закључака, Комисија предлаже Наставно-научном већу Факултета техничких наука у Чачку да прихвати Извештај о прегледу и оцени докторске дисертације, као и да омогући њену јавну одбрану у складу са Законом и нормативним актима Факултета и Универзитета.

У Чачку и Нишу,  
22. јун 2015. године

Чланови Комисије:

1.   
Др Јерослав Живанић, ред. проф., председник  
Факултет техничких наука, Чачак  
Ужа научна област: Теоријска и општа електротехника
2.   
Др Аленка Миловановић, ванр. проф., ментор  
Факултет техничких наука, Чачак  
Ужа научна област: Теоријска и општа електротехника
3.   
Др Ненад Цветковић, доцент, члан  
Електронски факултет, Ниш  
Ужа научна област: Теоријска електротехника
4.   
Др Небојша Митровић, ред. проф., члан  
Факултет техничких наука, Чачак  
Ужа научна област: Физика
5.   
Др Милан Плазинић, доцент, члан  
Факултет техничких наука, Чачак  
Ужа научна област: Теоријска и општа електротехника