

Примљено: 12.11.2014.

Орг. јед. Број Прилог Вредност

01 3841

**NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU  
PRIRODNO-MATEMATIČKOG FAKULTETA U NIŠU**

Na sednici Nastavno-naučnog veća Prirodno-matematičkog fakulteta u Nišu, održanoj 15.10.2014. godine, odlukom br. 1062/2-01, određeni smo za članove Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata Aleksandra P. Jovanovića, istraživača-saradnika, pod nazivom:

**ELEKTRIČNI PROBOJI U VAZDUHU: NOVI EKSPERIMENTI  
I STATISTIČKI I NUMERIČKI MODELI**

Na osnovu uvida u materijal, podnosimo sledeći

**IZVEŠTAJ**

Doktorska disertacija Aleksandra P. Jovanovića, pod nazivom **Električni proboji u vazduhu: novi eksperimenti i statistički i numerički modeli**, napisana je na 114 strana i sadrži 47 grafičkih prikaza, 2 tabele, 159 citata i 1 prilog. Rad je podeljen u 8 poglavlja: Uvod (7 strana), Opis eksperimenta (10 strana), Statističke metode i modeli kod električnih proboja gasova (36 strana), Modeli stacionarnog stanja tinjavog pražnjenja u sintetičkom vazduhu (10 strana), Modeli relaksacije u sintetičkom vazduhu (27 strana), Zaključak (6 strana), Prilog (4 strane) i Literatura (10 strana). U dodatku na kraju su uključeni Biografija i bibliografija (4 strane), Objavljeni naučni radovi (18 strana) i Izjave autora (3 strane), a na početku Sadržaj (2 strane) i Oznake i skraćenice (3 strane).

U **Uvodu** je dat kratak istorijat istraživanja električnog proboja gasa, analiza primenjenih statističkih i numeričkih modela električnih proboja i relaksacije gasa nakon prekida pražnjenja i redosled izlaganja u disertaciji.

U **Glavi 2. Opis eksperimenta** su opisani uzorci cevi i komore na kojima su vršena merenja, vakuumski sistem, elektronski automatski sistem za merenje vremena kašnjenja električnog proboja i spektrometar za optička merenja. Izneti su osnovni podaci o vakuumskom sistemu i postupak pri radu. Data je blok šema elektronskog automatskog sistema za merenje vremena kašnjenja električnog proboja i primeri naponskog i strujnog impulsa izmerenih pomoću osciloskopa i visokonaponskih sondi. Prikazana je optička šema spektrometra sa optičkim kablom za spektroskopska merenja. Izneti su podaci o sastavu čelika analiziranih na kvantometru i navedene ostale primenjene metode: skenirajuća elektronska mikroskopija (SEM), energijska disperziona rendgenska spektroskopija (EDX) i mikroskopija međuatomske sile (AFM).

U **Glavi 3. Statističke metode i modeli kod električnih proboja gasova** na početku je izložen kratak istorijat istraživanja vremena kašnjenja električnog proboja gasova i definicije osnovnih veličina. Za opisivanje statističkog vremena kašnjenja proboja u literaturi se najčešće koriste raspodele zasnovane na Poasonovoj, odnosno ekspancijalnoj raspodeli za slučaj retkih događaja nastanka inicijalnih elektrona u međuelektrodnom prostoru gasnih cevi (malih elektronskih prinosa). U ovoj glavi je primenom Moavr-Laplasove teoreme dat prelaz sa binomne raspodele nastanka inicijalnih elektrona na Gausovu raspodelu statističkog vremena kašnjenja za slučaj velikih elektronskih prinosa. Na osnovu toga su za opisivanje statističkog vremena kašnjenja proboja primenjene Gausova, mešovita Gaus-ekspancijalna

i eksponencijalna raspodela koje su zasnovane na binomnoj raspodeli nastanka inicijalnih elektrona i određeni su parametri raspodela i odgovarajući elektronski prinosi. Sve navedene raspodele su dobijene eksperimentalno i modelovane primenom Monte Karlo simulacije.

Za poređenje Vejbulove raspodele (koja se često koristi u statistici električnih proboja) sa raspodelama zasnovanim na binomnoj raspodeli nastanka inicijalnih elektrona primenjen je Akaikeov informacioni kriterijum. Razmatrane su takođe, mešovite raspodele statističkog vremena kašnjenja koje ukazuju na postojanje dveju ili više čestica ili mehanizama koji dovode do električnog proboja. Mešovite raspodele su uopštene i izvedena je odgovarajuća relacija za elektronski prinos. Ovaj model je primenjen na Gaus-eksponencijalne raspodele dobijene u merenjima na gasnim cevima sa elektrodama od ugljeničnog čelika.

U cilju identifikovanja mehanizama koji dovode do uvećanog elektronskog prinosa i pojave ovih raspodela izvršeno je poređenje sa rezultatima dobijenim na uzorku sa elektrodama od nerđajućeg čelika. Primenom dvofaktorske analize disperzije zaključeno je da su površine elektroda uzrok njihove različite emisivnosti, pa je urađena analiza površina elektroda primenom skenirajuće elektronske mikroskopije (SEM), energijske disperzione rendgenske spektroskopije (EDX) i mikroskopije međuatomskih sila (AFM). Na SEM i AFM snimcima nađena je karakteristična granulasta struktura na površini katode od ugljeničnog čelika, dok je EDX pokazao postojanje kiseonika na površini. Nasuprot tome, elektrode od nerđajućeg čelika imaju relativno ravnu površinu bez granulastih struktura i na EDX spektru nije nađena linija kiseonika. Povećana emisivnost elektroda od ugljeničnog čelika nastaje kao posledica uvećane efektivne površine i oksida gvožđa na kome se mogu zadržati površinska naelektrisanja.

U ovoj glavi je takođe predložena nova metoda za pouzdano određivanje vremena formiranja pražnjenja. Meranjem velikog broja podataka u obliku serija, gde se minimalna vrednost iz svake serije uzima kao jedna vrednost vremena formiranja pražnjenja, dobijena je raspodela vremena formiranja pražnjenja. Vrednosti vremena formiranja pražnjenja dobijene na ovaj način su približno jednake minimalnim vrednostima vremena kašnjenja. Kada nije moguće primeniti metodu merenja velikog broja serija, može se koristiti aproksimacija minimalnim vrednostima vremena kašnjenja ili samo jednom minimalnom vrednošću ako se pre toga utvrdi da nije autlajer. U ovoj glavi je dat primer testiranja raspodele vremena kašnjenja na postojanje autlajera primenom modifikovanog Tompsonovog tau testa. Na osnovu analize naponske zavisnosti vremena formiranja pražnjenja koja je fitovana relacijom za slučaj elektronegativnih gasova, određen je koeficijent zahvata elektrona na molekulu kiseonika. Na osnovu merenja vremena formiranja pražnjenja predložena je novā metoda za određivanje brzine drifta dominantnog jona i naponske zavisnosti brzine drifta.

**U Glavi 4. Model stacionarnog stanja tinjavog pražnjenja u sintetičkom vazduhu** za izračunavanje inicijalnih profila koncentracija za modelovanje postpražnjenja primenjen je jednodimenzioni fluidni model. U njemu su uzeti u obzir čestice i procesi koji su relevantni za relaksaciju u vazduhu nakon prekida pražnjenja, kao i za uspostavljanje pražnjenja (elektroni i  $N_2^+$ ,  $O_2^+$ ,  $N_4^+$ ,  $O_4^+$  i  $O^-$  joni). Predloženi model je upoređen sa eksperimentom i zatim iskorišćen za proračun koncentracija elektrona i jona u stacionarnom stanju tinjavog pražnjenja. Parametri roja čestica, kao i koeficijenti brzina odgovarajućih procesa uzeti su kao funkcije redukovano polja. Prvo je prikazan jonizacioni član u elektronskoj i jonskoj jednačini, zatim koeficijenti difuzije i pokretljivosti, pa koeficijenti brzina procesa, i na kraju sekundarna elektronska emisija izazvana odgovarajućim jonima. Dobijeni profili koncentracija navedenih čestica su zatim iskorišćeni kao početne vrednosti u dvodimenzionom modelu za postpražnjenje.

**U Glavi 5. Modeli relaksacije u sintetičkom vazduhu** razmatrano je postpražnjenje u sintetičkom vazduhu primenom metode vremena kašnjenja proboja. Najpre je dat pregled merenja memorijskih krivih (zavisnost srednje vrednosti vremena kašnjenja proboja od vremena relaksacije  $\bar{t}_d(\tau)$ ) izmerenih pri različitim radnim naponima i strujama pražnjenja. Izabrana je reprezentativna memorijska kriva na kojoj je vršena analiza procesa u postpražnjenju, izmerena u intervalu vremena relaksacije od 1 ms do oko 15 minuta. Na memorijskoj krivoj su uočene tri karakteristične oblasti: prva, određena zaostalim jonima iz prethodnog pražnjenja, druga, određena zaostalim neutralnim aktivnim česticama i treća, saturaciona oblast izazvana kosmičkim zračenjem i prirodnom radioaktivnošću okoline.

Prva oblast memorijske krive u opsegu vremena relaksacije od oko 1 ms do 100 ms objašnjena je difuzionim gubicima dominantnih jona odgovornih za sekundarnu elektronsku emisiju i iniciranje električnog proboja. Tri nagiba uočena u polulogaritamskoj skali objašnjena su smenom režima difuzije, od režima bliskog ambipolarnom do režima slobodne jonske difuzije. Određeni efektivni koeficijenti difuzije u poređenju sa koeficijentima difuzije određenim drugim metodama pokazuju dobro slaganje. Na osnovu analize koeficijenata brzine reakcija i analize energija jona koji mogu da vrše sekundarnu elektronsku emisiju, zaključuje se da je dominantni jon u ovoj oblasti  $O_2^+$  jon. Usled izraženog gašenja metastabilnih stanja u sudarima sa atomima azota i kiseonika, kao i molekulima kiseonika, njihova koncentracija brzo opada, pa je zaključeno da je njihov uticaj u ovoj oblasti zanemarljiv. Za detaljnu analizu razvijen je 2D numerički model za relaksaciju u sintetičkom vazduhu. Model se sastoji iz difuzione jednačine za dominantne čestice, sa članom koji uključuje njihovu produkciju i gubitke. Sistem diferencijalnih jednačina je rešavan primenom metode konačnih razlika (metodom mreže). Primenjen je implicitni metod i dobijeni sistem običnih jednačina rešavan primenom SOR metode. U model su uključene dominantne čestice koje mogu da utiču na produkciju inicijalnih elektrona i to:  $N_2^+$ ,  $O_2^+$ ,  $N_4^+$ ,  $O_4^+$ ,  $O^-$ ,  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ ,  $N_2(a'^1\Sigma_u^-)$ ,  $N$  i  $O$  sa 25 procesa. Praćena je promena režima difuzije od blisko ambipolarnog, preko prelaznog do režima slobodne jonske difuzije i na osnovu promene koncentracije, izračunavan je efektivni elektronski prinos. Primenom temperaturene zavisnosti efektivnog koeficijenta difuzije od odnosa karakteristične difuzione dužine i Debajevog poluprečnika, fitovan je eksperimentalno određeni elektronski prinos u prelaznom režimu. Vremenska evolucija temperature elektrona tokom relaksacije je opisana dvoeksponencijalnom zavisnošću i određena je superelastičnim zagrevanjem elektrona u sudarima sa metastabilnim i vibraciono pobuđenim stanjima molekula azota.

U drugom delu memorijske krive uočene su dve karakteristične oblasti od oko 100 ms do 6 s i od 6 s do saturacione oblasti oko 1000 s. Na osnovu analitičkog modela zavisnost kvadratnog korena vremena kašnjenja proboja u funkciji vremena relaksacije linearizuje se u oblasti od 100 ms do oko 6 s, što ukazuje da je dominantni proces opadanja koncentracije aktivnih čestica drugog reda. Na osnovu analize energije rekombinacije utvđeno je da se radi o površinskoj rekombinaciji atoma azota na zidovima cevi i elektroda. Druga oblast od 6 s do saturacione oblasti oko 1000 s je linearna funkcija vremena relaksacije, što ukazuje na dominantni proces prvog reda. Za detaljnu analizu procesa razvijen je 2D numerički model za kasno postpražnjenje. Rešavanjem difuzione jednačine sa uključenim gubicima, testirane su sve moguće kombinacije procesa različitog reda. Zaključeno je da samo zbir procesa prvog i drugog reda površinske rekombinacije atoma azota na čeliku i drugog reda na borosilikatnom staklu može korektno da opiše eksperimentalne podatke i iz modela su određeni odgovarajući koeficijenti površinske rekombinacije.

Najvažniji rezultati ove disertacije su:

- uopštene su mešovite raspodele statističkog vremena kašnjenja i izveden je odgovarajući efektivni elektronski prinos;
- objašnjen je uzrok nastanka mešovitih raspodela u sintetičkom vazduhu sa elektrodama od ugljeničnog čelika;
- predložena je metoda za određivanje vremena formiranja pražnjenja na osnovu merenja velikog broja serija i metoda za određivanje brzine drifta jona na osnovu merenja vremena formiranja pražnjenja;
- analizirano je rano postpražnjenje u sintetičkom vazduhu i primenom analitičkog modela određeni su efektivni koeficijenti difuzije;
- razvijen je 2D numerički model za rano postpražnjenje i izračunata je vremenska evolucija koncentracija aktivnih čestica u postpražnjenju;
- analizirano je kasno postpražnjenje u sintetičkom vazduhu i primenom analitičkog modela određen je red dominantnog procesa površinske rekombinacije atoma azota i
- razvijen je 2D numerički model za kasno postpražnjenje, izračunata je vremenska evolucija koncentracija atoma azota u postpražnjenju i određeni koeficijenti površinske rekombinacije atoma azota na čeliku i borosilikatnom staklu.

Kandidat je objavio ukupno 6 radova u međunarodnim časopisima, 9 saopštenja na međunarodnim skupovima i 4 na nacionalnim. Deo rezultata iz ove teze je objavljen u tri rada u međunarodnim časopisima (1,2,5), 2 saopštenja na međunarodnim i 2 na nacionalnim konferencijama, a jedan rad je u recenziji.

#### ***Radovi objavljeni u međunarodnim časopisima kategorija M21, M22 i M23***

1. **Aleksandar P. Jovanović**, Marjan N. Stankov, Vidosav Lj. Marković and Suzana N. Stamenković, The validity of the one-dimensional fluid model of electrical breakdown in synthetic air at low pressure, *Europhys. Lett.* **104** (2013) 65001, **M21**
2. Vidosav Lj. Marković, **Aleksandar P. Jovanović**, Suzana N. Stamenković and Biljana Č. Popović, From binomial distribution of electron occurrence to Gauss and Gauss-exponential distribution of the statistical time delay: Analytical transition and simulations, *Europhys. Lett.* **100** (2012) 45002, **M21**
3. Suzana N. Stamenković, Saša R. Gocić, Vidosav Lj. Marković, and **Aleksandar P. Jovanović**, Multi-component non-stationary exponential distributions of the breakdown voltages and time delays in neon ramp breakdown experiments, *J. Appl. Phys.* **110** (2011) 103304, **M21**
4. Suzana N. Stamenković, Vidosav Lj. Marković, Saša R. Gocić, **Aleksandar P. Jovanović**, Influence of different cathode surfaces on the breakdown time delay in neon DC glow discharge, *Vacuum* **89** (2013) 62, **M22**
5. **Aleksandar P. Jovanović**, Biljana Č. Popović, Vidosav Lj. Marković, Suzana N. Stamenković and Marjan N. Stankov, Mixture distributions for the statistical time delay in synthetic air at low pressure, *Eur. Phys. J: Appl. Phys.* **67** (2014) 20801, **M23**
6. Marjan N. Stankov, Marko D. Petković, Vidosav Lj. Marković, Suzana N. Stamenković and **Aleksandar P. Jovanović**, Numerical Modelling of DC Argon Glow Discharge at Low Pressure Without and with Ar (P-3(2)) Metastable State, *Rom. J. Phys.* **59** (2014) 328, **M23**

Na osnovu izloženog, Komisija je donela sledeći

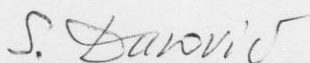
### Zaključak

Doktorska disertacija "**Električni proboji u vazduhu: novi eksperimenti i statistički i numerički modeli**" kandidata Aleksandra P. Jovanovića, istraživača-saradnika, predstavlja originalan naučni doprinos proučavanju električnih proboja u gasovima. Razvoj novih statističkih i numeričkih modela doprinosi boljem razumevanju fizičkih procesa u pražnjenju i postpražnjenju u vazduhu, pa Komisija predlaže Nastavno-naučnom veću Prirodno-matematičkog fakulteta u Nišu da prihvati ovaj izveštaj i odobri kandidatu javnu odbranu navedene doktorske disertacije.

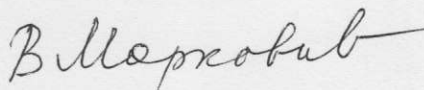
U Novom Sadu, Nišu i Beogradu,

30.10.2014.

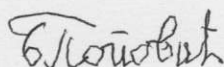
Komisija



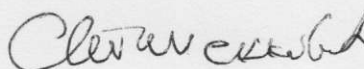
1. dr Stevica Đurović, redovni profesor  
PMF-a u Novom Sadu



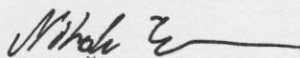
2. dr Vidosav Marković, redovni profesor  
PMF-a u Nišu (mentor)



3. dr Biljana Popović, redovni profesor  
PMF-a u Nišu



4. dr Suzana Stamenković, vanredni profesor  
PMF-a u Nišu



5. dr Nikola Šišović, docent  
Fizičkog fakulteta u Beogradu