

УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ
ЕЛЕКТРОНСКИ ФАКУЛТЕТ

Александра Медведева 14 · Поштански фах 73
18000 Ниш · Србија
Телефон 018 529 105 · Телефакс 018 588 399
E-mail: efinfo@elfak.ni.ac.rs; <http://www.elfak.ni.ac.rs>
Текући рачун: 840-1721666-89; ПИБ: 100232259



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF ELECTRONIC ENGINEERING

Aleksandra Medvedeva 14 · P.O. Box 73
18000 Niš - Serbia
Phone +381 18 529 105 · Fax +381 18 588 399
E-mail: efinfo@elfak.ni.ac.rs
<http://www.elfak.ni.ac.rs>

ДЕКАН
13.02.2015.

ОБАВЕШТЕЊЕ
НАСТАВНИЦИМА И САРАДНИЦИМА ЕЛЕКТРОНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Докторска дисертација кандидата мр Ане Вучковић под насловом «Нумерички приступи у одређивању расподеле магнетног поља и силе левитације код сталних магнета» и Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације налазе се у Библиотеци Електронског факултета у Нишу и могу се погледати до **28.02.2015. године**.

Примедбе на наведени извештај достављају се декану Факултета у напред наведеном року.

ЕЛЕКТРОНСКИ ФАКУЛТЕТ У НИШУ
Декан



Проф. др Драган Јанковић

NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU ELEKTRONSKOG FAKULTETA U NIŠU

Predmet: Izveštaj za ocenu i odbranu doktorske disertacije pod naslovom "Numerički pristupi u određivanju raspodele magnetnog polja i sile levitacije kod stalnih magneta" kandidata mr Ane Vučković.

Na sednici Nastavno-naučnog veća Elektronskog fakulteta u Nišu, održanoj 18.12.2014. godine, imenovana je Komisija za pisanje izveštaja za ocenu i odbranu doktorske disertacije pod naslovom „Numerički pristupi u određivanju raspodele magnetnog polja i sile levitacije kod stalnih magneta“ kandidata mr Ane Vučković, asistenta Elektronskog fakulteta u Nišu, u sastavu:

1. Doc. dr Nebojša Raičević, Elektronski fakultet, Niš
2. Prof. dr Ivan Yatchev, Tehnički univerzitet u Sofiji, Bugarska
3. Prof. dr Slavoljub Aleksić, Elektronski fakultet, Niš
4. Prof. dr Dragan Tasić, Elektronski fakultet, Niš
5. Prof. dr Zlata Cvetković, Elektronski fakultet, Niš

ЕЛЕКТРОНСКИ ФАКУЛТЕТ
У НИШУ

Примљено	13.02.2015.
Број	07/03 - 018/15

Na osnovu pregleda doktorske disertacije Komisija podnosi Nastavno-naučnom veću Elektronskog fakulteta u Nišu sledeći

IZVEŠTAJ

Doktorska disertacija kandidata mr Ane Vučković, pod nazivom „Numerički pristupi u određivanju raspodele magnetnog polja i sile levitacije kod stalnih magneta“ sadrži 196 numerisanih stranica teksta, 139 slika, 303 formule i 27 tabela. Izložena je kroz 11 poglavlja, spisak korišćene literature sačinjen od 170 bibliografskih jedinica i dva priloga. Organizovana je na sledeći način: 1. Uvod, 2. Podela i primena stalnih magneta, 3. Numerički i analitički pristupi za modelovanje stalnih magneta, 4. Tehnike za proračun sile kod stalnih magneta, 5. Novi polunumerički pristupi za modelovanje polja i sile kod stalnih magneta, 6. Primeri modelovanja sistema stalnih magneta primenom raspodele Amperovih struja, 7. Primeri modelovanja sistema stalnih magneta primenom raspodele fiktivnih magnetnih opterećenja, 8. Modelovanje pasivnih magnetnih ležaja, 9. Stalni magneti u prisustvu tela od magnetnog materijala, 10. Nepreciznosti u procesu modelovanja i proizvodnji stalnih magneta, 11. Zaključak, 12. Literatura i 13. Prilozi.

1. Prikaz doktorske disertacije

Stalni magneti su predmet proučavanja velikog broja istraživača u svetu već duži niz godina, o čemu svedoči veliki broj publikacija koje su delimično navedene u prvoj glavi doktorske disertacije. Predlagani su različiti metodi za proračun polja koje stvaraju stalni magneti u cilju pronalazjenja onog koji će omogućiti najjednostavniju analizu magnetnih struktura. Analitički pristupi za proračun polja stalnih magneta su tačniji od numeričkih ali imaju mogućnost primene samo kod jednostavnijih struktura. Analitičke metode bazirane na raspodeli površinskih magnetnih opterećenja i raspodeli Amperovih mikroskopskih struja su uglavnom ograničene na paralelopipedne i cilindrične strukture. Sa druge strane, numerički pristupi su procesorski zahtevni, a samim tim je potrebno duže vreme za proračun i nisu najpogodniji za parametarsku analizu polja i sile. U cilju prevazilaženja nedostataka postojećih analitičkih i numeričkih metoda u disertaciji su predložena dva polunumerička pristupa kojima su delom prevaziđeni nedostaci postojećih. Metodi koji su korišćeni u disertaciji za proračun polja i sile kod različitih konfiguracija, u čiji sastav ulaze stalni magneti, zasnovani su na jednačinama na kojima se bazira Amperski pristup i metod fiktivnih

magnetnih opterećenja. Da bi se stekao bolji uvid u 3D magnetne strukture i odredilo polje koje one stvaraju, uvođenjem diskretizacione tehnike u oba pristupa znatno je pojednostavljeno korišćenje pomenutih metoda i pružena je mogućnost primene istih na kompleksnije strukture. Posebnu grupu problema koji su analizirani u disertaciji predstavljaju strukture koje čine stalni magneti u prisustvu tela načinjenog od magnetnog materijala. Do sada se u literaturi isključivo moglo naći rešenje za polje, odnosno silu koja deluje između stalnog magneta i neograničene magnetne ravni. U ovoj disertaciji su prvi put modelovani sistemi stalnih magneta u prisustvu tela konačnih dimenzija načinjeni od magnetnih materijala primenom hibridnog metoda graničnih elemenata.

Sadržaj disertacije po poglavljima:

Poglavlje 1, "Uvod", sadrži objašnjenja razloga za izbor teme, prikaz značaja i aktuelnosti istraživanja sprovedenih u okviru disertacije, ciljeve istraživanja, očekivane rezultate i naučne doprinose, kao i organizaciju disertacije. Takođe, dat je pregled literature u kojoj su brojni istraživači u svetu prezentovali svoje rezultate, uz isticanje prednosti i nedostatke primenjenih metoda.

U **Poglavlju 2**, „Podela i primena stalnih magneta“, su navedene osnovne karakteristike magnetnih materijala. Iako proučavanje ovih materijala nije predmet disertacije, dat sadržaj je od značaja kao osnova za razumevanje dalje prikazanog istraživanja. Klasifikovani su materijali koji služe za izradu stalnih magneta po svom sastavu i navedena su njihova svojstva. Data je i podela stalnih magneta po primeni koju imaju u brojnim elektromehaničkim uređajima.

Treće poglavlje, „Numerički i analitički pristupi za modelovanje stalnih magneta“, je posvećeno najčešće korišćenim numeričkim i analitičkim pristupima za modelovanje stalnih magneta. Istaknute su prednosti i nedostaci analitičkih i numeričkih metoda. U ovom poglavlju su navedene i najčešće korišćene numeričke metode za modelovanje magnetnih struktura sa svojim prednostima i manama.

U **Poglavlju 4**, „Tehnike za proračun sile kod stalnih magneta“, dat je kratak opis tehnika za proračun sile kod stalnih magneta. Sila je jedna od najvažnijih veličina kada je u pitanju projektovanje elektromehaničkih uređaja i u velikoj meri određuje pouzdanost uređaja. Date su jednačine na kojima se baziraju metodi za proračun sile i to: metod virtuelnih pomeraja zasnovan na varijaciji energije, tenzor Maksvelovih napona i Lorencova sila.

Peto poglavlje, „Novi polunumerički pristupi za modelovanje polja i sile kod stalnih magneta“, sadrži detaljan opis polunumeričkih metoda za proračun polja i sile kod stalnih magneta koji su korišćeni u disertaciji za modelovanje različitih konfiguracija. Pristup zasnovan na raspodeli površinskih i zapreminskih Amperovih mikroskopskih struja u kombinaciji sa diskretizacionom tehnikom omogućava veoma brzo i jednostavno određivanje magnetnog polja i magnetne sile sistema stalnih magneta. Metod se bazira na određivanju najpre magnetnog vektor potencijala, zatim magnetne indukcije i magnetnog polja, a potom i sile između stalnih magneta. Modelovani su sistemi stalnih magneta oblika zarubljene kupe, torusa trapezoidnog poprečnog preseka i magneta pomenutih oblika postavljenih iznad linearne magnetne ravni. Magnetno polje i sila za pomenute strukture je prvi put određena od strane autora ove disertacije, i od velikog je značaja s obzirom da pruža mogućnost korišćenja magneta netipičnog oblika kod projektovanja novih uređaja u čiji sastav ulaze stalni magneti ili poboljšanja performansi postojećih.

Drugi pristup koji je korišćen za proračun magnetnog polja i sile različitih konfiguracija stalnih magneta zasniva se na uvođenju fiktivnih magnetnih opterećenja. U zavisnosti od oblika i magnetizacije analiziranog stalnog magneta određivana je raspodela površinskih ili i površinskih i zapreminskih magnetna opterećenja. Primenom diskretizacione tehnike u okviru ovog pristupa znatno je pojednostavljeno određivanje polja i sile kod aksijalnih i radijalnih magnetnih ležaja. Izbegnuti su višestruki integrali prisutni u do sada primenjenim metodama i problem rešen primenom elementarnih funkcija i eliptičkih integrala prve i druge vrste.

U ovom poglavlju je dat i detaljan opis trećeg metoda koji je korišćen u disertaciji, a to je nov hibridni metod graničnih elemenata (eng. *Hybrid boundary element method* - HBEM). Zasniva se

na metodu ekvivalentne elektrode i metodu podešavanja u tačkama (eng. point-matching method). Iako je do sada primenjivan za rešavanje različitih elektromagnetnih problema, kao što je određivanje raspodele elektromagnetnog polja u okolini kablovskih završnica i spojnica i analiza mikrotalasnih oklopljenih ili neoklopljenih vodova, u ovoj disertaciji je prvi put korišćen za modelovanje konfiguracija sa stalnim magnetima. Uticaj različitih magnetnih materijala ili uticaj objekta od magnetnog materijala u okolini stalnog magneta kada se on modeluje pomoću fiktivnih magnetnih opterećenja je određen korišćenjem graničnog uslova za normalnu komponentu vektora gustine magnetnog momenta.

U **Poglavljju 6**, „Primeri modelovanja sistema stalnih magneta primenom raspodele Amperovih struja“, dati su rezultati za proračun polja i sile različitih sistema stalnih magneta rešenih metodom zasnovanom na Amperovim mikro strujama i diskretizacionoj tehnici. Ovaj metod je korišćen kod stalnih magneta cilindričnog oblika, kao i magneta oblika kupe i prstena homogeno namagnetisanih u aksijalnom pravcu kod kojih, usled homogene aksijalne magnetizacije, postoje samo površinske Amperove mikroskopske struje. Prikazan je veliki broj rezultata grafički i tabelarno na osnovu kojih je veoma jednostavno izvršiti analizu sile i polja u funkciji parametra. Tačnost rezultata pomenutog pristupa je potvrđena metodom konačnih elemenata.

Poglavlje 7, „Primeri modelovanja sistema stalnih magneta primenom raspodele fiktivnih magnetnih opterećenja“, sadrži različite konfiguracije stalnih magneta modelovane primenom metoda zasnovanog na raspodeli fiktivnih magnetnih opterećenja i diskretizacionoj tehnici. Ovim pristupom su određena i magnetna polja koja stvaraju stalni magneti različitog oblika iznad linearne magnetne ravni i sila između magneta i magnetne ravni. Za analizu takvih struktura je, najpre, primenjena teorema lika u ravnom ogledalu, a zatim i metod zasnovan na raspodeli fiktivnih magnetnih opterećenja. Modelovan je sistem dva blok magneta, blok magnet iznad neograničene magnetne ravni, dva lateralno pomerena cilindrična magneta i stalni magnet oblika potkovice postavljen iznad magnetne ravni.

Poglavlje 8, „Modelovanje pasivnih magnetnih ležaja“, posvećeno je analizi magnetnih ležaja i određivanju sile između različitih konfiguracija ležaja. Pored struktura koje čine dva aksijalno, odnosno dva radijalno namagnetisana stalna magneta, što je uobičajna konfiguracija ležaja, analiziran je i sistem koji se sastoji od jednog aksijalno i jednog radijalno namagnetisanog magneta. Rezultati ovog pristupa su upoređeni sa Kulombijskim pristupom i metodom konačnih elemenata. U konačnom izrazu za silu figuriše, pored elementarnih funkcija, samo elipitički integral druge vrste, tako da je prednost ovog metoda njegova jednostavnost, a samim tim i vremenska efikasnost. Rezultati za silu magnetnog ležaja dobijeni su za manje od jedne sekunde, dok je primenom metoda konačnih elemenata potrebno više od pet minuta za rešavanje istog problema. Metod baziran na fiktivnim magnetnim opterećenjima pruža veliku mogućnost analize polja i sile u funkciji parametara magneta što je od velikog značaja za projektovanje i kontrolu uređaja koji sadrže stalne magnete. Pored toga, dobijeni izrazi za silu mogu biti od značaja za inverzne optimizacione probleme, koji nisu deo razmatranja ove disertacije ali mogu biti osnov daljim istraživanjima.

U **Poglavljju 9**, „Stalni magneti u prisustvu tela od magnetnog materijala“, analizirani su stalni magneti u prisustvu cilindra načinjenog od linearnog magnetnog materijala. Problem je rešen primenom Hibridnog metoda graničnih elemenata u kombinaciji sa metodom zasnovanom na fiktivnim magnetnim opterećenjima. Do sada su se problemi stalnih magneta u prisustvu, isključivo, ravni od magnetnih materijala rešavali primenom teoreme lika u ravnom ogledalu. U ovom poglavljju je primenjen hibridni metod graničnih elemenata za određivanje sile između cilindra konačnih dimenzija načinjenog od linearnog magnetnog materijala i stalnog magneta oblika cilindra i oblika prstena. Istaknute su najvažnije karakteristike različitih struktura. Ukazano je na mogućnosti njihovog unapređenja podešavanjem geometrije magneta i parametara sredine u cilju postizanja maksimalne magnetne sile, što je od velikog značaja za projektovanje uređaja koji sadrže stalne magnete.

U **Poglavljju 10**, „Nepreciznosti u procesu modelovanja i proizvodnji stalnih magneta“, razmatrane su različite problemi koji se mogu javiti u procesu modelovanja i procesu proizvodnje stalnih magneta. Navedene nepreciznosti imaju najveći uticaj na funkcionisanje uređaja zasnovanih

na stalnim magnetima s obzirom da svaka tehnika modelovanja polazi od pretpostavke koja unosi izvesnu grešku, a i sam proces proizvodnje je podložan oscilacijama u granicama tolerancije.

U **Poglavlju 11** prezentovana su generalna zapažanja i zaključci koji su posledica rezultata ostvarenih u radu. Ukazano je na najvažnije rezultate do kojih su dovela istraživanja sprovedena u toku izrade disertacije.

Spisak korišćene literature od ukupno 170 bibliografskih jedinica naveden je **Poglavlju 12**. Prikaz literature je organizovan tako da su citirane reference autora disertacije, kao i publikacije domaćih i inostranih autora, navedene po abecednom redosledu.

Na kraju su dati Prilozi, **Poglavlje 13**, u kojima su prikazana detaljna izvođenja korišćenih formula, što omogućava lakše razumevanje primenjenih metoda i praćenje osnovnog teksta.

2. Vrednovanje i ocena doktorske disertacije

Doktorska disertacija predstavlja kvalitetan istraživački rad koji sadrži originalne rezultate u oblasti modelovanja stalnih magneta. Predloženi su novi polunumerički pristupi za analizu različitih konfiguracija stalnih magneta, kojima su delom prevaziđeni nedostaci postojećih metoda za proračun polja i sile kod permanentnih magneta. Posebnu grupu problema, koji su analizirani u disertaciji, predstavljaju strukture koje čine stalni magneti u prisustvu tela načinjenog od magnetnog materijala.

Komisija posebno ističe sledeće naučne doprinose:

- Razvoj novih polunumeričkih metoda, zasnovanih na poznatom Amperskom i Kulombijskom pristupu, koji su uvođenjem diskretizacije tehnike u velikoj meri pojednostavljeni i omogućavaju veoma brzo određivanje polja i sile kod različitih konfiguracija stalnih magneta. Ovim pristupima su prevaziđeni neki nedostaci analitičkih i numeričkih metoda, kao što je primena analitičkih metoda na jednostavnije strukture ili procesorska i vremenska zahtevnost numeričkih metoda.
- Pristup zasnovan na raspodeli površinskih i zapreminskih Amperovih mikroskopskih struja je korišćen za proračun polja i sile sistema stalnih magneta netipičnih oblika. Sistemi su oblika zarubljene kupe, torusa trapezoidnog poprečnog preseka i magneta pomenutih oblika, postavljenih iznad linearne magnetne ravni. Magnetno polje i sila za pomenute strukture je prvi put određena od strane autora ove disertacije i od velikog je značaja s obzirom da pruža mogućnost korišćenja magneta netipičnog oblika kod projektovanja novih uređaja, u čiji sastav ulaze stalni magneti ili poboljšanja performansi postojećih.
- Razvijeni polunumerički pristupi su detaljniji za analizu polja i sile u funkciji parametara magneta u poređenju sa numeričkim metodama. To je od velikog značaja za projektovanje i kontrolu uređaja koji sadrže stalne magnetne.
- Rezultati pristupa zasnovanog na magnetnim opterećenjima prikazani su u znatno jednostavnijim formi u poređenju sa Kulombijskim pristupom. U konačnom izrazu za silu figuriše, pored elementarnih funkcija, samo elipitički integral druge vrste, tako da je prednost ovog metoda u njegovoj jednostavnosti, a samim tim u vremenskoj efikasnosti.
- Prvi put je Hibridni metod graničnih elemenata primenjen za rešavanje trodimenzionalnih problema i određivanje polja i sile kod stalnih magneta. Modelovani su sistemi stalnih magneta u prisustvu tela konačnih dimenzija načinjenih od magnetnih materijala, dok se u literaturi isključivo do sada moglo naći rešenje za polje, odnosno silu koja deluje između stalnog magneta i beskonačne magnetne ravni.
- Na osnovu prikazanih rezultata za magnetno polje i silu različitih konfiguracija stalnih magneta, moguće je izvršiti optimizaciju dimenzija stalnih magneta različitih oblika u cilju poboljšanja performansi uređaja u čiji sastav oni ulaze.

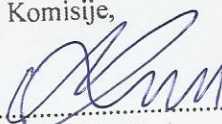
ZAKLJUČAK


Na osnovu uvida u doktorsku disertaciju, Komisija smatra da doktorska disertacija mr Ane Vučković sadrži više originalnih doprinosa vezanih za proračun polja i sile stalnih magneta kako sa teorijskog stanovišta, tako i sa aspekta praktične primene. Kandidat je do sada objavio ukupno 48 (četrdeset osam) radova od toga je deo izloženih rezultata publikovan u ukupno 35 radova i to dva rada u časopisu Electromagnetics (izadavača Taylor and Francis), jedan rad u međunarodnom časopisu International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, (IOS Press), jednu monografsku studiju u tematskom zborniku vodećeg međunarodnog značaja (Nova Publishers), pet radova u časopisima od nacionalnog značaja, od toga jedan u časopisu Facta Universitatis – electronics and energetics, dvadeset dva rada izložena na međunarodnim i četiri na domaćim naučnim skupovima.

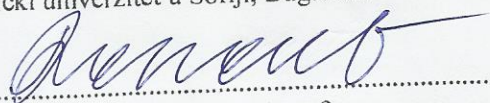
Imajući u vidu aktuelnost obrađene problematike i ostvarene rezultate kandidata, Komisija predlaže da se doktorska disertacija pod naslovom "Numerički pristupi u određivanju raspodele magnetnog polja i sile levitacije kod stalnih magneta" prihvati i da se kandidatu mr Ana Vučković odobri usmena odbrana doktorske disertacije.

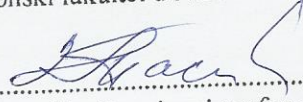
Niš, 12.02.2015.

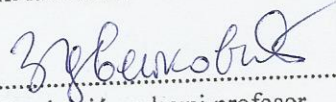
Članovi Komisije,


.....
Dr Nebojša Raičević, docent
Elektronski fakultet u Nišu


.....
Dr Ivan Yatchev, redovni profesor
Tehnički univerzitet u Sofiji, Bugarska


.....
Dr Slavoljub Aleksić, redovni profesor
Elektronski fakultet u Nišu


.....
Dr Dragan Tasić, redovni profesor
Elektronski fakultet u Nišu


.....
Dr Zlata Cvetković, redovni profesor
Elektronski fakultet u Nišu