

NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU

Predmet: Referat o urađenoj doktorskoj disertaciji kandidata Đorđa Lazarevića, dipl. el. inž.

Odlukom br. 5031/2007-3 od 11.06. 2013. godine, imenovani smo za članove Komisije za pregled, ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata Đorđa Lazarevića, dipl. el. inž. pod naslovom

„Radijaciona otpornost filmova indijum oksida u stanju izolatora sa Kuperovim parovima“.

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

REFERAT

1. UVOD

1.1. Hronologija odobravanja i izrade disertacije

Na sednici Komisije za treći stepen studija Elektrotehničkog fakulteta održanoj 06.10.2011. godine konstatovano je da je Đorđe Lazarević, dipl. el. inž. prijavio doktorsku disertaciju pod naslovom „Radijaciona otpornost filmova indijum oksida u stanju izolatora sa Kuperovim parovima“ i u skladu sa Statutom Elektrotehničkog fakulteta, Nastavno-naučnom veću Elektrotehničkog fakulteta je predložena Komisija za ocenu uslova i prihvatanje teme u sastavu: dr Predrag Osmokrović, red. prof. (Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu), dr Miloš Vujisić, doc. (Elektrotehnički fakultet u Beogradu), dr Aleksandra Vasić-Milovanović, vanr. prof. (Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu). Za mentora disertacije predložen je dr Predrag Osmokrović, red. prof. Na 739. sednici Nastavno-naučnog veća Elektrotehničkog fakulteta, održanoj 15.11.2011. godine, prihvaćen je predlog Komisije za treći stepen studija i potvrđena je predložena Komisija za ocenu uslova i prihvatanja teme, kao i predloženi mentor. Na osnovu izveštaja Komisije za ocenu uslova i prihvatanje teme i prateće dokumentacije doktorske disertacije „Radijaciona otpornost filmova indijum oksida u stanju izolatora sa Kuperovim parovima“ predložena tema je usvojena na 753. sednici Nastavno-naučnog veća Elektrotehničkog fakulteta, održanoj 25.09.2012 godine, a 22.10.2012. godine potvrđena je odlukom pod brojem 06-20782/41-12 od strane Veća naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu.

Na sednici Komisije za treći stepen studija održanoj 04.06. 2013. godine konstatovano je da je kandidat Đorđe Lazarević, dipl. el. inž. predao urađenu doktorsku disertaciju, pa je na osnovu uvida u disertaciju i pratećih dokumenata, a u skladu sa Statutom Elektrotehničkog fakulteta, Komisija za treći stepen studija potvrdila ispunjenost potrebnih uslova za podnošenje predloga Nastavno-naučnom veću Elektrotehničkog fakulteta za formiranje Komisije za pregled i ocenu doktorske disertacije. Komisija za treći stepen studija je predložila Nastavno-naučnom veću Elektrotehničkog fakulteta Komisiju za pregled i ocenu u sastavu: dr Predrag Osmokrović, red. prof. (Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu), dr Koviljka

Stanković, doc. (Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu), dr Aleksandra Vasić-Milovanović, red. prof. (Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu). Na 763. sednici Nastavno-naučnog veća Elektrotehničkog fakulteta, održanoj 11.06. 2013. godine, je ovaj predlog Komisije za treći stepen studija prihvaćen s tim što je Komisija za pregled i ocenu proširena sa dva člana: dr Nenad Cakić, van. prof. (Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu) i dr Miloš Vujisić, doc. (Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu).

1.2. Naučna oblast disertacije

Doktorska disertacija pod naslovom „Radijaciona otpornost filmova indijum oksida u stanju izolatora sa Kuperovim parovima“ pripada naučnoj oblasti elektrotehničkih materijala, pri čemu sadrži elemente iz oblasti fizike nuklearnog zračenja i metrologije. Mentor disertacije je dr Predrag Osmokrović, red. prof. Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu koji se više od 30 godina aktivno bavi naučnoistraživačkim i nastavnim radom u oblastima elektrotehničkih materijala, nuklearne tehnike i metrologije. Do sada je objavio 125 radova u časopisima sa SCI liste.

1.3. Biografski podaci o kandidatu

Dorđe Lazarević rođen je 16.09.1980. godine u Beogradu. Osnovne i diplomske akademske studije završio je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu 2006. godine na odseku fizičke elektronike, smeru za nuklearnu i medicinsku tehniku. Školske 2007/2008. godine upisan je na doktorske studije Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu na modulu za nuklearnu, medicinsku i ekološku tehniku i u roku je ispunio sve obaveze predviđene planom i programom studija.

2. OPIS DISERTACIJE

2.1. Sadržaj disertacije

Doktorska disertacija Đorđa Lazarevića, dipl. el. inž. pod naslovom „Radijaciona otpornost filmova indijum oksida u stanju izolatora sa Kuperovim parovima“ napisana je na 135 strana latiničnim pismom, pri čemu sadrži spisak literature sa 109 referenci; podeljena je na osam poglavlja. Poglavlja doktorske disertacije su: 1. Uvod; 2. Struktura materije; 3. Izolatorski materijali; 4. Interakcija zračenja sa materijalima; 5. Numerička simulacija transporta čestica zračenja kroz indijum oksid filmove u stanju izolatora sa Kuperovim parovima; 6. Rezultati numeričkih simulacija transporta zračenja kroz indijum oksid filmove; 7. Analiza efekata zračenja u filmovima indijum oksida; 8. Zaključak.

2.2. Kratak prikaz pojedinačnih poglavlja

U uvodu rada definisan problem potrebe ispitivanja efekata zračenja na savremene elektronske komponente koji pod određenim uslovima prelaze u stanje izolatora, definisan je cilj rada i metodologija, odnosno polazne hipoteze koje omogućavaju da se postavljeni cilj ostvari. U drugom poglavlju, Struktura materije, prikazane su osnovne osobine materije. Drugo poglavlje podeljeno je na sledeća potpoglavlja: Opšte osobine atoma i atomske strukture; Kvantnomehanički atomski model; Hemijske osobine atoma. U trećem poglavlju, Izolatorski materijali, dat je opis karakteristika dielektričnih materijala i izolatora sa Kuperovim parovima. Treće poglavlje podeljeno je na sledeća potpoglavlja: Osobine izolatorskih materijala: Energetski procep, Specifična električna otpornost i električna susceptibilnost, Podela električnih materijala; Osobine dielektričnih materijala i dielektrični

materijali: Relativna dielektrična konstanta, Kompleksna dielektrična permitivnost, Faktor dielektričnih gubitaka, Specifična električna otpornost, Dielektrična čvrstoća, Podela dielektričnih materijala; Izolatori sa Kuperovim parovima: Superprovodnost, Kuperovi parovi, Džozefsonov efekat i spoj, Indijum oksid (InO) u stanju izolatora sa Kuperovim parovima – struktura i osobine. U četvrtom poglavlju, Interakcija zračenja sa materijalima, razmatrani su vrste efekata koju nastaju prolaskom korpuskularnog i talasnog zračenja kroz materijale u zavisnosti od energije upadnog snopa sa posebnim osvrtom na radijaciona oštećenja u izolatorima. Četvrto poglavlje podeljeno je na sledeća potpoglavlja: Prolaz čestičnog zračenja kroz materijal: Efikasni presek, Gubitak energije naelektrisanih čestica u sudarima, Gubitak energije naelektrisanih čestica na radijacije; Prolaz elektromagnetnog zračenja kroz materijal: Fotoelektrični efekat, Komptonovo rasejanje, Proizvodnja parova, Tomsonovo rasejanje, Rejlejevo rasejanje i nuklearni fotoefekt; Dozimetrija jonizujućeg zračenja; Teorija radijacionih efekata u izolatorima: Zapreminska radijaciona oštećenja u izolatorima. U petom poglavlju, Numerička simulacija transporta čestica zračenja kroz indijum oksid filmove u stanju izolatora sa Kuperovim parovima, razmatrane su Monte Carlo metode za uzorkovanje slučajnih veličina korišćene za kompjuterske simulacije prolaska zračenja kroz materijale. Peto poglavlje podeljeno je na sledeća potpoglavlja: Osnovne postavke Monte Carlo metoda; Uzorkovanje slučajnih veličina: Metod inverzne funkcije, Metod odbacivanja, Metod supstitucije, Metod stacionarnih raspodela lanaca Markov-a, Algoritmi za generisanje slučajnih veličina. U šestom poglavlju, Rezultati numeričkih simulacija transporta zračenja kroz indijum oksid filmove, prikazani su postignuti rezultati za efekte interakcije zračenja sa tankim filmovima indijum oksida u TRIM modulu programskog paketa SRIM. Ovim programom dosadašnji rezultati su pokazali značajnu usalašenost sa rezultatima postignutim realnim eksperimentima. Takođe, programom je omogućena pretpostavka da je materijal na nultoj temperaturi pre izlaganja, odnosno u stanju izolatora sa Kuperovim parovima. Dobijeni rezultati simulacijom prikazani su grafički i to za: raspodele procesa nastalih jonizacijom (srazmerno razdvajanjima Kuperovih parova), fononskim pobuđivanjem i izmeštanjem atoma, kao i tragovi upadnih jona i izmeštenih atoma u filmovima indijum oksida. U sedmom poglavlju, Analiza efekata zračenja u filmovima indijum oksida, diskutovani su dobijeni rezultati simulacijom i njihova povezanost sa teorijskim očekivanjima u skladu sa prethodno iznesenim razmatranjima. Konstatovano je da na radijacionu kompatibilnost izolatora sa Kuperovim parovima pri njegovom izlaganju multidirekcionom polju zračenja značajan uticaj bi mogla imati podloga na kojoj je izrađen film indijum oksida, kao i slojevi koji bi ga okruživali. U osmom poglavlju, Zaključak, zaključeno je da indijum oksid filmovi nanometarskih debljina u stanju izolatora sa Kuperovim parovima su generalno imuni na prolaz visokoenergetskog jonizujućeg zračenja, ali da zračenje može da dovede do značajnog raskidanja Kuperovih parova. A zbog disocijacije većeg broja Kuperovih parova može doći do razrušavanja fazne koherencije njihovih talasnih funkcija, koja se uspostavlja u celom uzorku materijala, i tako otkloni osnovni uslov za postojanje ovog stanja. Raskidanje Kuperovih parova predstavlja prolazni radijacioni efekat, jer se očekuje da po prestanku dejstva zračenja izolatorska faza može ponovo spontano da se uspostavi, pod pretpostavkom da ostali uslovi ostaju nepromenjeni.

3. OCENA DISERTACIJE

3.1. Savremenost i originalnost

Kada se na film indijum oksida primeni spoljašnji napon, pored grupisanosti Kuperovih parova unutar ostrva i lokalne fazne koherencije njihovih talasnih funkcija, dolazi i do sinhronizacije faza talasnih funkcija svih Kuperovih parova u 2D nizu Džozefsonovih spojeva,

putem koje se uspostavlja stanje kolektivnog provođenja struje. U ovom stanju opšte fazne sinhronizacije, transport nosilaca naelektrisanja se odvija putem simultane termičke aktivacije Kuperovih parova duž čitavog niza. Struju čine aktivirani Kuperovi parovi koji tuneluju kroz potencijalne barijere Džozefsonovih spojeva.

Strujno-naponska karakteristika indijum oksida u stanju izolatora sa Kuperovim parovima ima eksponencijalni oblik. Kao parametar u strujno-naponskoj zavisnosti pojavljuje se kolektivna kulonovska barijera niza, koja je određena energijom naelektrisanja spojeva i odnosom dimenzije jednog Džozefsonovog spoja prema veličini čitavog niza.

U radu je primenom Monte Carlo simulacije transporta zračenja kroz filmove indijum oksida analizirana promena u njima izazvana zračenjem. Ispitani su uslovi neophodni za opstajanje ovog specifičnog stanja izolatora sa Kuperovim parovima, s obzirom na činjenicu da u interakcijama Kuperovih parova sa upadnim zračenjem i jonima uzmaklim unutar InO filмова, dolazi do razrušavanja izolacione strukture. Joni izmešteni u direktnim interakcijama sa upadnim zračenjem, ili u kaskadama koje ih prate, obrazuju prostorno naelektrisanje unutar materijala. Ovo prostorno naelektrisanje preferencijalno se javlja u oblastima normalnog materijala, između superprovodnih ostrva u granulanoj strukturi. Ono utiče na energiju naelektrisanja Džozefsonovih spojeva, a time i na kolektivnu kulonovsku barijeru niza, što dovodi do upadljivih promena u strujno-naponskoj karakteristici. Osobine filмова InO u stanju izolatora sa Kuperovim parovima opisane su modelom dvodimenzionalnog niza Džozefsonovih spojeva. Simulacije su izvedene za više filмова InO različitih debljina, kao i za snopove zračenja različitih jona, energija i fluensa.

Rezultati prikazani u radu predstavljaju značajan doprinos primene savremenih materijala u elektronskim komponentama u uslovima izloženosti zračenju. Postignuti rezultati pokazuju da na radijacionu kompatibilnost izolatora sa Kuperovim parovima pri njegovom izlaganju multidirekcionom polju zračenja značajan uticaj bi mogla imati podloga na kojoj je izrađen film InO, kao i slojevi koji bi ga okruživali. Doktorska disertacija pored pomenutog teoretskog doprinosa ima i praktičan značaj pošto je pokazano da osetljivost filma u stanju izolatora sa Kuperovim parovima na uticaj zračenja se smanjuje sa smanjivanjem debljine filma. Rezultati prikazani u doktorskoj disertaciji pod naslovom „Radijaciona otpornost filмова indijum oksida u stanju izolatora sa Kuperovim parovima“ omogućavaju realno sagledavanje ponašanja filмова indijum oksida u stanju izolatora sa Kuperovim parovima u različitim radijacionim sredinama, za različite doze i fluense, kao i pojava pojedinih radijacionih efekata u filmovima predviđenih teorijskim modelom. Ovo je od posebne važnosti u savremenim uslovima povećane elektromagnetne kontaminiranosti životne sredine i sve većeg trenda ka minijaturizaciji elektronskih komponentata.

3.2. Osvrt na referentnu i korišćenu literaturu

Literatura korišćena u radu je pažljivo odabrana. Ona sadrži najnovije radove relevantne za problematiku disertacije, ali sadrži i klasične radove. U navedenim referencama se nalaze i naučnih radovi, čije je autor, odnosno koautor, Đorđe Lazarević.

3.3. Opis i adekvatnost primenjenih naučnih metoda

U disertaciji pod naslovom „Radijaciona otpornost filмова indijum oksida u stanju izolatora sa Kuperovim parovima“ primenjene su teoretske, eksperimentalne, matematičke i numeričke metode što ujedno predstavlja sve metode koje se koriste u inženjerskoj i naučnoj praksi. Tokom izrade rada su korišćene sve metode karakteristične za naučno-istraživački rad u oblasti tehničkih nauka. Pored teoretskih tumačenja formiranja eksperimentalnog postupka korišćene su i odgovarajuće statističke i numeričke metode za obradu eksperimentalno

dobijenih rezultata svake serije merenja interakcije čestičnog i elektromagnetnog zračenja sa tankim filmovima indijum oksida.

3.4. Primenljivost ostvarenih rezultata

Kao što je već napomenuto pored naučnih doprinosa tumačenja dejstva jonizujućeg zračenja na karakteristike tankih filmova u stanju izolatora sa Kuperovim parovima, primenom Monte Carlo simulacije transporta zračenja kroz ove filmove rad Đorđa Lazarevića pod naslovom „Radijaciona otpornost filmova indijum oksida u stanju izolatora sa Kuperovim parovima“ je značajan oblast tehnologije izrade integrisanih komponenti: od dielektrika gejtova u MOS tehnologiji, preko vertikalne separacije susednih elemenata, izolacije poluprovodničkih i provodnih slojeva u planarnim kolima, do pasivizacije celokupnih kola. Na osnovu prikazanih rezultata u doktorskoj disertaciji Đorđa Lazarevića moguće je rešiti pitanje povezano sa primenom savremenih izolatorskih materijala tj. njihovih primena u uslovima izloženosti zračenju, kao i problem izbora debljine materijala za deponovanje slojeva oko indijum oksid filmova za njegovo radijaciono očvršćavanje.

3.5. Ocena dostignutih sposobnosti kandidata za samostalni naučni rad

Kandidat Đorđe Lazarević je u najvećoj meri samostalno uradio izloženu disertaciju. On je na osnovu praćenja stručne literature i sagledavanju, u praksi prisutne, potrebe za minijaturizacijom i većom gustinom pakovanja savremenih elektronskih komponenti, izradom pouzdanijih izolatorskih materijala izvršio sveobuhvatnu analizu dejstva jonizujućeg zračenja na tanke filmove indijum oksida u stanju izolatora sa Kuperovim parovima.

4. OSTVARENI NAUČNI DOPRINOS

4.1. Prikaz ostvarenih naučnih doprinosa

Osnovni naučni doprinosi rada su:

- Pokazano je da se prolaskom zračenja kroz tanke filmove indijum oksida u stanju izolatora sa Kuperovim parovima za određene energetske opsege, flunse i vrste jona u njima odigrava niz procesa sa znatnim uticajem na električne osobine. Izmeštanja u direktnim interakcijama sa upadnim zračenjem stvara se prostorno naelektrisanje unutar materijala;
- Pokazano je da prostorno naelektrisanje uglavnom nastaje između superprovodnih ostrva u granularnoj strukturi i utiče na energiju naelektrisavanja Džozefsonovih spojeva, a time i na kolektivnu kulonovsku barijeru niza, što dovodi do narušavanja stanja izolatora sa Kuperovim parovima;
- Pokazano je da su filmovi indijum oksida u stanju izolatora sa Kuperovim parovima nanometarskih debljina generalno imuni na prolaz visokoenergetskog jonizujućeg zračenja i da raskidanje Kuperovih parova predstavlja prolazni radijacioni efekat, odnosno da se po prestanku dejstva zračenja očekuje da se spontano uspostavi izolatorska faza ponovo.

4.2. Kritička analiza rezultata istraživanja

Sagledavanjem postavljenih hipoteza, ciljeva istraživanja i dobijenih rezultata konstatujemo da je kandidat uspešno odgovorio na sva bitna pitanja i dileme koje suštinski proizilaze iz

obrađivane problematike. Razvijeni matematički i numerički algoritmi, kao i dobijeni rezultati, predstavljaju značajan naučni i stručni doprinos.

4.3. Verifikacija naučnih doprinosa

Kandidat Đorđe Lazarević u svojstvu autora i koautora do sada je objavio sledeće radove:

Kategorija M21:

Lj. Timotijević, I. Fetahović, **Dj. Lazarević** and M. Vujisić, Simulation of Proton Beam Effects in Thin Insulating Films, *International Journal of Photoenergy*, Vol. 2013, article ID 128410 [ISSN 1110-662X] [IF: 2.663].

S. Milosavljević, **Dj. Lazarević**, K.a Stanković, M. Pejović, M. Vujisić, Effects of Ion Beam Irradiation on Nanoscale InOx Cooper-Pair Insulators, *International Journal of Photoenergy*, Vol. 2013, article ID 236823 [ISSN 1110-662X] [IF: 2.663].

Kategorija M22:

Đ. Lazarević, M. Vujisić, K. Stanković, E. Dolićanin, P. Osmokrović, Radiation hardness of indium oxide films in the cooper-pair insulator state, *Nuclear Technology and Radiation Protection*, Vol. 27 (2012), pp. 40-43 [ISSN 1451-3994], [IF: 1.159].

D. Nikolić, A. Vasić, **Đ. Lazarević**, M. Obrenović, Improvement possibilities of the I-V characteristics of PIN photodiodes damaged by gamma radiation, *Nuclear Technology and Radiation Protection*, Vol. 28 (2013), pp. 84-91 [ISSN 1451-3994], [IF: 1.159].

M. Pejović, S. Pejović, E. Dolicanin, **Dj. Lazarević**, Gamma-Ray Irradiation and Post-Irradiation at Room and Elevated Temperature Response of Pmos Dosimeters with Thick Gate Oxides, *Nuclear Technology and Radiation Protection*, Vol. 26 (2011) pp. 261-265, [ISSN: 1451-3994], [IF: 1.159].

S. Pantelić, N. Borna, M. Srećković, A. Kovačević, A. Bugarinović, M. Kovačević, **Dj. Lazarević**, Influence of nuclear radiation and laser beams on optical fibers and components, *Nuclear Technology and Radiation Protection*, Vol. 26 (2011) pp. 32-38, [ISSN: 1451-3994], [IF: 1.159].

O. Ciraj-Bjelac, M. Kovacević, D. Kosutić, D. Arandjić, **Dj. Lazarević**, A radiological incident with a radioactive lightning rod source found in a vehicle used by film crewmembers: a case study. *Radiation Protection Dosimetry*, Volume: 141 (2010), Issue: 3, Pages: 309-314, [ISSN: 0144-8420], [IF: 0.913].

Kategorija M23:

Petrović N., Krestić-Vesović J., Stojanović D., Ciraj-Bjelac O., **Lazarević Dj.**, Kovacević M., Contribution of activation products to occupational exposure following treatment using high-energy photons in radiotherapy, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 143(1) (2011), Pages: 109-112, [ISSN: 0144-8420], [IF = 0.822].

Kategorija M33:

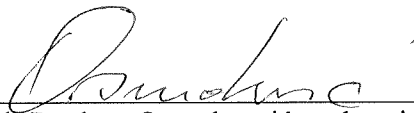
Dj. Lazarević, E. Dolićanin, B. Irićanin, M. Vujisić, and K. Stanković, Radiation Effects in Cooper Pair Insulating Thin Films, Progress In Electromagnetics Research Symposium PIERS 2012, Proceedings, pp. 1165-1168.

5. ZAKLJUČAK I PREDLOG

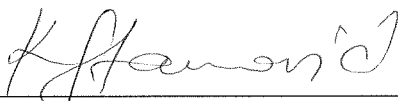
Doktorska disertacija kandidata Đorđa Lazarevića, pod naslovom „Radijaciona otpornost filmova indijum oksida u stanju izolatora sa Kuperovim parovima“ predstavlja savremen i originalan naučni doprinos kroz sveobuhvatno sagledavanje primene savremenih materijala u elektronskim komponentama u uslovima izloženosti zračenju. Ocenjući doktorsku disertaciju, kao i činjenicu da je analizirana problematika veoma aktuelna i savremena sa aspekta naučnog i stručnog doprinosa, verifikovana objavljivanjem rezultata u časopisu sa SCI liste, a i podatak da su najvažniji rezultati dobijeni samostalnim radom, Komisija konstatuje da je kandidat Đorđe Lazarević ispunio sve uslove predviđene Zakonom o visokom obrazovanju i Statutom Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, te, sa zadovoljstvom, predlaže Nastavno-naučnom veću Elektrotehničkog fakulteta da ovaj Izveštaj prihvati, i u skladu sa zakonskom procedurom i normativnim aktima Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, izloži na uvid javnosti i uputi na konačno usvajanje i davanje odobrenja kandidatu da pristupi usmenoj odbrani Veću naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu.

U Beogradu,
03.07.2013. godine


ČLANOVI KOMISIJE



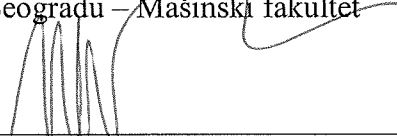
dr Predrag Osmokrović, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet



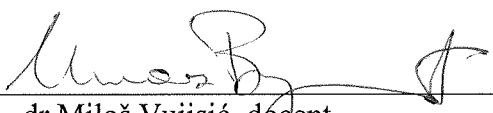
dr Kovička Stanković, docent
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet



dr Aleksandra Vasić-Milovanović, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet



dr Nenad Čakić, vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet



dr Miloš Vujisić, docent
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet