

**Univerzitet u Beogradu**  
**Elektrotehnički fakultet**

## NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU

Predmet: Referat o urađenoj doktorskoj disertaciji mr Mališe Alimpijevića dipl. el. ing.

Odlukom Nastavno-naučnog veća Elektrotehničkog fakulteta br. 924/3 od 27.1.2016. godine imenovani smo za članove Komisije za pregled, ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata mr Mališe Alimpijevića dipl.el.ing. pod naslovom

**„Uticaj ekvivalentne temperature Maksvelovog spektra gasa slobodnih elektrona na proboj gasova pri malim vrednostima pritiska i međuelektrodnog rastojanja“**

Posle pregleda dostavljene Disertacije i drugih pratećih materijala i razgovora sa kandidatom, Komisija je sačinila sledeći

### REFERAT

#### 1. UVOD

##### 1.1 Hronologija odobravanja i izrada disertacije

Mališa Alimpijević je 22.08.2013. godine prijavio temu za izradu doktorske disertacije pod naslovom „Uticaj ekvivalentne temperature Maksvelovog spektra gasa slobodnih elektrona na proboj gasova pri malim vrednostima pritiska i međuelektrodnog rastojanja“.

Komisija za studije trećeg stepena je dana 27.08.2013. godine razmatrala predlog teme za izradu doktorske disertacije i predlog Komisije o oceni podobnosti teme i kandidata uputila Nastavno-naučnom veću na usvajanje.

Nastavno-naučno veće je 03.09.2013.godine imenovalo Komisiju za ocenu uslova i prihvatanje teme doktorske disertacije u sastavu:

- dr Jovan Cvetić, red. prof., Univerzitet u Beogradu-Elektrotehnički fakultet,
- dr Predrag Osmokrović, red. prof., Univerzitet u Beogradu-Elektrotehnički fakultet,
- dr Aleksandra Vasić, red. prof., Univerzitet u Beogradu-Mašinski fakultet.

Za mentora je predložen

- dr Jovan Cvetić, red. prof., Univerzitet u Beogradu-Elektrotehnički fakultet.

Nastavno-naučno veće je 25.02.2014. godine usvojilo Izveštaj Komisije za ocenu uslova i prihvatanje teme doktorske disertacije.

Veće naučnih oblasti tehničkih nauka dalo je saglasnost na predlog teme doktorske disertacije (broj odluke 61206-1449/2-14 31.3.2014. godine).

Kandidat je predao 10.12.2015. godine doktorsku disertaciju na pregled i ocenu.

Komisija za studije trećeg stepena je 15.12.2015. godine potvrdila ispunjenost potrebnih uslova za podnošenje predloga Nastavno-naučnom veću Elektrotehničkog fakulteta za formiranje Komisije za pregled i ocenu doktorske disertacije.

Nastavno-naučno veće Fakulteta imenovalo je komisiju za pregled i ocenu doktorske disertacije (broj odluke 924/3 od 27.01.2016. godine) u sastavu

- dr Jovan Cvetić, red. prof., Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet,
- dr Predrag Marinković, red. prof., Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet,
- dr Milorad Kuraica, red. prof., Univerzitet u Beogradu – Fizički fakultet,
- dr Branislav Jelenković, naučni savetnik Institut za fiziku, Beograd, član SANU,
- dr Koviljka Stanković, doc. Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet.

## 1.2 Naučna oblast disertacije

Doktorska disertacija pripada oblasti Fizičke elektronike za koju je matičan Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu. Imenovani mentor disertacije, dr Jovan Cvetić, redovni profesor Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, aktivno se bavi istraživanjem iz navedene naučne oblasti i iz nje ima ukupno 12 publikovanih radova u časopisima sa SCI liste.

## 1.3 Biografski podaci o kandidatu

Mališa Alimpijević rođen je 23.12.1968. godine u Despotovcu. Osnovnu školu je završio u Despotovcu, zajedničke osnove srednjeg usmerenog obrazovanja, takođe u Despotovcu, a treći i četvrti razred srednje škole matematičko-tehničke struke, zanimanje matematičko-tehnički saradnik u Jagodini.

Na Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu upisan je na profil Elektroenergetski sistemi školske 1988/89 godine, nakon odsluženog vojnog roka. Diplomirao je 1994. godine, sa prosečnom ocenom 8,07, odbranivši diplomski rad pod naslovom „Sistem daljinskog upravljanja na području MRC-a Kruševac“.

Na istom fakultetu upisao je školske 1994/95 godine magistarske studije na smeru Elektroenergetska postrojenja i oprema koje je završio sa prosečnom ocenom 9,33 odbranivši magistarski rad dana 19.04.2013. godine pod nazivom „Stohastička svojstva slučajne promenljive probojni napon vakuuma“.

Od 1996. godine, zaposlen je u EPS "Elektrosrbija" Kraljevo, ED Čuprija. Trenutno radi u ODS "EPS Distribucija" d.o.o. Beograd, ogranak Jagodina, na radnom mestu rukovodilac za planiranje i investicije. Posедуje licence odgovornog projektanta i odgovornog izvođača radova za elektroenergetske instalacije niskog i srednjeg napona.

Mr Mališa Alimpijević je koautor 17 radova (prvi autor je na 4 rada), od toga su dva rada objavljena u istaknutim međunarodnim časopisima (M22), tri rada u međunarodnim časopisima (M23), tri rada saopštena na međunarodnim naučnim skupovima štampana u celini (M33), jedan rad u domaćem naučnom časopisu (M53) i osam radova saopštenih na domaćim naučnim skupovima štampanih u celini (M63). Autor takođe ima jedan uslovno prihvaćen rad (accepted

for publication with minor revisions) u časopisu, pod naslovom Influence of Current Reflections from the Ground on Corona Sheath Dynamics during the Return Stroke, autora M.Tausanovic, M. Ignjatovic, J.Cvetic, F.Heidler, M.Alimpijevic, D.Pavlovic, Electric Power System Research 2015 (EPSR-D-15-01612), kategorije M21 (IF 2.234). Dobitnik je i nagrade za najzapaženiji rad na 32. savetovanju CIGRE Srbije, u okviru studijskog ometeta D1, održanom na Zlatiboru 17.-21. maja 2015. godine.

## **2. OPIS DISERTACIJE**

### 2.1 Sadržaj disertacije

Disertacija pod nazivom „Uticaj ekvivaletne temperature Maksvelovog spektra gasa slobodnih elektrona na proboj gasova pri malim vrednostima pritiska i međuelektrodnog rastojanja“ napisana je na 163 strane kucanog teksta na srpskom jeziku latiničnim pismom, sa 82 slike, 14 tabela i 93 numerisanih jednačina. Po formi i strukturi odgovara Uputstvu za oblikovanje doktorske disertacije i Uputstvu za formiranje repozitorijuma doktorskih disertacija Univerziteta u Beogradu od 14.11.2011. godine. Sadrži naslovnu stranu na engleskom i na srpskom jeziku, stranu sa podacima o mentoru i članovima komisije, apstrakt na engleskom (2 strane) i srpskom jeziku (2 strane), sadržaj (2 strane), 6 glava, 5 priloga, stranu sa kratkom biografijom kandidata i spisak korišćene literature, koji obuhvata 105 bibliografskih referenci (8 strana). Poglavlja disertacije su naslovljena kao:

1. Uvod (8 strana)
2. Ponašanje gasa slobodnih elektrona u električnom polju (17 strana)
3. Proboj gasova pri niskom pritisku (25 strana)
4. Eksperiment i obrada eksperimentalnih rezultata (12 strana)
5. Rezultati i diskusija (39 strana)
6. Zaključak (2 strane)

Prilog 1 Određivanje kinetičke jednačine za elektrone u slabo jonizovanom gasu koji se nalazi u električnom polju (20 strana)

Prilog 2 *U* test (Mann-Whitneyev-Wilcoxonova suma rangova) (2 strane)

Prilog 3 Pašenove krive (5 strana)

Prilog 4 Uticaj mehanizma proboja levo od Pašenovog minimuma na probojnu temperaturu Maksvelovog spektra gasa slobodnih elektrona (12 strana)

Prilog 5 Dugovremensko dekonticioniranje gasnih odvodnika prenapona (12 strana)

## 2.2 Kratak prikaz pojedinačnih poglavlja

Uvodno poglavlje, kao prvo, definiše osnovne parametre električnog pražnjenja u gasovima. Zatim su prikazane tipične karakteristike električnih pražnjenja u konstantnom električnom polju. Na osnovu prethodno datih karakteristika električnih pražnjenja u električnom polju data je klasifikacija električnih pražnjenja u gasovima. Tu su takođe, dati i osnovni istorijski podaci o električnom pražnjenju u gasovima. Na kraju uvodnog poglavlja definisan je cilj rada. Uvodno poglavlje je podeljeno na sledeća potpoglavlja: 1.1 Tipična pražnjenja u konstatnom električnom polju (3 strane), 1.2 Klasifikacija električnih pražnjenja u gasovima (1 strana), 1.3 Kratka istorija istraživanja električnih pražnjenja (3 strane), 1.4 Cilj rada (1 strana).

U drugom poglavlju je razmatrano ponašanje gasa slobodnih elektrona u električnom polju. Pri tome je posebna pažnja posvećena energetskim bilansima interakcije električnog polja i slobodnih elektrona na srednjoj slobodnoj dužini puta elektrona u uslovima elastičnih interakcija između slobodnih elektrona i atoma (odnosno molekula) gasa. U tom cilju su date osnovne komponente kinetičke jednačine za slobodne elektrone u slabo jonizovanom gasu, koji se nalazi u električnom polju (detaljniji prikaz odgovarajuće kinetičke jednačine je dat u Prilogu 1 ovoga rada). Na kraju ovog poglavlja je prikazan stacionarni spektar gasa slobodnih elektrona, koji proističe iz prethodno razmatranih energetskih bilansa, pri čemu je ostalo otvoreno pitanje da li spektar gasa slobodnih elektrona pripada Maksvelovoj ili Drajveštajnovoj raspodeli. Ova dilema kao i kompletno drugo poglavlje je napisano na osnovu do sada postignutih, i poznatih, podataka o spektru gasa slobodnih elektrona u električnom polju. Ovo poglavlje je podeljeno na sledeća

potpoglavlja: 2.1 Pomeraj elektrona u slabo jonizovanom gasu pod dejstvom električnog polja (6 strana), 2.2 Energija elektrona u slabo jonizovanom gasu, pod dejstvom električnog polja (4 strane), 2.3 Kinetička jednačina za elektrone u slabo jonizovanom gasu koji se nalazi u električnom polju (2 strane), 2.4 Stacionarni spektar elektrona u polju za slučaj samo elastičnih gubitaka (3 strane).

U trećem poglavlju je na osnovu dostupne literature razmatran električni proboj gasova pri niskom pritisku. U okviru tog razmatranja, posebna pažnja je posvećena mikroskopskim i makroskopskim fenomenima električnog proboja na niskom pritisku pri čemu je pravljena razlika između *dc* proboja, (tj. proboja pri kome je vremenska karakteristika promene napona mnogo duža od vremenske karakteristike relevantnih elementarnih procesa) i impulsnog proboja (tj. proboja kod kojeg su vremenske karakteristike promene napona i vremenska konstanta relevantnih elementarnih procesa istog reda veličine). Ovo poglavlje je podeljeno na sledeća potpoglavlja: 3.1 Jonizacija (8 strana), 3.2 DC proboj gasova (5 strana), Karakteristike *dc* probojnog napona gasova u homogenom električnom polju (10 strana), Impulsni proboj gasova (2 strane).

U četvrtom poglavlju su prikazani eksperimentalna oprema, eksperimentalni postupak i postupak obrade eksperimentalno dobijenih rezultata za određivanje zavisnosti *dc* i impulsnih probojnih napona plemenitih gasova od pritiska gasa i međuelektrodnog rastojanja. Eksperimentalna oprema, merni sistem, ekperimentalni postupak i postupak obrade ekperimentalnih rezultata su tako odabrani da su obezbeđivali visok stepen reproduktivnosti dobijenih rezultata uz prihvatljivu kombinovanu mernu nesigurnost postupka. Ovo poglavlje je podeljeno na sledeća potpoglavlja: 4.1 Komora (8 strana), 4.2 Merni sistem (1 strana), 4.3 Eksperimentalni postupak i obrada eksperimentalnih rezultata (3 strane).

U petom poglavlju prvi deo rezultata se odnosi na verifikaciju pretpostavke o primenljivosti Maksvelove raspodele (ili slične njoj) na spektar gasa slobodnih elektrona plemenitih gasova pri potpritisku. Osnovna ideja postupka verifikacije je da se na osnovu izmerenih zavisnosti DC probojnog napona od proizvoda *pd* odrede, jedinstvenim postupkom, konstante u izrazu za prvi Tausendov koeficijent jonizacije u izrazima po Tausendu, po Takašiju i prema pretpostavci o važenju Maksvelove raspodele za spektar gasa slobodnih elektrona. Pod pretpostavkom da dođe

do kvalitativnog i kvantitativnog podudaranja zavisnosti vrednosti  $dc$  probojnog napona od proizvoda pritiska i međuelektrodnog rastojanja  $pd$  (koja se određuje vrednošću koeficijenta korelacije fitovanja), može se zaključiti da je izraz za prvi Tauzendov jonizacioni koeficijent dobijen na osnovu pretpostavke o Maksvelovom tipu raspodele gasa slobodnih elektrona plemenitih gasova na potpritisku za proračun fenomena električnog pražnjenja pod tim uslovima prihvatljiv. Ovaj zaključak se može potvrditi i kvalitativnim i kvantitativnim posmatranjem zavisnosti odnosa Tauzendovog jonizacionog koeficijenta i pritiska gasa od proizvoda  $pd$  (pritisak  $\times$  međuelektrodno rastojanje).

Drugi deo rezultata se odnosi na istraživanje pretpostavke o obliku spektra gasa slobodnih elektrona plemenitih gasova na niskom pritisku, tačnije, na ispitivanje da li je ovaj spektar Maksvelovog ili Drajveštajnovog tipa. Naime, samo slaganje zavisnosti eksperimentalno određenog  $dc$  probojnog napona od proizvoda  $pd$  sa teoretskom krivom određenom pod pretpostavkom Maksvelovog spektra gasa slobodnih elektrona, može se tumačiti i posledicom numeričkog postupka fitovanja. Rezultat fitovanja često može da zavisi od broja parametara pod kojim se fituje, tj. što se fituje po većem broju parametara može se očekivati bolji rezultat fitovanja, odnosno koeficijent korelacije bliži 1. Međutim, za gasne smeše je potrebno da je form faktor, tj. ekvivalentna probojna temperatura, za oba gasa ista, pošto je gas slobodnih elektrona prema postavci nezavisan gas (što smanjuje broj parametara za fitovanje) (naravno ne treba očekivati da energetski spektar gasa slobodnih elektrona u gasnoj smeši bude isti, kao i za čiste gasove). Na taj način će se postavljena hipoteza o Maksvelovom tipu spektra gasa slobodnih elektrona pod dejstvom električnog polja, u uslovima gde nema diskretnih gubitaka energije, primenom interakcije elektrona i gasnih atoma ili molekula, moći smatrati potvrđenom. Sam postupak provere jedinstvenosti spektra gasa slobodnih elektrona sastojao se u sledećim koracima: 1 – eksperimentalno određivanje DC probojnog napona od proizvoda  $pd$  uz procentualni sastav smeše kao parametar; 2 – fitovanje tako dobijene zavisnosti sa različitim vrednostima  $Z$  za komponente gasova; 3 – fitovanje iste zavisnosti sa jednom vrednošću  $Z$  za sve komponente smeše; 4 – grafički prikaz dobijenih rezultata.

Treći deo rezultata se odnosi na određivanje zavisnosti srednje energije (temperature) spektra gasa slobodnih elektrona u zavisnosti od napona i proizvoda  $pd$ .

U poslednjem šestom poglavlju, predstavljeni su zaključci i glavni doprinosi disertacije.

U prilogu 1 pod naslovom Određivanje kinetičke jednačine za elektrone u slabo jonizovanom gasu koji se nalazi u električnom polju autor koristeći literaturu detaljno izvodi izraze za energiju slobodnih elektrona u molekularnim gasovima dopunjujući time izvođenja data u drugom poglavlju.

U prilogu 2 pod naslovom  $U$  test (Mann-Whitneyev-Wilcoxonova suma rangova) autor prikazuje proceduru  $U$  testa koji je u radu koristio tokom provere pripadnosti eksperimentalno dobijenih slučajnih promenljivih jedinstvenom statističkom uzorku.

U prilogu 3 pod naslovom Pašenove krive date su Pašenove proračunate krive za sve plemenite gasove dobijene primenom jonizacionog koeficijenta po Tausendu, po Takašiju i po izrazu izvedenom u ovom radu. Na osnovu prikazanih krivih se vidi dobro slaganje između proračunatih Pašenovih krivih dobijenih korišćenjem izraza po Tausendu i dobijenih korišćenjem izraza izvedenim u ovom radu, dok proračunate Pašenove krive dobijene korišćenjem izraza po Takašiju u nekim slučajevima vidno odstupaju od njih.

U prilogu 4 pod naslovom Uticaj mehanizma proboja levo od Pašenovog minimuma na probojnu temperaturu Maksvelovog spektra gasa slobodnih elektrona autor posmatra probojnu temperaturu (tj. energiju elektrona koji iniciraju proboj) u tačkama levo od Pašenovog minimuma, odnosno u tačkama u kojima dolazi do prelaza iz gasnog mehanizma proboja, preko mehanizma anomalnog Pašenovog proboja u vakuumski mehanizam proboja. Tom prilikom je dobijeno dobro slaganje između eksperimentalno dobijenih rezultata i rezultata dobijenih prema izrazima izvedenim pod pretpostavkom da se na spektar gasa slobodnih elektrona može primeniti Maksvelova raspodela. Na osnovu toga se može zaključiti da se i u tačkama levo od Pašenovog minimuma spektra gasa slobodnih elektrona može smatrati Maksvelovim.

U prilogu 5 pod naslovom Dugovremensko dekondicioniranje gasnih odvodnika prenapona autor prikazuje jednu praktičnu primenu u radu diskutovanih elementarnih procesa električnog pražnjenja u gasovima. Razmatra se problem dugovremenskog dekondicioniranja gasnih odvodnika prenapona (koji su po pravilu punjeni plemenitim gasovima) i daje se jedno prihvatljivo objašnjenje.



### 3. OCENA DISERTACIJE

#### 3.1 Savremenost i originalnost

Oblast električnog pražnjenja u gasovima je relativno dobro istražena, međutim zbog svoje važnosti kako teoretske tako i praktične ona pruža mogućnosti za dalja proučavanja. Problem prikazan u ovom radu kao i ostvareni cilj predstavljaju jedan sasvim novi pristup matematičkog modelovanja lavinskih procesa. Naime, u dosadašnjoj praksi primarni jonizacioni koeficijenti (tzv. Tauzendovi koeficijenti) izvođeni su na osnovu logaritamskog zakona o proporcionalnosti efekata interakcija sa brojem interakcija i dela prostora u kome se odvijaju. Takav pristup je doveo, u slučaju plemenitih gasova, do izraza po Tauzendu i po Takašiju u kojima su postojale konstante, čije su numeričke vrednosti bile određene za svaki gas posebno. U ovoj disertaciji je primenjen drugačiji pristup, tj. krenulo se od definicije jonizacionih koeficijenata definisanih u statističkoj fizici, uz pretpostavku poznavanja oblika spektra gasa slobodnih elektrona. Na taj način koristeći se analizom sudarnih procesa slobodnih elektrona i neutralnih atoma plemenitih gasova, odnosno njihovih smeša izvedeni su novi izrazi za jonizacione koeficijente koji su, takođe sadržali konstante, čije su numeričke vrednosti bile određene za svaki gas posebno. Tako dobijeni izrazi za jonizacione koeficijente su korišćeni prilikom proračuna Pašenovih krivih za plemenite gasove, odnosno njihove smeše, pri malim vrednostima proizvoda  $pd$ . Rezultati dobijeni ovim proračunima zajedno sa odgovarajućim rezultatima dobijenim analognim proračunima uz korišćenje Tauzendovih i Takašijevih izraza za jonizacione koeficijente upoređivani su sa ekperimentalno dobijenim rezultatima. To poređenje je pokazalo da jonizacioni koeficijenti dobijeni uz pretpostavku Maksvelovog oblika spektra gasa slobodnih elektrona daju bolje rezultate u široj oblasti proizvoda  $pd$  od odgovarajućih rezultata dobijenih primenom izraza za jonizacione koeficijente po Tauzendu i po Takašiju. Da je dobro slaganje posledica ispravnosti pretpostavke u Maksvelovoj prirodi spektra gasa slobodnih elektrona, dokazano je time, što je prilikom proračuna probojnih napona smeša plemenitih gasova za sve komponente smeše dobijan približno isti faktor forme spektra. U nastavku rada, razmatrani su osnovni parametri spektra gasa slobodnih elektrona i ustanovljeno je da se realniji rezultati (koji više odgovaraju ekperimentalnim podacima i logičnom rasuđivanju) dobijaju pod pretpostavkom konstantnosti (nezavisnosti od energije) srednje slobodne dužine puta elektrona. Ta pretpostavka prevodi Maksvelovu raspodelu u Drajveštajnovu raspodelu, koja joj je veoma slična. Jedina

značajna razlika između ove dve raspodele je u brzini opadanja repa raspodele. U slučaju Maksvelove raspodele, rep raspodele opada sporije (proporcionalno eksponentu negativnog izložioca linearno zavisnog od energije), a u slučaju Drajveštajnovne raspodele rep raspodele opada brže (proporcionalno eksponentu negativnog izložioca kvadratno zavisnog od energije). U radu su izvršena određivanja statističkog uzorka slučajne veličine impulsni probojni napon, primenom izuzetno sporih impulsa. Numeričkom analizom ovih slučajnih veličina je ustanovljeno da za gas slobodnih elektrona važi Maksvelova raspodela. U svakom slučaju je zaključeno, da su srednje energije elektrona u gasovima obično niske, reda veličine 2-3 eV, u poređenju sa prilično visokim energijama repa raspodele, koje su reda veličine 10 eV i koje odgovaraju energetske potencijalima eksitacije i jonizacije atoma posmatranog gasa. Usled toga su u srednjim oblastima gasa energetske gubici pri interakcijama veoma mali. Gas se jonizuje „super-energetskim“ elektronima, koji su retki. Iz tog razloga, glavni mehanizam prenosa energije od gasa slobodnih elektrona do gasa neutralnih atoma je elastični gubitak.

### 3.2 Osvrt na referentnu i korišćenu literaturu

Spisak literature, koju je kandidat naveo u disertaciji pokazuje da je kandidat detaljno analizirao postojeću literaturu i korektno citirao radove, koji su u vezi sa temom disertacije. Navedeno je 105 bibliografskih referenci. Literatura sadrži veliki broj nedavno objavljenih radova iz visokorenomiranih časopisa, koji su usko vezani za razmatrani problem, što svedoči o aktuelnosti i značaju istraživanja.

### 3.3 Opis i adekvatnost primenjenih naučnih metoda

U tezi su primenjivane teoretske, numeričke i eksperimentalne naučne metode.

- Svaka primena statističke termodinamike podrazumeva poznavanje spektra (raspodele po energiji ili, neretko, po brzini konstitutivnih komponenata) sistema, koji se posmatra. Za ovo razmatranje je upravo bitno pitanje, kakva je raspodela po energiji ili po brzini (spektar) gasa slobodnih elektrona pod dejstvom električnog polja. Da bi se našao odgovor na ovo pitanje, teoretski je razmatran pomeraj elektrona u slabo jonizovanom gasu pod dejstvom električnog polja. Tim razmatranjem, došlo se do izraza za energiju elektrona u slabo jonizovanom gasu pod dejstvom električnog polja. Takođe je izveden i

izraz za stacionarni spektar elektrona u polju u slučaju samo elastičnih gubitaka (što odgovara uslovima slabo jonizovanih plemenitih gasova). Tu je ustanovljeno, da je odgovarajući spektar gasa slobodnih elektrona ili Maksvelovog tipa ili Drajveštajnovog tipa. Daljim razmatranjem su izvedeni originalni izrazi za jonizacione koeficijente, pod uslovom Tauzendovog mehanizma proboja.

- Eksperimenti su vršeni pod izuzetno dobro kontrolisanim laboratorijskim uslovima. Posebna pažnja, tokom eksperimentalnog postupka, bila je posvećena reproduktivnosti dobijenih rezultata i minimizaciji subjektivne merne nesigurnosti u postupku. Korišćena oprema bila je delom nabavljena na tržištu, pri čemu se vodilo računa o referencama proizvođača, a delom namenski proizvedena. Algoritam mernog postupka je podrazumevao hardversku i softversku kontrolu pouzdanosti, kako delova opreme tako i kompletnog postupka. Na osnovu toga se može tvrditi da je eksperimentalni postupak bio veoma pouzdan, pošto su podaci o mernoj nesigurnosti, tip A, tip B i kombinovanoj mernoj nesigurnosti, dobijeni na osnovu detaljno određenog budžeta mernoj nesigurnosti. Ovde posebno treba istaći dobro koncipiran eksperiment, koji je omogućio da praćenjem stohastičkog ponašanja slučajne promenljive impulsni probojni napon reprezentativnog statističkog uzorka bude utvrđeno da li je spektar gasa slobodnih elektrona, u uslovima eksperimenta Maksvelovog ili Drajvenštajnovog tipa. Metod obrade eksperimentalno dobijenih rezultata je zasnovan na najstrožijim metrološkim principima, pa se dobijenim rezultatima prikazanim u radu može pokloniti puno poverenje.
- Numeričke metode u okviru ove teze su korišćene za obradu eksperimentalnih podataka, proveru reproduktivnosti merenja i određivanje koeficijenata u izrazima za jonizacione koeficijente po Tauzendu, po Takašiju i u izrazu izvedenom u ovom radu. Numeričke metode su primenjene korektno, što se pokazuje slaganjem rezultata u slučaju jonizacionih koeficijenata po Tauzendu i po Takašiju sa odgovarajućim rezultatima drugih autora.

### 3.4 Primenljivost ostvarenih rezultata

Rezultati dobijeni u tezi omogućavaju, da se kroz dalji razvoj predloženog algoritma za određivanje jonizacionih koeficijenata, unapredi postupak matematičkog modelovanja električnog pražnjenja u gasovima uz uzimanje u obzir svih relevantnih parametara (vrste gasa, pritiska gasa, elektrodne konfiguracije, elektrodnih materijala i topografije elektrodnih površina). Takav pristup, u inženjerskoj praksi, omogućava numeričko projektovanje sistema izolovanih gasom uz prethodno definisanje verovatnoće pojave električnog pražnjenja unutar njih. Korišćenjem takvog pristupa bi se znatno ubrzao postupak projektovanja sistema izolovanih gasom, a njime bi bile ostvarene i značajne uštede vremena i materijalnih sredstava.

### 3.5 Ocena dostignutih sposobnosti kandidata za samostalni naučni rad

Kroz realizaciju disertacije kandidat je u potpunosti demonstrirao sve relevantne sposobnosti za samostalan naučno-istraživački rad. Na prvom mestu, kandidat je vrlo zrelo predvideo i prepoznao aktuelnost, atraktivnost i značaj izabrane teme. Literatura, koju je priložio je aktuelna i relevantna za temu, što govori o njenom sistematičnom i pažljivom izboru. Ciljevi disertacije, matematičko-fizički model, kao i izbor i prezentacija metoda za sprovođenje istraživanja i realizaciju postavljenih zadataka su jasno definisani, obrazloženi i prikazani u disertaciji. Pored toga, kandidat je uspešno koncipirao originalnu analizu eksperimentalno dobijenih statističkih uzoraka slučajne promenljive impulsni probojni napon, koji je omogućavao razmatranje koncentracije slobodnih elektrona u repu spektra na osnovu čega je bilo moguće nedvosmisleno izvući zaključak o tome da li je spektar gasa slobodnih elektrona Maksvelovog ili Drajveštajnovog tipa. Kandidat je takođe, korektno primenio numeričke postupke za analizu i obradu rezultata merenja. Diskusija rezultata dobijenih u tezi, koju je dao kandidat, je sadržajna, jasna, nedvosmislena i zrelo prikazana. Zaključci disertacije pokazuju visok nivo spremnosti kandidata da prepozna prednosti i nedostatke, kao i ograničenja postavljenog modela i da jasno i uverljivo predstavi najvažnije doprinose svog istraživanja, uz konkretno i uopšteno sagledavanje konsekvenci rezultata proisteklih iz teze, što nedvosmisleno potvrđuje da je kandidat spreman i sposoban da sam ili u timu, ubuduće, kompetentno obavlja naučno-istraživački rad. Da je to tako, potvrđuju i do sada objavljeni naučni radovi kandidata, koji takođe sadrže sve prethodno pomenute karakteristike, koje njega nedvosmisleno kvalifikuju za samostalan rad ili rad u timu.

## 4. OSTVARENI NAUČNI DOPRINOS

### 4.1 Prikaz ostvarenih naučnih doprinosa

Originalni naučni doprinosi koji su ostvareni u tezi su sledeći:

- Pokazano je da spektar gasa slobodnih elektrona pripada Maksvelovoj raspodeli pod pretpostavkom da je osnovni gas slabo jonizovani plemeniti gas ili smeša plemenitih gasova što podrazumeva postojanje samo elastičnih elektronsko atomskih sudara i mogućnost zanemarivanja elektronskih, kulonskih interakcija.
- Dokazano je da je moguće proračunati Pašenove krive plemenitih gasova primenom jonizacionih koeficijenata dobijenih metodama statističke fizike i kinetičke teorije gasova kao i da takvi proračuni daju bolje slaganje u široj oblasti vrednosti proizvoda  $pd$  od odgovarajućih proračuna dobijenih jonizacionim izrazima po Tausendu i po Takašiju.
- Osmisljen je i sproveden originalan eksperimentalni postupak sa impulsnim probojnim naponima, čiji je rezultat omogućio procenu promene koncentracije elektrona u repu spektra, njihove raspodele, po energijama.
- Određen i prikazan na 3D dijagramima i dato tumačenje zavisnosti srednje energije (temperature) spektra gasa slobodnih elektrona za plemenite gasove pod prethodno navedenim uslovima.

### 4.2 Kritička analiza rezultata istraživanja

Sagledavanjem ciljeva istraživanja, postavljenih hipoteza i ostvarenih rezultata, Komisija sa zadovoljstvom može da konstatuje da je kandidat uspešno odgovorio na sva bitna pitanja i dileme, koje suštinski proizilaze iz problematike, kojom se disertacija bavi.

Prethodno navedeni naučni doprinosi predstavljaju značajne rezultate u pogledu boljeg razumevanja mikroskopskih mehanizama električnog pražnjenja u gasovima, a omogućavaju i proračune karakteristika gasom izolovanih električnih sistema. Ključna otkrića do kojih se došlo u ovoj disertaciji, a koja definišu napredak u odnosu na već postojeća saznanja, su sledeća:

- Precizno su definisani uslovi pod kojim se spektru gasa slobodnih elektrona može pripisati Maksvelov oblik.
- Polazeći od te pretpostavke definisan je potpuno nov izraz za prvi jonizacioni koeficijent, koji u potpunosti zadovoljava Zakon sličnosti za električna pražnjenja u gasovima.
- Pokazalo se da se prvim Tauzendovim jonizacionim koeficijentom, izvedenim u ovom radu, pod pretpostavkom važenja Maksvelove raspodele za gas slobodnih elektrona, dobijaju, kvantitativno, isti rezultati kao i sa prvim jonizacionim koeficijentom po Tauzendu i Takašiju unutar oblasti odnosa vrednosti električnog polja i pritiska, za koje važe ova dva poslednja izraza. Kako izraz za prvi Tauzendov jonizacioni koeficijent, izveden u ovom radu, nema nikakvo ograničenje u oblasti vrednosti primene, on je svakako šire primenljiv od izraza po Tauzendu i Takašiju.
- Tokom određivanja srednje vrednosti energije (temperature) u spektru gasa slobodnih elektrona da su one obično niske, reda veličine 2-3 eV, u poređenju sa prilično visokim energijama repa raspodele, koje su reda veličine 10 eV i koje odgovaraju energetskim potencijalima eksitacije i jonizacije atoma posmatranog gasa.

Polazeći od svega navedenog, može se zaključiti da rezultati, koje je postigao kandidat daju čvrst okvir i osnovu za prepoznavanje ovog rada kao kvalitetne doktorske disertacije.

#### 4.3 Verifikacija naučnih doprinosa

Naučni doprinosi disertacije verifikovani su sledećim radovima:

##### Kategorija M22

- [1] **Alimpijević M.**, Stanković K., Ignjatović M., Cvetić J., The Maxwellian Nature of Free-Electrons' Gas Spectrum of Noble Gases at Low Pressure, Vacuum, Vol. 110, pp. 19-23 (2014), ISSN: 0042-207X, doi: 10.1016/j.vacuum.2014.08.005, (IF2014:1,858; M22).
- [2] **Alimpijević M.**, Rajović Z., Brajović D., Vujisić M., Stanković K., Influence of the breakdown mechanism to the left of the Paschen minimum on the breakdown temperature of the free electron gas Maxwell spectrum, Vacuum, Vol.99, pp. 89-94, (2014), ISSN 0042-207X, (IF2014:1,858; M22).

### Kategorija M23

- [3] Stankovic K, **Alimpijevic M**, Free-Electron Gas Spectrum Uniqueness in the Mixture of Noble Gases, Contributions to Plasma Physics, (2015) ISSN: 0863-1042, doi: 10.1002/ctpp.201500041 (IF2014: 0,838; M23).
- [4] **Alimpijevic M.**, Stankovic K., Free electron gas spectrum parameters of noble gases in dc electric field, Radiation Effects and Defects in Solids: Incorporating Plasma Science and Plasma Technology, Vol. 179, no. 9, pp. 719-728 (2015), ISSN: 1042-0150, doi: 10.1080/10420150.2015.1092533, (IF2014: 0,513; M23).
- [5] Stankovic K., **Alimpijevic M.**, Vujisic M., Osmokrovic P., Numerical Generation of a Statistic Sample of the Pulse Breakdown Voltage Random Variable in SF<sub>6</sub> Gas With Homogenous and Nonhomogenous Electric Field, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 42, no. 11, pp. 3508-3519 (2014), ISSN: 0093-3813, doi: 10.1109/TPS.2014.2359495, (IF2014:1,101; M23).

### Kategorija M33

- [6] Stankovic K., **Alimpijevic M.**, Despotovic D., Kovacevic U., Brajovic D., The Parameters of the Free Electrons Gas Spectrum of Noble Gases Mixture at Small Pressures and Inter-Electrode Distances, 2014 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), Santa Fe, NM - June 1 - 5, 2014, Proceedings pp. 492-495, doi: 10.1109/IPMHVC.2014.7287319, ISBN: 978-1-4673-7323-4.
- [7] Perazic L, Stankovic K, Belic C, **Alimpijevic M**, Fetahovic I, Violating the Free-Electrons Gas Spectrum of Noble Gases by Adding the Electropositive and Electronegative Gases, IEEE Pulsed Power Conference (PPC), 31. maj - 4. jun 2015., Austin, Texas, USA, doi: 10.1109/PPC.2015.7296940.
- [8] Stankovic K, **Alimpijevic M**, Kovacevic U, Brajovic D, Dolicanin E, Characteristics' Optimization of Gas-Filled Surge Arresters by Using Gas Mixtures, IEEE Pulsed Power Conference (PPC), 31. maj - 4. jun 2015., Austin, Texas, USA, doi: 10.1109/PPC.2015.7296944.

### Kategorija M63

- [9] D. Brajović, **M. Alimpijević**, R. Marić, B. Jovanović, U. Kovačević, Ispitivanje karakteristika odvodnika prenapona nakon dekontinuiranja, 32. savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor 17-21 maj 2015, Zbornik radova, R D1-01, 2015, ISBN: 978-86-82317-77-7.
- [10] K. Stanković, **M. Alimpijević**, S. Đekić, M. Vujisić, P. Osmokrović, Numeričko određivanje impulsne karakteristike dvoelektrodne konfiguracije izolovane SF<sub>6</sub> gasom, 32. savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor 17-21 maj 2015, Zbornik radova, R D1-02, 2015, ISBN: 978-86-82317-77-7.

- [11] **M. Alimpijević**, K. Stanković, L. Perazić, M. Ignjatović, J. Cvetić, *Određivanje funkcije rapodele energije gasa slobodnih elektrona na niskim pritiscima*, 32. savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor 17-21 maj 2015, Zbornik radova, R D1-04, 2015, ISBN: 978-86-82317-77-7.
- [12] Stanković K., Brajović D., Iričanin B., **Alimpijević M.**, Despotović D., Kovačević U., *Stohastički pristup predikciji parametara spektra gasa slobodnih elektrona smeše plemenitih gasova pri malim pritiscima i međuelektrodnim rastojanjima*, Zbornik 58. konferencije za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku ETRAN 2014, Vrnjačka Banja, 2-5. juna 2014. godine, ISBN 978-86-80509-70-9, pp. EE 2.2.1-6;
- [13] **Alimpijević M.**, Rajović Z., Stojkanović M., Ilić G., Marić R., *Uticaj moderacionog efekta smeše gasova SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> na impulsne karakteristike probojnog napona*, Zbornik radova sa 31. savetovanja CIGRE Srbija, maj 2013. godine;
- [14] Brajović D., **Alimpijević M.**, Stojkanović M., Jovanović B., Jurošević M., *Uticaj jonizujućeg zračenja na funkcionalne karakteristike gasnih odvodnika prenapona*, Zbornik radova sa 31. savetovanja CIGRE Srbija, maj 2013. godine;
- [15] Brajović D., **Alimpijević M.**, Stojkanović M., Jurošević M., Stanković K., *Primena spoljašnjeg izvora zračenja za stabilizaciju karakteristika gasnog odvodnika prenapona*, 11. savetovanje BH K CIGRE, septembar 2013, Zbornik radova R D1-08;

## 5. ZAKLJUČAK I PREDLOG

Na osnovu predloženog, Komisija konstatuje da doktorska disertacija **mr Mališe Alimpijevića**, diplomiranog inženjera elektrotehnike, pod naslovom „**Uticaj ekvivalentne temperature Maksvelovog spektra gasa slobodnih elektrona na proboj gasova pri malim vrednostima pritiska i međuelektrodnog rastojanja**“, ispunjave sve formalne i suštinske uslove predviđene Zakonom o obrazovanju, kao i propisima Univerziteta u Beogradu i Elektrotehničkog fakulteta.

Doktorska disertacija mr Mališe Alimpijevića dipl. el. ing. sadrži naučne doprinose od teoretskog, eksperimentalnog i numeričkog značaja bitnih za razumevanje elementarnih procesa električnog pražnjenja u gasovima. Glavni rezultati istraživanja prikazani su u radovima publikovanim u međunarodnim časopisima sa SCI liste odnosno referencama 1-2 (2 rada iz kategorije M22, od kojih je kandidat prvi autor na oba rada) odnosno u referencama od 3-5 (3



rada iz kategorije M23, od kojih je kandidat prvopotpisan na jednom radu). Tokom izrade disertacije kandidat je pokazao sposobnost za samostalni i timski istraživački rad.

Komisija predlaže Nastavno-naučnom veću Elektrotehničkog fakulteta da se doktorska disertacija pod naslovom "**Uticaj ekvivalentne temperature Maksvelovog spektra gasa slobodnih elektrona na proboj gasova pri malim vrednostima pritiska i međuelektrodnog rastojanja**", kandidata mr Mališe Alimpijevića, diplomiranog inženjera elektrotehnike prihvati, izloži na uvid javnosti i uputi na konačno usvajanje Veću naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu.

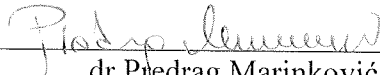
Beograd, 08.02.2016.

**ČLANOVI KOMISIJE**




dr Jovan Cvetić, red. prof.

Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet



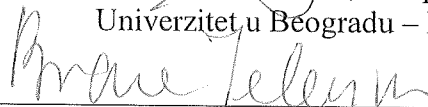
dr Predrag Marinković, red. prof.

Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

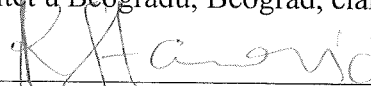


dr Milorad Kurajca, red. prof.

Univerzitet u Beogradu – Fizički fakultet



dr Branislav Jelenković, naučni savetnik Institut za fiziku  
Univerzitet u Beogradu, Beograd, član SANU



dr Kovička Stanković, doc.

Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet