

# Uticaj jonizujućeg zračenja na karakteristike gasnih odvodnika prenapona

<sup>a,\*</sup> Uzahir R. Ramadani, <sup>a</sup> Dušan P. Nikezić, <sup>b</sup> Alija Jusić, <sup>a</sup> Ivan Lazović, <sup>a</sup> Nikola Mirkov

<sup>a</sup>Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke "Vinča", Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju

<sup>b</sup>JP Elektroprivreda BiH d.d.-Sarajevo, Bosna i Hercegovina

**Sažetak**—U radu se ispituje efekat neutronske i gama zračenja na komercijalne gasne odvodnike prenapona. Rad je eksperimentalno-teoretske prirode. Eksperimentalni deo rada je vršen pod dobro kontrolisanim laboratorijskim uslovima. Kombinovana merna nesigurnost je bila oko 5 %. Eksperimentalni sistem je specijalno koncipiran za posmatranu problematiku i ima određena originalna rešenja. Postupak ispitivanja je bio potpuno automatizovan i imao je softversku podršku u upravljanju eksperimentom kao i za prikupljanje i statističku obradu podataka. Dobijeni rezultati pokazuju da neutronske i gama zračenje popravljaju funkcionalne karakteristike gasnih odvodnika prenapona uz memorijski efekat. Dobijeni rezultati su objašnjeni u skladu sa teorijom interakcije neutronske i gama polja sa materijalom kao i sa teorijom električnog pražnjenja u gasovima. Rezultati prikazani u radu su od važnosti za projektovanje zaštite od prenapona u sistemima koji se mogu naći u polju neutronske i gama zračenja jer mogu da postignu pozitivan sinergetski efekat zaštite u hibridnim šemama sa drugim komponentama za zaštitu od prenapona čije karakteristike ovo zračenje kvira.

**Glavne reči**—gasni odvodnici prenapona, neutronske i gama zračenje, memorijski efekat

## I. UVOD

Minijaturizacija elektronskih komponenti u velikoj meri smanjuje njihovu otpornost na prenaponske pojave. Prenaponske pojave nastaju direktno kao posledica komutacionih procesa unutar mreže na kojoj su uređaji, ili indirektno kao posledica interakcije žičane strukture uređaja sa elektromagnetnim impulsima. Mogući izvori tranzijentnih elektromagnetnih pojava su impulsi prenapona na vodovima, atmosfersko pražnjenje, radarski impulsi i nuklearna eksplozija. U slučaju da prenaponska zaštita uređaja nije dovoljno efikasna prenaponske pojave mogu izazvati oštećenje elektronskih elemenata, sklopova i čitavog uređaja dovodeći do njegovog delimičnog ili potpunog uništenja. Tranzijentni prenaponi, takođe mogu prouzrokovati i prolazne poremećaje u funkcionisanju uređaja [1]–[3].

Uzahir R. Ramadani, Institut za nuklearne nauke "Vinča", Univerzitet u Beogradu, Republika Srbija(email: uza-hir@vin.bg.ac.rs)(<https://orcid.org/0000-0002-3702-0094>)

Dušan P. Nikezić, Institut za nuklearne nauke "Vinča", Univerzitet u Beogradu, Republika Srbija, (e-mail: dusan@vin.bg.ac.rs),(<https://orcid.org/0000-0002-8885-2683>)

Alija Jusić, JP Elektroprivreda BiH d.d.-Sarajevo, Bosna i Hercegovina  
Ivan Lazović, Institut za nuklearne nauke "Vinča", Univerzitet u Beogradu, Republika Srbija, (e-mail: ivan.lazovic@vin.bg.ac.rs)(<https://orcid.org/0000-0002-3877-5157>)

Nikola Mirkov, Institut za nuklearne nauke "Vinča", Univerzitet u Beogradu, Republika Srbija, (nmirkov@vin.bg.ac.rs)(<https://orcid.org/0000-0002-3057-9784>)

Efekti uništenja uglavnom su vezani za poluprovodničke komponente, premda oštećenja izolacije mogu biti izazvana i na drugim komponentama. Poluprovodničke komponente velike snage vezane na linije napajanja, odnosno energetske vodove, mogu biti izložene delovanju visokih vrednosti tranzijentnih prenapona i stoga vrlo ugrožene. Poluprovodničke komponente u niskonaponskim signalima i kontrolnim kolima indirektno su spregnute sa linijom napajanja, ali mogu biti podložne uništenju zbog relativno malog dozvoljenog strujnog i naponskog opsega. Usled visokofrekventnih komponenti tranzijentnog prenapona može takođe da dođe do uništenja poluprovodničkih komponenti u visokonaponskoj oblasti [4]–[6]. Uništenje poluprovodničkih komponenta usled uticaja visokofrekventnih elektromagnetnih polja je dobila na aktuelnosti usled povećane elektromagnetne kontaminiranosti urbanih sredina [7], [8].

Najrazličitiji poremećaji rada elektronskih uređaja mogu biti izazvani generisanjem tranzijenata u niskonaponskim vodovima. Poremećaji funkcionisanja, u slučaju uređaja za automatsku kontrolu i regulaciju mogu prouzrokovati katastrofalne posledice po kontrolisani objekat. Ipak, većina prolaznih poremećaja funkcionisanja uređaja ne moraju bitno ugroziti njegovo funkcionisanje [9], [10].

Sa aspekta posledica uništenje elektronskih komponenti ili prolazni poremećaji rada su najkritičniji u slučaju da ta elektronska komponenta funkcioniše u okruženju bogatom poljima jonizujućim zračenjem. To je jasno pošto opasnost od jonizujućeg zračenja postoji u nuklearnim energetskim postrojenjima, instrumentima nuklearne medicine, visoko letećim avionima i kosmičkim sistemima. Iz tog razloga je cilj ovog rada da se ispita uticaj neutronske i gama zračenja na pouzdanost gasnog odvodnika prenapona, komponente koja je nezamenjiva u zaštiti od prenapona na niskonaponskom nivou [11], [12].

## A. PRENAPONSKA ZAŠTITA

Elementi prenaponske zaštite mogu se podeliti na nelinearne i linearne. U nelinearne elemente prenaponske zaštite spadaju različite vrste zaštitnih odvodnika prenapona (gasni odvodnici prenapona, varistori i prenaponske diode). U linearne elemente prenaponske zaštite spadaju različite vrste električnih filtera [13]–[15]. U praksi se često koristi

kombinacija ovih elemenata, zbog činjenice da većina komercijalnih filtera nije predviđena za korišćenje protiv smetnji koje dostižu nekoliko hiljada volti. Osim toga vrlo je teško obezbediti potreban nivo zaštite uz upotrebu samog filtera [16]. Zaštitni odvodnici sami za sebe imaju nekih nedostataka u slučaju kada je potrebno garantovati zaštitu posebno osetljivih poluprovodničkih elektronskih komponenti.

Kao što je rečeno cilj ovog rada je da se ispita uticaj neutronske i gama zračenja na gasne odvodnike prenapona.

### B. GASNI ODVODNICI PRENAPONA

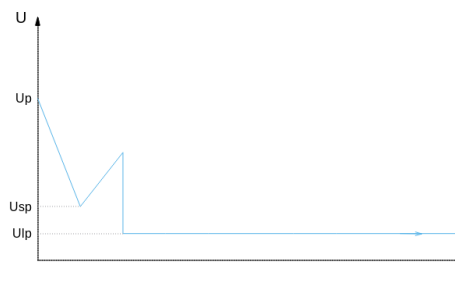
Gasni odvodnici prenapona odlikuju se visokom pouzdanošću i efikasnošću, a koriste se isključivo za prenaponsku zaštitu. Rade na principu električnog proboja gasova i mogu se koristiti za zaštitu od prenapona amplitude od nekoliko desetina do nekoliko hiljada volti [17].

U pogledu energetske izdržljivosti gasni odvodnici prenapona su najizdržljiviji, a u pogledu cene najjeftiniji elementi za zaštitu od prenapona. Prednosti gasnih odvodnika prenapona nad ostalim elementima za zaštitu od prenapona su mogućnost provođenja velikih struja (do 60 kA) i niska sopstvena kapacitivnosti (reda veličine 1 pF, što ih čini pogodnim za primenu u oblasti visokih frekvencija) [17], [18]. Gasni odvodnik prenapona se sastoji od dve identične elektrode zatupljene u keramičko (ili stakleno) kućište. Međuelektrodno rastojanje je reda veličine 1 mm. Na unutrašnji zid kućišta se, u nekim slučajevima, nanosi radioaktivni izvor da bi se povećala brzina odziva [18]–[20]. Izolacioni gas je neki od plemenitih gasova (u literaturi se za gasni odvodnik prenapona sreće i naziv „osigurač sa plemenitim gasom“) ili smeša plemenitih gasova na pritisku od 1 kPa do 100 kPa. Na slici 1 data je tipična strujno-naponska karakteristika gasnog odvodnika prenapona.

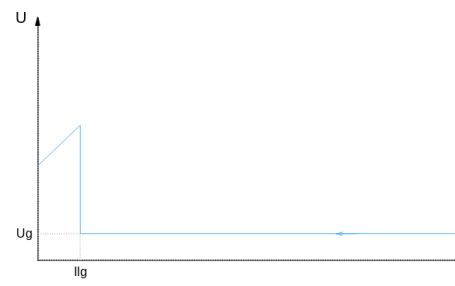
Funkcionisanje gasnog odvodnika prenapona zasniva se na Ta-uzendovom mehanizmu proboja gasa [21]–[23]. Važna karakteristika gasnog odvodnika prenapona je takozvana Pašenova kriva, tj. zavisnost probojnog napona od proizvoda pritiska i međuelektrodnog rastojanja. Pašenova kriva ima oblik asimetrične U-krive. Vršena su istraživanja da se promenom parametara izolacije (materijala elektroda, oblika elektroda, obradom elektrodne površine, ...) Pašenova kriva prilagodi potrebama. Takođe su vršena ispitivanja da se varijacijom parametara izolacije povećava brzina odziva gasnog odvodnika u cilju izbegavanja primene radioaktivnog izvora pri izradi odvodnika [24], [25]. Sama brzina odziva se karakteriše impulsnom karakteristikom, tj. naponsko-vremenskom karakteristikom. Pokazuje se da naponsko-vremenska kriva naglo raste pri brzim impulsnim naponima i to je osnovni nedostatak gasnog odvodnika, tj. gasni odvodnik sporo reaguje.

## II. EKSPERIMENT

Ispitivanje uticaja jonizujućeg zračenja na karakteristike gasnih odvodnika prenapona vršeno je na komercijalnim. Ispitivan je komercijalni gasni odvodnik nominalnog napona 470 V punjen gasom He [26], [27]. Impulsne karakteristike



(a)



(b)

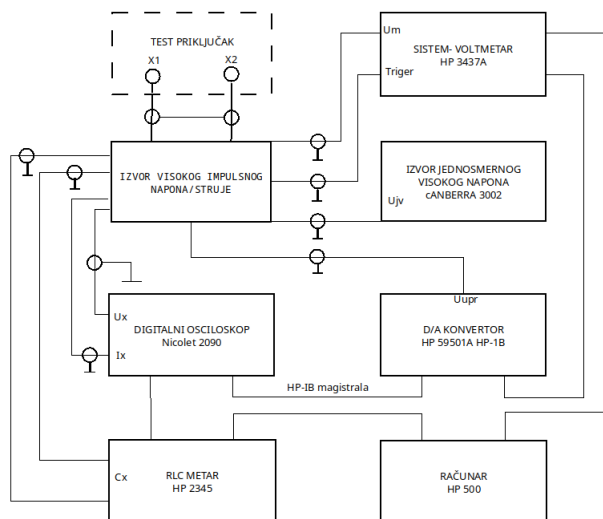
Slika 1: Tipične strujno-naponske karakteristike gasnog odvodnika prenapona

su računane na osnovu zakona o konstantnosti površine u volt sekundnoj ravni ispod impulsnog napona i konstantnog nominalnog napona. Za potrebu proračuna impulsnih karakteristika razvijen je namenski softver [28], [29].

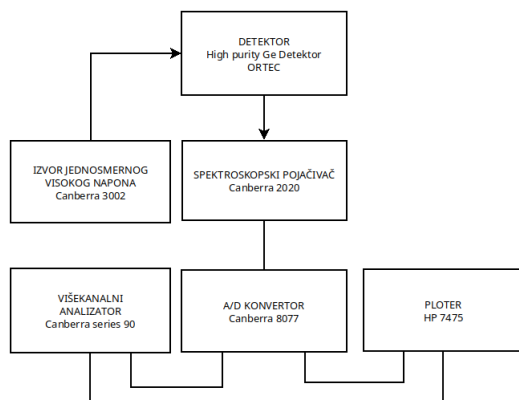
Za eksperiment je korišćena visokokvalitetna oprema. Radi eliminacije uticaja elektromagnetnih smetnji na elektronskim aparatima ispitni i merni deo opreme su bili odvojeni profesionalnom mernom kabinom zaštite od električnog polja većom od 100 dB i zaštitom od magnetnog polja većom od 40 dB. Veze između ispitnog i mernog dela je bila negalvanska [30], [31]. Merni sistem je bio u potpunosti automatizovan. Na slici 2 prikazana je blok šema mernog kruga. Kao impulsni napon korišćen je duploeksponecijalni napon oblika 8/20 ms.

Za ispitivanje efekta neutronske i gama zračenja na gasni krug korišćen je izotop kalifornijuma  $^{252}\text{Cf}$ . Neutronske spektra kalifornijuma ima maksimum pri energijama od oko 0.8 MeV, a maksimalna energija neutrona je 20 MeV. Analiza spektra izvora vršena je aparaturom čija je blok šema data na slici 3. ORTEC germanijumski detektor bio je hlađen tečnim azotom.

Merenje uticaja neutronske i gama zračenja vršeno je tako što su određivane impulsne karakteristike i histogrami slučajnih promenljivih jednosmerni probojni napon i impulsni probojni napon pre ozračenja, tokom zračenja i



Slika 2: Blok šema mernog sistema



Slika 3: Blok šema aparature za analizu spektra zračenja

nakon ozračenja. Merenja nakon ozračenja su vršena sa vremenskim pauzama da se utvrdi da li postoji indukovani efekat neutronskog zračenja. Za određivanje jedne vrednosti jednosmernog probojnog napona vršeno je merenje 100 uzastopnih vrednosti jednosmernog probojnog napona (primenom jednosmernog izvora napona brzine porasta 8 V/s). Za određivanje jedne vrednosti impulsnog probojnog napona vršeno je merenje 100 uzastopnih vrednosti impulsnog probojnog napona (primenom impulsnog napona brzine porasta 8/20 ms). Pauza između dva uzastopna proboja bila je jedan minut.

Kombinovana merna nesigurnost eksperimentalnog postupka je bila oko 5 % [30], [31].

### III. REZULTATI I DISKUSIJA

Na slici 4 prikazane su hronološke vrednosti slučajne promenljive jednosmerni probojni napon gasnog odvodnika: a) pre stavljanja u polje neutronskog i gama zračenja; b) za vreme boravka u polju neutronskog i gama zračenja (fluksa neutronske komponente  $16.244 \cdot 10^{11}$  n/cm<sup>2</sup>); c) hiljadu

sekundi nakon prestanka dejstva polja zračenja; d) 100 000 s nakon prestanka dejstva polja zračenja.

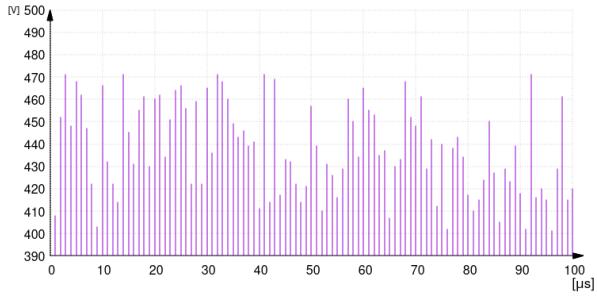
Na slici 5 prikazane su hronološke vrednosti slučajne promenljive impulsn probojni napon gasnog odvodnika: a) pre stavljanja u polje neutronskog i gama zračenja; b) za vreme boravka u polju neutronskog i gama zračenja (fluksa neutronske komponente  $16.244 \cdot 10^{11}$  n/cm<sup>2</sup>); c) hiljadu sekundi nakon prestanka dejstva polja zračenja; d) 100 000 s nakon prestanka dejstva polja zračenja.

Na osnovu slika 4 i 5 se vidi da neutronsko i gama zračenje smanjuje rasipanje slučajnih promenljivih jednosmerni probojni napon i naizmenični probojni napon. Interesantno da se ova pojava održava i nakon dejstva polja zračenja ali ograničeno vreme. Naime, nakon 100 000 s od dejstva polja zračenja hronološki niz vrednosti slučajnih promenljivih statički probojni napon i impulsn probojni napon imaju sličan izgled kao u slučaju neozračenog gasnog odvodnika.

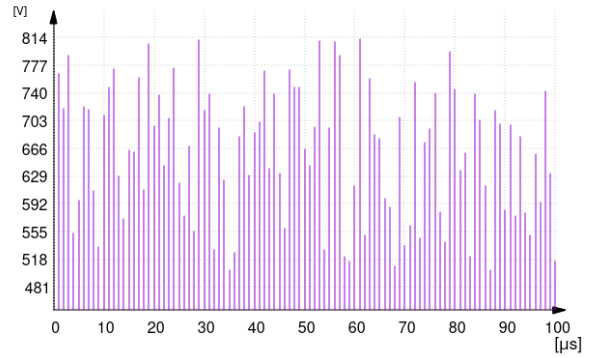
Na slici 6 prikazane su impulsne karakteristike gasnog odvodnika: a) pre stavljanja u polje neutronskog i gama zračenja; b) za vreme boravka u polju neutronskog i gama zračenja (fluksa neutronske komponente  $16.244 \cdot 10^{11}$  n/cm<sup>2</sup>); c) hiljadu sekundi nakon prestanka dejstva polja zračenja; d) 100 000 s nakon prestanka dejstva polja zračenja.

Sa slike 6 je jasno da dejstvo neutronskog i gama zračenja spušta i sužava impulsnu karakteristiku. Taj efekat je prisutan kada se gasni odvodnik nalazi u polju zračenja i određeno vreme (par sati) nakon što prestane dejstvo zračenja. Nakon više vremena, uočeni, memorijski efekat se gubi. Ovde je posebno važno uočiti da je na slikama 6b i 6c usporavanje porasta impulsne karakteristike u oblastima većih brzina impulsnog napona (to su u praksi kritične oblasti brzih indukovanih prenapona).

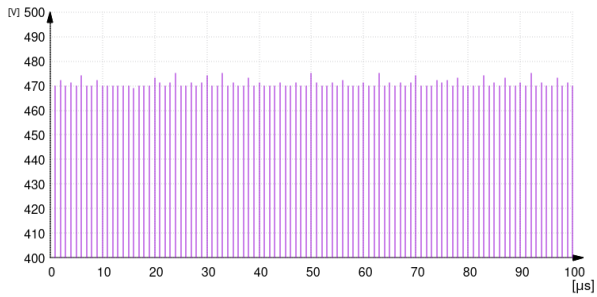
Efekti uočeni na slikama 4 - 6 se mogu objasniti efektima jonizacije radnog gasa u neutronskom i gama polju. Pošto je odvodnik izolovan He gasom neutronska komponenta primenjenog polja je sudarnim procesom pomerala jezgro He ( $\alpha$ -česticu) koja je vršila jonizaciju He gasa i stvarala jonsko-elektronske parove. Isti efekat je izazvalo i gama zračenje foto-elektronskim efektom i Komptonovim rasejanjem. Na taj način dolazi do povećanja broja elektrona u međuelektrodnom prostoru, a svaki elektron koji se nađe u homogenom polju može da postane inicijalni tj. da pokrene lavinski proces Tauzendo-vog proboja. To je posledica što je polje u međuelektrodnom prostoru (tj. na svakoj srednjoj dužini puta elektrona on stekne dovoljno energije da izvrši jonizaciju) [34], [35]. Što se tiče memorijskog efekta (ustanovljenog efekta dejstva neutronskog i gama zračenja i nakon uklanjanja polja zračenja) posledica je aktiviranja materijala odvodnika neutronima. To aktiviranje ima relativno kratko poluvreme raspada. Potvrda ovog tumačenja jesu spektrometri (aktivacione analize) gasnog odvodnika 1000 s i 100 000 s nakon dejstva zračenja, slike 7a i 7b.



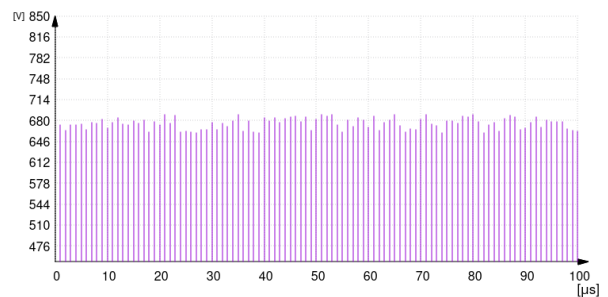
(a)



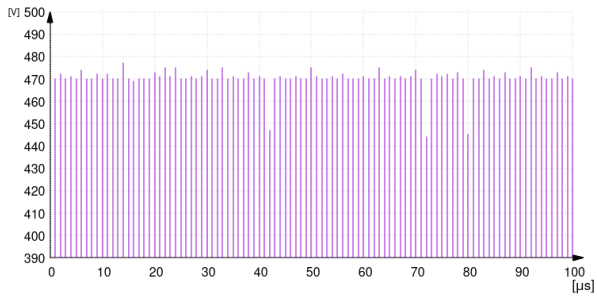
(a)



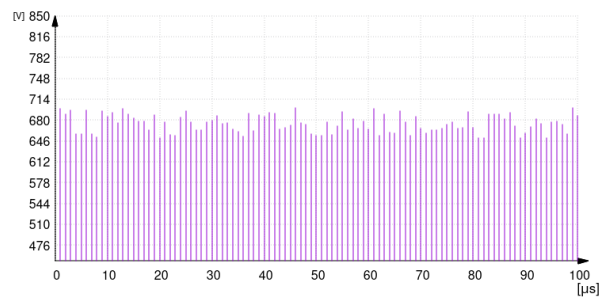
(b)



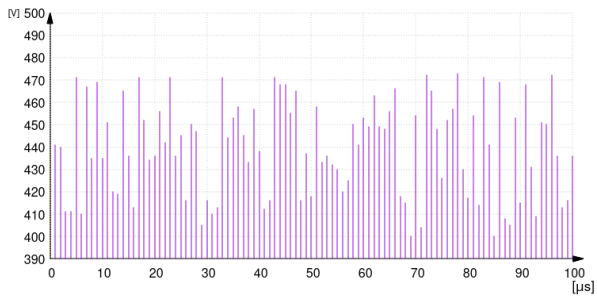
(b)



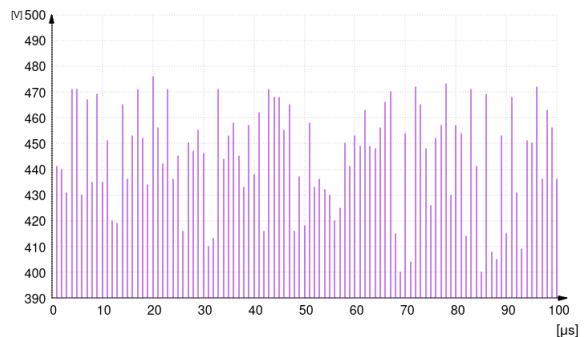
(c)



(c)



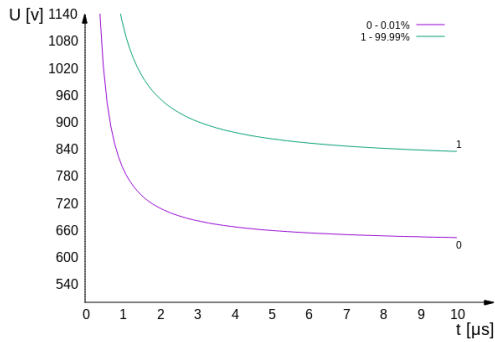
(d)



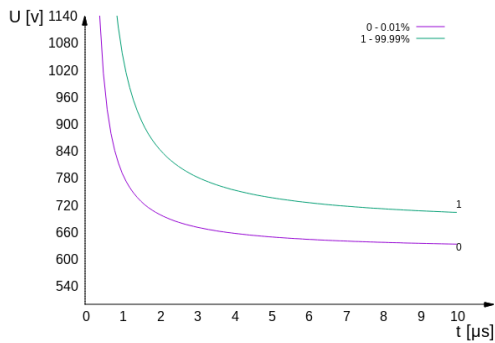
(d)

Slika 4: Hronološki niz slučajnih promenljivih jednosmerni probojni napon gasnog odvodnika prenapona

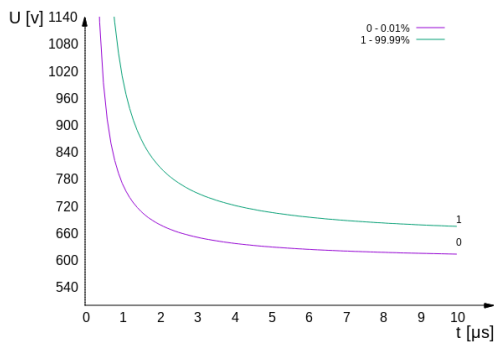
Slika 5: Hronološki niz slučajnih promenljivih impulsni probojni napon: gasnog odvodnika prenapona



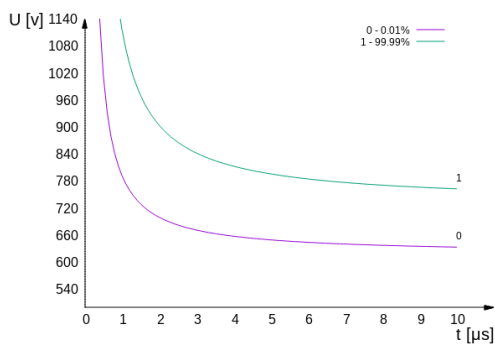
(a)



(b)

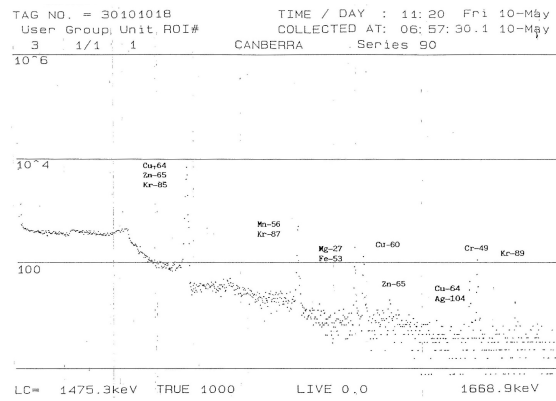


(c)

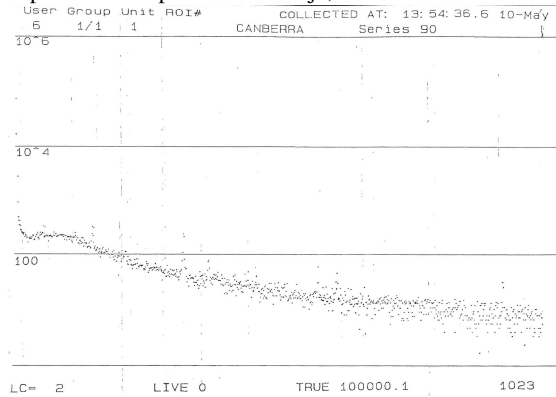


(d)

Slika 6: Impulsne karakteristike 99.99 % i 0.01% gasnog odvodnika prenapona



(a) Dijagram aktivacione analize gasnog odvodnika prenapona 1000 s posle ozračivanja;



(b) Dijagram aktivacione analize gasnog odvodnika prenapona 100 000 s posle ozračivanja

Slika 7

#### IV. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je bilo ispitivanje neutronske i gama zračenja na stabilnost karakteristika gasnih odvodnika prenapona. Izabrano je neutronske i gama zračenje (iako neutronske zračenje ne spada u direktno jonizujuće zračenje, ono je indirektno jonizujuće) pošto ta dva tipa zračenja najlakše prodiru kroz telo gasnog odvodnika i deluju u međuelektrodnom prostoru. Dejstvo neutronske i gama zračenja je interesantno i radi primene gasnih odvodnika prenapona u upravljačkim sistemima nuklearnih energetskih postrojenja pošto u njima postoji verovatnoća pojave ovog polja zračenja. Dobijeni rezultati su interesantni pošto pokazuju da dejstvo neutronske i gama zračenja popravlja funkcionalne karakteristike gasnog odvodnika prenapona. To poboljšanje karakteristika ima i memorijski efekat, tj. zadržava se i nekoliko sati nakon prestanka dejstva polja zračenja. Ovaj rezultat je od važnosti za praktične primene prenaponskih zaštitnih komponenti u hibridnim šemama pošto neutronske i gama zračenje utiče na smanjenje zaštitnih osobina odvodnih dioda i varistora što se može kompenzovati poboljšanjem zaštitnih osobina gasnog odvodnika prenapona.

## ACKNOWLEDGMENT

Istraživanje je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

## LITERATURA

- [1] Osmokrović P., Krivokapić I., Matijašević D., Kartalović N., Stability of the gas filled surge arresters characteristics under service conditions, (1996) IEEE Transactions on Power Delivery, 11 (1), pp. 260 - 266.
- [2] Beyer, M., et al., Hochspannungstechnik: Theoretische und Praktische Grundlagen, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1986.
- [3] Raizer, Y.P., Gas Discharge Physics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 1991.
- [4] Von Angel, A., Ionized gases, Physics Today, 17 (1964), 9, pp. 108-108.
- [5] Geibig K.F., Schwab A., Stöckel D., Einsatz von Faserverbundwerkstoffen in Funkenstrecken, (1983) Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 14 (6), pp. 197 - 201.
- [6] Osmokrović P., Vasić A., Zivic T., The Influence of the electric field shape on the gas breakdown under low pressure and small inter-electrode gap conditions, (2005) IEEE Transactions on Plasma Science, 33 (5 I), pp. 1677 - 1681.
- [7] Osmokrović P., Loncar B., Sasic R., Influence of the electrode parameters on pulse shape characteristic of gas-filled surge arresters at small pressure and inter-electrode gap values, (2005) IEEE Transactions on Plasma Science, 33 (5 II), pp. 1729 - 1735.
- [8] T. M. Nedic, et al.: Optimization of fast three-electrode spark gaps isolated with a SF6 and He mixture, Nuclear Technology & Radiation Protection: Year 2021, Vol. 36, No. 3, pp. 234-242.
- [9] Hylten-Cavallius Nils, High Voltage Laboratory Planning, Haeffely Basel, 1988.
- [10] Polužanski, V. S., et al., Computer Non-Iterative Data Acquisition of Particle, Nucl Technol Radiat, 34 (2019), 1, pp. 65-71.
- [11] Jusić, A., et al., Synergy of radioactive 241Am and the effect of hollow cathode in optimizing gas-insulated surge arresters characteristics, Nucl Technol Radiat, 33 (2018), 3, pp. 260-267.
- [12] HUBER+SUHNER AG: EMP protectors, Detail specification for protectors, 1989.
- [13] SIEMENS: EMV Funk - Enstrung, Bauelemente. Filter, Datenbuch 1983/84.
- [14] PHILIPS: Electronic components and materials; Resistors, Capacitors. Data handbook, Part 2, 1973.
- [15] Shunzo Morishita: A New Lightning Surge Protector for the D70 Switching System, JTR, January 1985.
- [16] Martzloff, F. D., Coordination of Surge Protectors in low voltage Power Circuits, IEEE PAS-99 No.1, Jan/Feb 1980., p. 129.
- [17] Nedić T.M., Janićijević A.J., Stanković K.D., Kartalović N.M., Efficient replacement of the radioactive sources in the gas-filled surge arresters construction for the insulation co-ordination at the low voltage level, (2020) Nuclear Technology and Radiation Protection, 35 (2), pp. 130 - 137.
- [18] Osmokrović P., Loncar B., Stankovic S., The new method of determining characteristics of elements for overvoltage protection of low-voltage system, (2006) IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 55 (1), pp. 257 - 265.
- [19] Pejovic, M.M., et al., Investigation of post-discharge processes in nitrogen at low pressure, Physics of Plasmas, 19 (2012), 12, pp. 123512-8.
- [20] Brown, S.C., Holt, E.H., Introduction to Electrical Discharges in Gases, American Journal of Physics, 36 (1968), 9, pp. 854-854.
- [21] Osmokrović, P., et al., Mechanism of electrical breakdown of gases for pressures from 10-9 to 1 bar and inter-electrode gaps from 0.1 to 0.5 mm, Plasma Sources Science and Technology, 16 (2007), 3, pp. 643-655.
- [22] Pejovic, M., et al., Processes in insulating gas induced by electrical breakdown responsible for commercial gas-filled surge arresters delay response, Vacuum, 137 (2017), pp. 85-91.
- [23] Osmokrović, P., et al., Determination of pulse tolerable voltage in gas-insulated systems, Japanese Journal of Applied Physics, 47 (2008), 12, pp. 8928-8934.
- [24] Djekić S.B., Nikezić D.P., Brajović D.V., Kartalović N.M., Ramadani U.R., Passive and active shielding against electromagnetic radiation, (2020) Nuclear Technology and Radiation Protection, 35 (4), pp. 331 - 338.
- [25] Loncar B., Osmokrović P., Stankovic S., Radioactive Reliability of Gas Filled Surge Arresters, (2003) IEEE Transactions on Nuclear Science, 50 (5 III), pp. 1725 - 1731.
- [26] Osmokrović P., Stojanovic M., Loncar B., Kartalovic N., Krivokapic I., Radioactive resistance of elements for over-voltage protection of low-voltage systems, (1998) Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 140 (1-2), pp. 143 - 151.
- [27] Cook, G., Gas-filled surge arresters for NEMP protection, pp. 85-90, ITEM, 1986.
- [28] Stanković, K., Vujisić, M., Influence of radiation energy and angle of incidence on the uncertainty in measurements by GM counters, Nucl Technol Radiat, 23 (2008), 1, pp. 41-42.
- [29] Vulević, B., Osmokrović, P., Evaluation of uncertainty in the measurement of environmental electromagnetic fields, Radiation Protection Dosimetry, 141 (2010), 2, pp. 173-7.
- [30] A. J. Schwab, High-voltage Measurement Techniques, M.I.T. Press, 1972.
- [31] Djekić S.B., Nikezić D.P., Brajović D.V., Kartalović N.M., Ramadani U.R., Passive and active shielding against electromagnetic radiation, (2020) Nuclear Technology and Radiation Protection, 35 (4), pp. 331 - 338.
- [32] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 1995.
- [33] Stanković K., Vujisić M., Dolićanin E., Reliability of semiconductor and gas-filled diodes for over-voltage protection exposed to ionizing radiation, (2009) Nuclear Technology and Radiation Protection, 24 (2), pp. 132 - 137
- [34] Osmokrović Predrag, Mechanism of electrical breakdown of gases at very low pressure and interelectrode gap values, (1993) IEEE Transactions on Plasma Science, 21 (6), pp. 645 - 653.
- [35] Osmokrović P., Krivokapić I., Krstić S., Mechanism Of Electrical Breakdown Left Of Paschen Minimum, (1994) IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1 (1), pp. 77 - 81.