

DOI: [10.46793/CIGRE37.D1.02](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.D1.02)**D1.02****IZOLACIONA SINERGIJA DVOKOMPONENTNIH GASNIH SMEŠA ZA BRZA I
ULTRABRZA NAPONSKA OPTEREĆENJA****INSULATION SYNERGY OF TWO-COMPONENT GAS MIXTURES FOR FAST AND
ULTRA-FAST VOLTAGE LOADS****Nenad Kartalović*, Čedomir Belić, Uroš Kovačević, Alija Jusić, Tomislav Stojić**

Kratak sadržaj: U radu se, teoretski i eksperimentalno, razmatraju dvokomponentne smeše gasa SF₆ sa gasovima He, N₂ i CF₄. Istraživanje tretira dejstvo brzih naponskih impulsa (komutacioni, atmosferski, ultrabrzi) na određene gasne smeše za koje se određuju izolacijski efekti. Komutacioni impulsni naponi imaju oblik (250/2500) μs i atmosferski impulsni naponi imaju oblik (1,2/50) μs. Ultrabrzi impulsni naponi treba da simuliraju odziv u žičanim strukturama nastao nuklearnim eksplozijama u atmosferi. Razvijena je visokosofisticirana merna oprema koja omogućuje pouzdana merenja brzih naponskih oblika. Gas SF₆ je još uvek najzastupljenija gasna izolacija u visokonaponskoj opremi. Ustanovljeno je da ovaj gas ima efekat staklene baste, istražuju se mogućnosti njegoelectrove zamene nekim, ekološki prihvatljivijim, gasom. Pokazalo se da nije uvek moguća njegova potpuna zamena nekim drugim gasom, te se pribegava primeni smeša SF₆ gasa sa nekim molekularnim ili atomskim gasom, sa pozitivnim sinergističkim efektom, pri čemu je varijacioni parametar procentualni sastav. Eksperimenti se vrše u kontrolisanim uslovima.

Ključne reči: *sinergija, dvokomponentna smeša, naponski impulsi, starenje, eksploatacija*

Abstract: In the paper, two-component mixtures of SF₆ gas with He, N₂ and CF₄ gases are considered, theoretically and experimentally. The research deals with the effect of fast voltage pulses (switching, atmospheric, ultrafast) on certain gas mixtures for which insulating effects are determined. Switching impulse voltages have the form (250/2500) μs and atmospheric impulse voltages have the form (1.2/50) μs. Ultrafast impulse voltages should simulate the response in wire structures caused by nuclear explosions in the atmosphere. Highly sophisticated measuring equipment has been developed that enables reliable measurements of fast voltage forms. SF₆ gas is still the most common gas insulation in high-voltage equipment. It was established that this gas has a greenhouse effect, the possibilities of replacing it with a more environmentally friendly gas are being investigated. It has been shown that it is not always possible to completely replace it with another gas, so a mixture of SF₆ gas with some

* Nenad Kartalović, Institut Nikola Tesla, nenad.kartal@icent.org

Čedomir Belić, Fizički fakultet BU, Studentski trg 12, 11000 Beograd,

Uroš Kovačević, Inovacioni centar Mašinskog fakulteta, ukovacevic@mas.bg.ac.rsAlija Jusić, Faculty of Electrical Engineering, University of Sarajevo, al.jusic@epbih.baTomislav Stojić, Mašinski fakultet BU, tstojic@mas.bg.ac.rs

molecular or atomic gas is resorted to, with a positive synergistic effect, where the variation parameter is the percentage composition. Experiments are performed under controlled conditions.

Key words: synergy, two-component mixture, voltage pulses, aging, exploitation.

1 UVOD

Gas SF₆ je do sada bila najzastupljenija gasna izolacija u elektroenergetici. Međutim, njegov uicaj na efekat staklene bašte pokreće istraživanja mogućnosti njegove zamene nekim, ekološki prihvatljivijim, gasom. Kako se pokazalo, za sada nije moguća njegova potpuna zamena nekim drugim gasom te se pribegava primeni smeša SF₆ gasa sa nekim molekularnim ili atomskim gasom [1,2,3]. Takve smeše treba da budu prihvatljive sa aspekta toksičnosti, zapaljivosti, cene, obnovljivosti i da imaju pozitivne sinergističke efekte u uslovima primene [4,5]. Pozitivan sinergistički efekat gasne smeše se prvenstveno odnosi na vrednost probojnog napona.

Električni proboj gasova počinje kao rezultat sudara elektrona sa dovoljno visokim energijama i molekula gasa. Iniciranje lavina novih elektrona i jona dovodi do samoodržanja električnog pražnjenja uz pojavu novih procesa koji dominantno zavise od mehanizma održavanja gustine elektrona i jona [6,7]. U slučaju SF₆ gasa elektronski sudarni procesi često dovode do disocijacije molekula. Od presudnog značaja za primenu SF₆ gasa je da njegovi molekuli i molekuli nastali njenom disocijacijom, pokazuju afinitet prema formiranju negativnih jona. Negativni joni svojim relativno velikim dimenzijama smanjuju srednju slobodnu dužinu puta negativno naelektrisanih čestica što smanjuje verovatnoću jonizacije i makroskopski se manifestuje povećanjem vrednosti probojnog napona [8,9].

Imajući u vidu rečeno, zamena SF₆ gasa sa drugim gasovima i smešama treba da ima slične mehanizme usporavanja pražnjenja. Najčešće se izučavaju dvokomponentne smeše gasova kod kojih je moguće ostvariti pozitivan izolacioni sinergistički efekat. To se postiže na dva načina:

- dovođenjem drugog gasa u cilju usporavanja spektra slobodnih elektrona (moderacija spektra) i povećanja verovatnoće zahvata slobodnih elektrona SF₆ molekulom i
- dovođenjem drugog elektronegativnog gasa sa manjim uticajem na efekat staklene bašte.

Gasovi koji se dodaju u cilju moderacije spektra slobodnih elektrona mogu biti molekularni ili atomski (plemeniti gasovi). Molekularni gasovi moderaciju spektra slobodnih elektrona vrše malim koracima pobuđivanjem rotacionih i vibracionih kvantnomehaničkih stanja. Atomski gasovi moderaciju spektra slobodnih elektrona vrše u većim koracima prelaskom na pobuđena kvantnomehanička stanja [10,11].

Cilj ovog rada je da se ispita sinergija dvokomponentnih smeša SF₆ gasa sa molekularnim, atomskim i elektronegativnim gasovima u uslovima brzog i ultrabrzog naponskog opterećenja (takozvanog impulsnog opterećenja).

2 IMPULSNI PROVOJ GASA

Impulsni probojni napon nastupa kada je vreme porasta napona uporedivo sa karakterističnim vremenom elementarnih procesa električnih pražnjenja u gasovima. Vrednost impulsnog probojnog napona je stohastička veličina koja se najčešće opisuje nekom od raspodela ekstremnih vrednosti [12,13]. Izvor stohastičnosti vrednosti impulsnog probojnog napona je u stohastičnosti vremena proboja. Vreme proboja se meri od trenutka ostvarivanja uslova iniciranja proboja do okončanja proboja. Ostvarenje uslova za iniciranje proboja računa se od trenutka kada se vrednost impulsnog napona izjednači sa odgovarajućom vrednosti DC napona (koji je za svaku elektrodnu konfiguraciju izolovanu određenim gasom konstantna veličina) [13]. Vreme proboja se prema fizičkim procesima sastoji od: statističkog vremena, vremena formiranja lavina i formativnog vremena. Statističko vreme je vreme potrebno da se jedan slobodni elektron nađe u delu međuelektrodnog prostora u kome može da preuzme od električnog polja iznos energije veći od energije veze elektrona u molekulu gasa. Takav elektron postaje inicijalni elektron i on inicira lavinsko pražnjenje. Vreme izgradnje lavina je vreme koje protekne od iniciranja prve lavine do premoštenja međuelektrodnog prostora sukcesivnim lavinama samoodrživog električnog pražnjenja (strimerom). Formativno vreme je vreme potrebno da u lavinama koje premoštavaju međuelektrodni prostor naraste struja i Džulovim efektom izazove termojonizaciju. Termojonizacijom kanala lavine (takozvanih strimera) se okončava električni proboj gasa. Najveći doprinos stohastičnosti vrednosti impulsnog probojnog napona je slučajna promenljiva statističko vreme [14,15].

Pošto je vrednost impulsnog probojnog napona stohastična veličina, tj. predstavlja slučajnu veličinu, merenjem se određuju njene statističke parametre. Na osnovu formiranog statističkog uzorka slučajne promenljive *probojno vreme* treba odrediti najverodostojniju statističku raspodelu. Na osnovu statističke raspodele moguće je odrediti ekstremne kvantile verovatnoće. Od ekstremnih kvantila verovatnoće, interesantni su za elektroenergetsku praksu, posebno ekstremno mali kvantili pošto je njih izuzetno teško odrediti eksperimentalno [20]. Na osnovu poznavanja vrednosti ekstremnih kvantila verovatnoće za jedan oblik impulsnog napona moguće je predvideti vrednosti tih ekstremnih kvantila za proizvoljan oblik impulsnog napona. Takva zavisnost se zove impulsna karakteristika za određeni kvantil verovatnoće. Eksperimentalno određivanje impulsne karakteristike je izuzetno teško, odnosno nemoguće. Iz tog razloga je potrebno izvesti poluempirijski algoritam za proračun impulsne karakteristike. Takav algoritam se zasniva na pretpostavci da brzina kretanja plazme u međuelektrodnom prostoru linearno raste sa porastom električnog polja tj prema jednačini:

$$v(x, t) = k[E(x, t) - E_s] \quad (1)$$

gde je k konstanta koja zavisi od mehanizma električnog pražnjenja i polariteta elektroda, E_s je vrednost statističkog DC polja koje odgovara vrednosti DC probojnog napona. Pod uslovom da se zanemari prostorno neelektrisanje dobija se:

$$E(x, t) = u(t)g(x) \quad (2)$$

pri čemu je $u(t)$ primenjeni napon a $g(x)$ funkcija određena konfiguracijom elektroda. Pod pretpostavkom da se k ne menja duž međuelektrodnog prostora može se pisati:

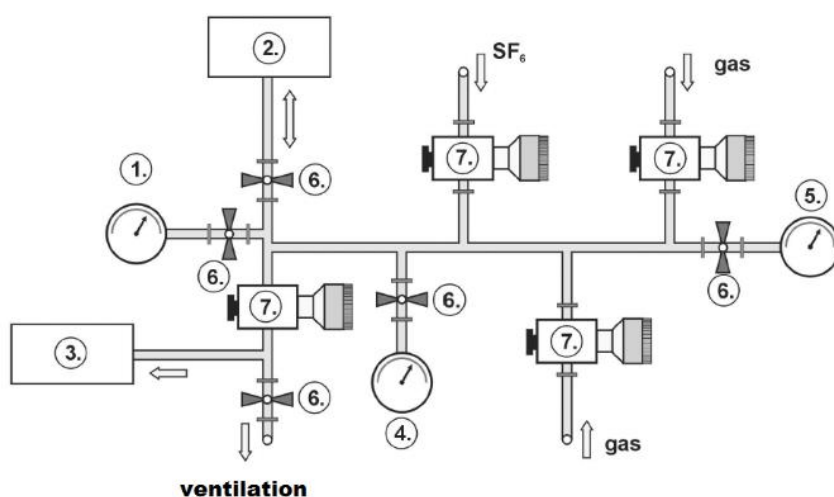
$$\frac{1}{k} \int_0^{x_k} \frac{dx}{g(x)} = \int_{t_1}^{t_1+t_a} [u(t) - u_s] dt = const \quad (3)$$

gde $x = x_k$ i $t = t_1 + t_a$ određuju tačku u međuelektrodnom prostoru i trenutak u kada Tauzendov mehanizam prelazi u strimerski [16].

U praksi se impulsna karakteristika proračunava na poluempirijski način. Prvo treba izvršiti jednu seriju merenja slučajne veličine impulsni probojni napon primenom impulsa poznatog oblika. Formiran reprezentativan statistički uzorak slučajne promeljive impulsni probojni napon treba da ima najmanje pedeset članova da bi bio zadovoljen Studentov kriterijum (u radu su formirani statistički uzorci 60 slučajnih promenljivih da bi Studentov uslov reprezentativnosti bio zadovolje i u slučaju odbacivanja nekih slučajnih promenljivih). Na osnovu takvog statističkog uzorka se odredi odgovarajuća statistička raspodela. Iz dobijene statističke raspodele se odrede 0,01% i 99,99% kvantili. Na osnovu tih kvantila se odrede konstantne vrednosti površina 0,01% i 99,99% u volt-sekundnoj ravni prema izrazu 3. Dobijene vrednosti površina u volt-sekundnoj ravni mogu odrediti sve vrednosti 0,01%, 99,9% kvantila za proizvoljni oblik impulsnog napona [17-22].

3 EKSPERIMENT I NAČIN OBRADE EKSPERIMENTALNIH REZULTATA

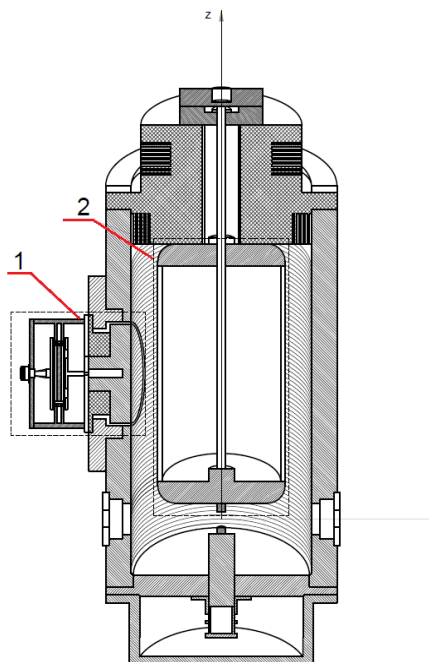
Ekperimenti su vršeni pod dobro kontrolisanim laboratorijskim uslovima. Merenja su vršena na dvokomponentnim smešama SF_6 gasa sa N_2 , He i CF_4 . Gasne smeše su formirane pomoću gasnog kruga prikazanog na slici 1, primenom zakona o aditivnosti parcijalnih pritisaka [20]. Za ispitivanje gasnih smeša korišćena je komora prikazana na slici 2. Postupak formiranja željene gasne smeše na željenom pritisku odvijao se na sledeći način: 1) zatvaranje komore sa postavljenim elektrodama i fiksiranjem međuelektrodnog rastojanja; 2) vakuumiranje komore do pritiska 10^{-6} bar; 3) upuštanje gasa koji je dominantan u smeši koja se formira; 4) ponovno vakuumiranje; 5) upuštanje prvog gasa smeše do pritiska proračunatog za parcijalni pritisak prema željenom sastavu smeše (svi pritisci su računati prema vrednosti za 20°C); 6) upuštanje drugog gasa smeše do pritiska proračunatog za parcijalni pritisak prema željenom sastavu smeše.



Slika 1. Gasna instalacija eksperimenta; 1, 4, 5 - vakuum metri, 2 - merna komora, 3 - vakuum pumpa, 6 - preklopni ventili, 7 - dozirajući ventili.

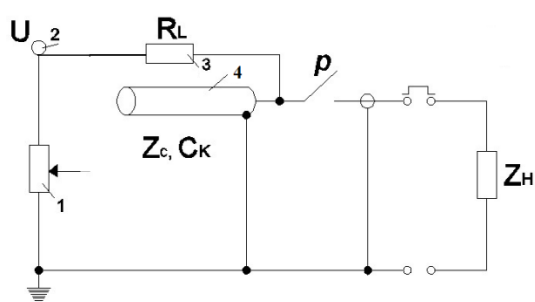
Elektrode ugrađene u mernu komoru sa slike 2 su oblika Rogovskog. Profil elektroda je određen proračunom električnog polja metodom simulacije naelektrisanja. Elektrode su izrađene od volframa i menjane su nakon svake serije merenja. Pre ugradnje u komoru,

elektrode su polirane do visokog sjaja. Pre početka merenja elektrodni sistem je kondicioniran sa po 10 proboja impulsnim naponom. U cilju eksperimentalnog određivanja krivih funkcionalnog veka trajanja gasne smeše, elektrode su bile peskarene. Pored toga nisko naponska elektroda je bila uzemljena preko otpornosti od $1\text{M}\Omega$. To je rađeno da se minimizira uticaj promena topografija elektroda na starenje izolacionog sistema.

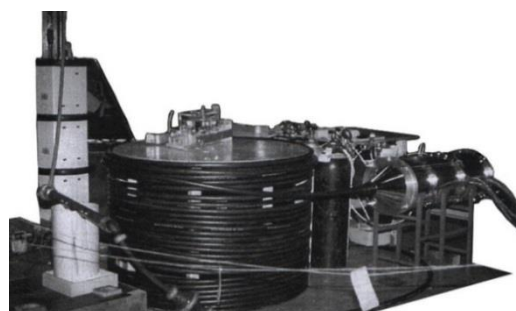


Slika 2. Merna komora; 1- brza kapacitivna sonda, 2 - elektrodni sistem.

Kao naponski generatori korišćeni su DC generatori brzine porasta napona 8V/s , Maksov impulsni generator i kablovski impulsni generator [24,25]. DC generator i Maksov impulsni generator su bili standardnog tipa. Kablovski impulsni generator se sastojao od visokonaponskog DC napajanja (generatora), snažnog koaksijalnog vodenog otpornika od 50Ω za ograničavanje struje punjenja kabla i koaksijalnog visokonaponskog kabla dužine 120 m , slika 3. Kablovski generator je generisao pravougaone impulse temene vrednosti određene napajanjem, trajanja 600 ns . Vreme porasta i opadanja pravougaonog impulse je bilo konstantno, manje od 2 ns [28,29].



(a)



(b)

Slika 3. Kablovski impulsni generator; a) dijagram kablovskog generatora: 1 - naponski delitelj, 2 - napajanje, 3 - vodeni otpornik, 4 - kabl; b) fotografija kablovskog generatora.

Merenje DC napona vršeno je komercijalnim memorijskim voltmetrom i omskim deliteljem. Merenje impulsnih napona Maksovog impulsnog generatora vršeno je kompezovanim kapacitivnim deliteljem i digitalnim osciloskopom (GHz). Merenje napona impulsnog

kablovskog generatora vršeno je digitalnim osciloskopom i brzom kapacitivnom sondom koja je ugrađena u mernu komoru, slika 2. Tokom merenja svi merni instrumenti su se nalazili u oklopljenoj mernoj kabini nivoa zaštite veće od 100 dB. Merna kabina je galvanski odvojena od eksperimentalnog sistema.

Postupak merenja se odvijao u sledećim koracima: 1) podešavanje parametara gasne smeše; 2) merenje 20 vrednosti DC probojnog napona gasne smeše; 3) podešavanje parametara Maksovog generatora na oblik impulsa „komutacioni napon“; 4) merenje 60 vrednosti impulsnog probojnog napona komutacionim impulsima; 5) podešavanje parametara Maksovog generatora na brzine porasta impulsnog napona 5kV/μs, 10kV/μs, 20kV/μs, 50kV/μs, 100kV/μs i 200kV/μs (amplitude znatno veće od odgovarajuće vrednosti DC probojnog napona); 6) merenje 10 vrednosti impulsnog probojnog napona impulsima 5kV/μs, 10kV/μs, 20kV/μs, 30kV/μs, 50kV/μs, 100kV/μs i 200kV/μs; 7) podešavanje parametara Maksovog generatora na oblik impulsa „atmosferski napon“; 8) merenje 60 vrednosti impulsnog probojnog napona atmosferskim impulsima; 9) podešavanje parametara Maksovog generatora na brzine porasta impulsnog napona 5kV/μs, 10kV/μs, 20kV/μs, 50kV/μs, 100kV/μs i 200kV/μs; 10) merenje 10 vrednosti impulsnog probojnog napona impulsima brzine porasta 5kV/μs, 10kV/μs, 20kV/μs, 50kV/μs, 100kV/μs i 200kV/μs; 11) određivanje impulsnih karakteristika na osnovu statističkog uzorka slučajnih veličina impulsni probojni napon dobijenih komutacionim naponom i izrazom 3, 12) ucrtavanje na impulsne karakteristike vrednosti impulsnih probojnih napona dobijenih impulsima 1kV/μs, 2kV/μs, 3kV/μs, 5kV/μs, 10kV/μs, 20kV/μs, 50kV/μs, 100kV/μs i 200kV/μs, 13) određivanje impulsnih karakteristika na osnovu statističkog uzorka slučajnih veličina impulsni probojni napon dobijenih atmosferskim naponom i izrazom 3, 14) ucrtavanje na impulsnim karakteristikama vrednosti impulsnih probojnih napona dobijenih impulsima 5kV/μs, 10kV/μs, 20kV/μs, 30kV/μs, 50kV/μs, 100kV/μs i 200kV/μs, 15) podešavanje napona kablovskog generatora (temene vrenosti brzog impulsnog napona) na 600kV; 16) merenje 60 vrednosti probojnog vremena brzim naponskim impulsima i 17) ponavljanje merenja za naredni sastav smeše [30]. Obrada rezultata merenja se sastojala u statističkoj analizi eksperimentalno dobijenih statističkih uzoraka slučajne promenljive probojno vreme.

Obrada i analiza podataka „statističkih uzoraka“ slučajne promenljive *probojno vreme* dobijeno kablovskim generatorom obrađivana je sledećim koracima: 1) odbacivanje sumljivih slučajnih promenljivih Šoveniovim kriterijumom; 2) primenom U testa sume rangova na reprezentativni statistički uzorak testira se pripadnost slučajne promenljive jedinstvenoj statističkoj raspodeli; 3) određivanje statističke raspodele slučajne promenljive probojno vreme primenom χ^2 testa i testa Kolmogorova; 4) određivanje statističke raspodele slučajne promenljive probojno vreme; 5) određivanje centralnih momenata statističke raspodele slučajne promenljive probojno vreme metodom maksimalne verodostojnosti.

Eksperimentalno određivanje funkcionalnih krivih *veka trajanja* određivane su prema modifikovanom zakonu veka trajanja [32]:

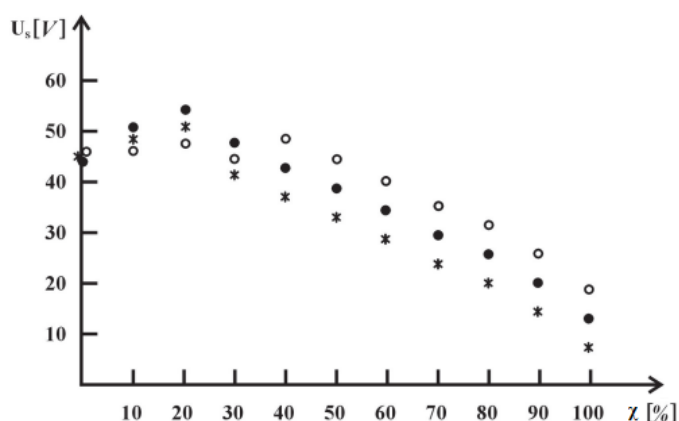
$$u_{dp} = k_{dp} n(t)^{-\frac{1}{r}} \quad (4)$$

gde su: u_{dp} –p-ti kvantil probojnog napona, $n(t)$ –broj impulsnih proboja, t –ukupno vreme izloženosti impulsnim probojima, k_{dp} –konstanta koja karakteriše geometriju elektrodnog sistema i r – eksponent starenja elektrodnog sistema.

Ispitivane su iste smeše gasova to jest: $\chi SF_6 + (1 - \chi)N_2$, $\chi SF_6 + (1 - \chi)He$ i $\chi SF_6 + (1 - \chi)CF_4$, ($\chi \leq 1$). Postupak se odvijao sledećim koracima: 1) podešavanje pritiska i procentualni sastav smeše (na opisan način); 2) vršenje po 104, 105, 106, 107, 108, 109, 1010, 1011 i 1012 proboja smeše gasova impulsa atmosferskog tipa sa pauzom 30 sekundi između dva uzastopna proboja; 3) nakon svakog od navedenih brojeva proboja impulsa merenje po 60 vrednosti probojnog napona ultrabrzim impulsa (iz kablovskog generatora) sa naponom punjenja 400kV, 500kV i 600kV i određivanja pripadnost statističkim raspodelama (raspodelama ekstremnih vrednosti i normalnoj raspodeli). Za ove statističke uzorke slučajne promenljive probojno vreme ustanovljeno je da pripadaju troparametarskoj Vejbulovoj raspodeli. Dalji postupak obrade eksperimentalno dobijenih rezultata odvijao se sledećim koracima: 1) crtanje statističkih raspodela slučajne promenljive probojno vreme; 2) konstruisanje krivih veka trajanja sa 0,1 i 0,63 kvantila; 3) fitovanje dobijenih krivih veka trajanja izrazom 4 i određivanje eksponenta veka trajanja.

4 REZULTATI I DISKUSIJA

Na slici 4 su prikazane eksperimentalno dobijene vrednosti DC probojnog napona dvokomponentne gasne smeše SF₆ gasa sa dodatnim gasom u zavisnosti od procentualnog udela dodatnog gasa. Procentni udeli dodatnih gasova (N₂, He i CF₄) su se menjali korakom od 10% od 0% do 100%. Pritisak dvokomponentne smeše je bio 2,5 bar, a međuelektrodno rastojanje 2 mm.

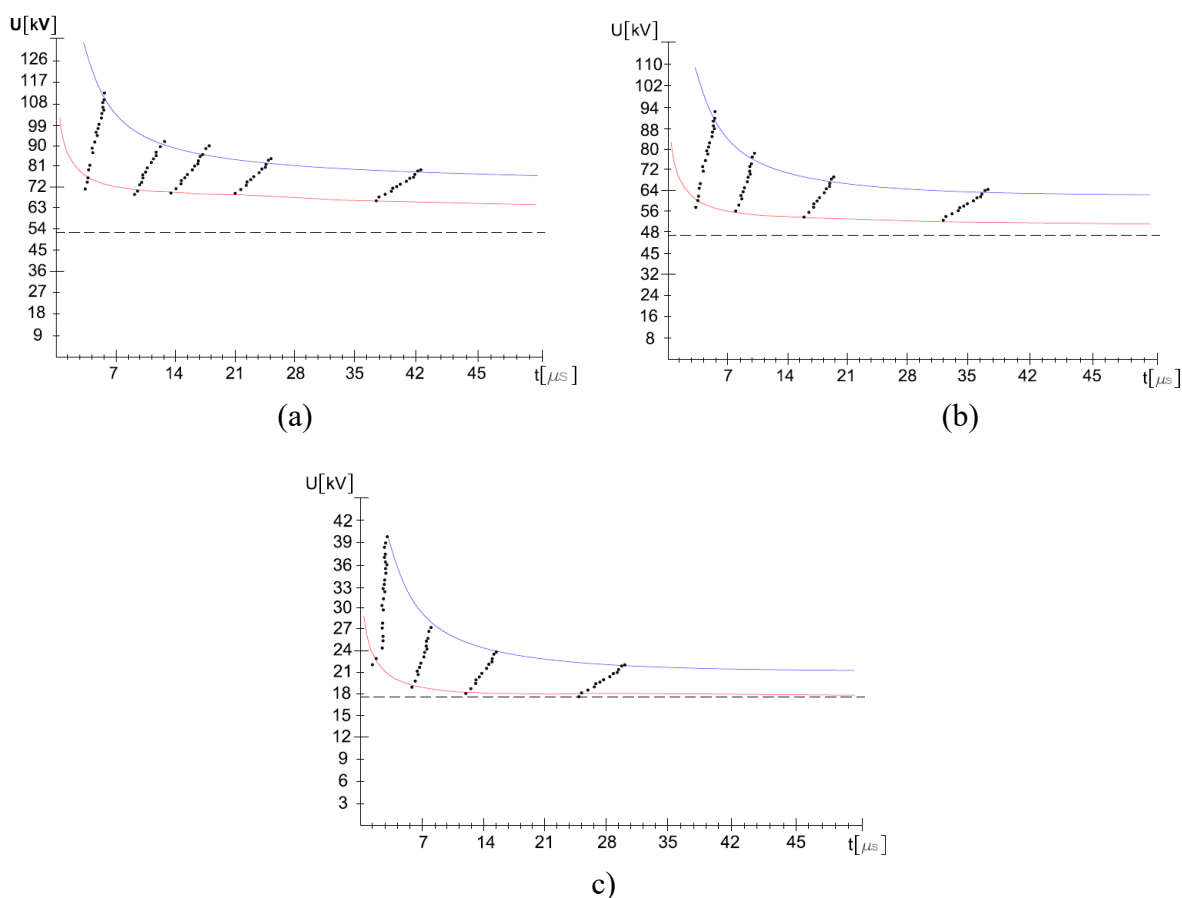


Slika 4. Zavisnost DC probojnog napona od procentualnog sastava dvokomponentnih smeša; $\chi SF_6 + \chi N_2$ (●); $\chi SF_6 + \chi He$ (*) i $\chi SF_6 + \chi CF_4$ (○); ($0 \leq \chi \leq 1$).

Na osnovu rezultata prikazanih na slici 4 može se zaključiti da se pozitivan izolacioni sinergijski efekat smeše SF₆ gasa i dodatnog gasa postiže dodavanjem gasova za moderaciju spektra slobodnih elektrona. Dodavanjem elektronegativnog gasa CF₄ ne dovodi do primetnije pozitivne sinergije (izuzimajući očekivano smanjenje uticaja na efekat staklene bašte). Takav rezultat je logičan pošto dodavanje elektronegativnih gasova SF₆ gasu ne povećava verovatnoću formiranja negativnih jona. Sa druge strane usporavanje spektra slobodnih elektrona produžava vreme koje slobodni elektron provodi u blizini elektronegativnog molekula i time povećava verovatnoću za njegov zahvat (verovatnoća zahvata elektrona elektronegativnom molekulom je obrnuto proporcionalna brzini slobodnog elektrona). Rezultati sa slike 4 pokazuju da se pozitivniji sinergistički efekat više izražen ako je dodati gas SF₆ gasu molekularnog tipa (a ne atomskog). To se može objasniti mogućnošću predaje malih iznosa energije elektrona za pobuđivanje rotacionih i vibracionih kvantnomehaničkih stanja. Takva mogućnost garantuje usporavanje spektra slobodnih

elektrona. Sa druge strane u sudaru slobodnih elektrona sa atomima moguće je da dođe ili do eksitacije atoma ili do njegove jonizacije. Verovatnoća tih procesa je manja pošto su eksitacioni i jonizacioni kvantnomehantički nivoi izrazito diskretni pa je verovatnoća ovih procesa manja od verovatnoće pobuđivanja vibracionih i rotacionih stanja (koja su skoro kontinualna). Ovdje treba napomenuti da je eksperimentalno potvrđeno da Pašenov zakon važi za DC proboj smeša SF_6 gasa sa dodatnim gasom.

Primenom χ^2 testa i testa Kolmogorova utvrđeno je da eksperimentalno određeni statistički uzorci slučajnih veličina komutacioni i atmosferski impulsni probojni napon pripadaju troparametarskoj Vejbulovoj raspodeli. Na osnovu određenih parametara određene su vrednosti komutacionog i atmosferskog impulsnog probojnog napona kvantila verovatnoće 0,01% i 99,99%. Tako određene vrednosti impulsnih probojnih napona, vrednost DC probojnog napona (predhodno određena za isti sastav smeše, pritisak i međuelektrodno rastojanje) omogućavaju da se, primenom izraza 3, odrede komutaciona i atmosferska impulsna karakteristika kvantila 0,01% i 99,99%. Impulsne karakteristike kvantila 0,01% i 99,99% ograničavaju u naponsko vremenskoj ravni prostor u kome treba da se nalaze sve vrednosti impulsnog probojnog napona nezavisno od oblika impulse. Površina prostora između 0,01% i 99,99% impulsne karakteristike je određena procesima električnog pražnjenja tokom proboja i daje podatke o kvalitetu gasne izolacije (gasna izolacija je kvalitetnija ako je statističko rasipanje slučajne promenljive impulsni probojni napon manje, tj. što je površina između 0,01% i 99,99% impulsne karakteristike manja). Na slici 5 su prikazani dijagrami impulsne karakteristike za kvantile 0,01% i 99,99% za smešu gasova $0,8\text{SF}_6 + 0,2\text{N}_2$.



Slika 5. Kvantili 0,01% i 99,99% za impulsne karakteristike dvokomponentnih mešavina; a) $0,8\text{SF}_6 + 0,2\text{N}_2$, b) $0,8\text{SF}_6 + 0,2\text{He}$ i c) $0,8\text{SF}_6 + 0,2\text{CF}_4$ za parametre impulsnih probojnih napona $2 \text{ kV}/\mu\text{s}$, $3 \text{ kV}/\mu\text{s}$, $5 \text{ kV}/\mu\text{s}$, $7 \text{ kV}/\mu\text{s}$ i $16 \text{ kV}/\mu\text{s}$.

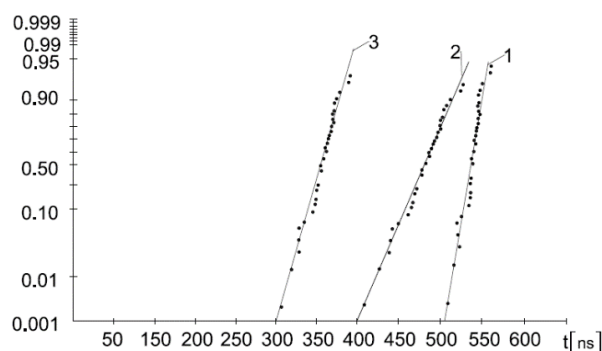
U Tabeli 1 date su vrednosti površina u naponsko-vremenskoj ravni između 0,01% i 99,99% kvantila atmosferskih impulsnih karakteristika u zavisnosti od tipa smeše i procentualnog sastava. Razlika između 0,01% i 99,99% kvantila impulsnih karakteristika dobijenih komutacionim i atmosferskim impulsnim naponom za posmatranu smešu gasova je bila ispod 5%. Taj rezultat direktno proističe od univerzalnosti postupka dobijanjem impulsnih karakteristika primenom izraza 3 (u slučaju važenja pretpostavki sa kojima je izraz 3 izveden). Što se tiče vrednosti impulsnih probojnih napona brzine porasta 5 kV/μs, 10 kV/μs, 20 kV/μs, 30 kV/μs, 50 kV/μs, 100 kV/μs i 200 kV/μs, oni su sa verovatnoćom 90% nalazili između 0,01% i 99,99% impulsnih karakteristika.

Tabela 1. Vrednosti površine u naponsko – vremenskoj ravni između 0,01% i 99,99% kvantila komutacionih impulsnih karakteristika u zavisnosti od tipa smeše i procentualnog sastava.

χ	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
$\lambda\text{SF}_6 + (1-\lambda)\text{N}_2$ [kVμs]	543	310	212	220	225	231	237	241	243	245	248
$\lambda\text{SF}_6 + (1-\lambda)\text{He}$ [kVμs]	543	405	370	320	290	270	265	260	253	250	250
$\lambda\text{SF}_6 + (1-\lambda)\text{CF}_4$ [kVμs]	543	537	510	501	492	487	450	429	402	395	370

Dobijeni rezultati za brza impulsna opterećenja (prikazana na slici 5 i u Tabeli 1) pokazuju da se električni proboj dvokomponentne smeše SF₆ i gasova N₂ ili He ili CF₄ odvija mehanizmom koji odgovara pretpostavka usvojenim pri izvođenju zakona o konstantnosti površine ispod impulsnog napona u naponsko-vremenskoj ravni (izraz 3). Poređenjem površine između 0,01% i 99,99% impulsne karakteristike za različite dvokomponentne smeše vidi se da su te površine najmanje za smeše SF₆ i N₂, a najveće za smeše SF₆ i CF₄. To znači da je pozitivni sinergistički efekat smeša najizraženiji u slučaju smeše SF₆ i N₂. Pozitivni sinergistički efekti dobijeni brzim impulsivnim naponom prate odgovarajući sinergistički efekat konstatovan opterećenjem DC naponom.

Statistički uzorci slučajne veličine probojno vreme dobijeni eksperimentima sa ultrabrzim impulsima (impulsima iz kablovskog generator) su testirani na pripadnost statističkim raspodelama ekstremnih vrednosti i normalnoj raspodeli. Primenom χ^2 testa i Kolmogorov testa, pokazalo se da svi statistički uzorci slučajne promenljive probojno vreme pripadaju troparametarskoj Vejbulovoj raspodeli. Na slici 6 su prikazane statističke raspodele slučajne promenljive probojno vreme na papiru Vejbulove raspodele za dvokomponentne smeše 0,8SF₆ + 0,2N₂; 0,8SF₆+0,2He; 0,8SF₆+0,2CF₄. U Tabeli 2 su date srednje vrednosti slučajne promenljive probojnog vremena u zavisnosti od procentualnog sastava smeše.



Slika 6. Statističke distribucije slučajnog promenljivog vremena proboja dobijenog brzim impulsima (kablovski generator) za smeše 1) 0,8SF₆ + 0,2N₂, 2) 0,8SF₆ + 0,2He i 3) 0,8SF₆ + 0,2CF₄.

Tabela 2. Srednje vredosti slučajne promenljive probojno vreme u zavisnosti od tipa smeše i procentualnog sastava.

χ	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
$\chi \text{ SF}_6 + (1 - \chi) \text{ N}_2$ [ns]	500	530	540	501	461	415	370	331	235	250	210
$\chi \text{ SF}_6 + (1 - \chi) \text{ He}$ [ns]	500	410	350	361	330	305	283	252	230	210	180
$\chi \text{ SF}_6 + (1 - \chi) \text{ CF}_4$ [ns]	500	500	500	500	485	471	452	430	351	350	315

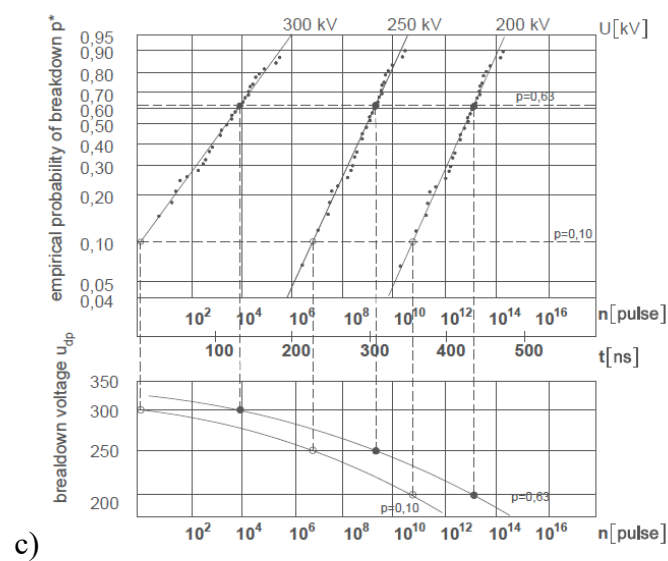
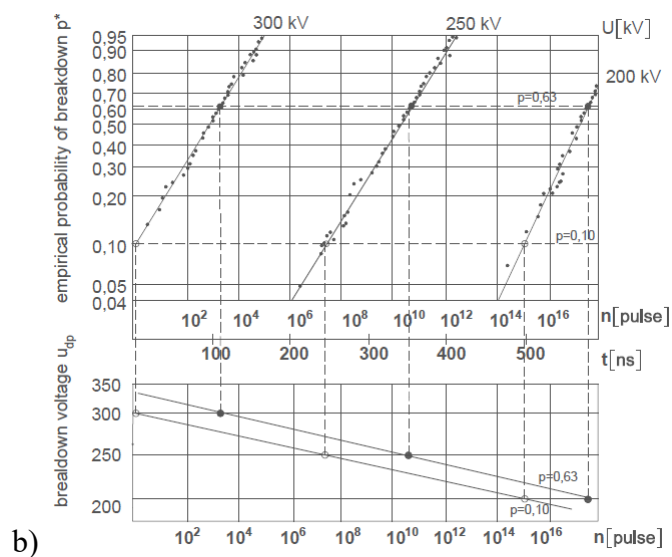
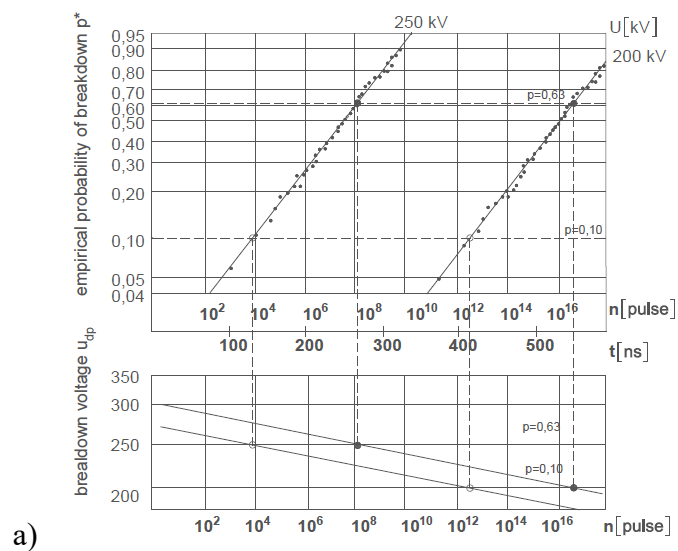
Tabela 3. Vrednost eksponenta veka trajanja u zavisnosti od tipa smeše i procentualnog sastava.

χ	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
$\chi \text{ SF}_6 + (1 - \chi) \text{ N}_2$	82	84	87	90	91	92	93	95	96	97	98
$\chi \text{ SF}_6 + (1 - \chi) \text{ He}$	82	85	87	93	98	102	107	112	116	120	125
$\chi \text{ SF}_6 + (1 - \chi) \text{ CF}_4$	82	80	78	76	75	73	72	70	69	62	65

Rezultati prikazani na slici 6 i u Tabeli 2 pokazuju da najveće vrednosti slučajne promenljive probojno vreme odgovaraju smeši gasova $0,8\text{SF}_6 + 0,2\text{N}_2$. Pošto toj smeši gasova odgovara i maksimalna pozitivna izolaciona sinergija, može se zaključiti da je smeša SF_6 gasa sa molekularnim elektropozitivnim gasovima optimalna. To se može objasniti činjenicom da pobuđivanje rotacionih i vibracionih stanja takvih dodatnih gasova uz mogućnost disocijacije njihovih molekula vrši najefikasnije usporavanje spektra gasa slobodnih elektrona.

Krive veka trajanja (0,1 i 0,63 kvantila) dvokomponentnih smeša $0,8\text{SF}_6 + 0,2 \text{ N}_2$, $0,8\text{SF}_6 + 0,2 \text{ He}$ i $0,8\text{SF}_6 + 0,2\text{CF}_4$ prikazane su na slici 7. U Tabeli 3 date su vrednosti eksponenta veka trajanja u zavisnosti od tipa smeše i procentualnog sastava.

Rezultati prikazani na slici 7 i u Tabeli 3 pokazuju da gasna smeša $\chi \text{ SF}_6 + (1 - \chi) \text{ He}$ ($\chi \leq 1$) najsporije stari. Za tu smešu je ustanovljeno da pozitivna sinergija (usporeni efekat starenja) raste sa procentualnim učešćem He. To nije interesantno u praksi pošto gasna smeša sa velikim procentualnim delom He je ekonomski neisplativa a ima i nisku vrednost probojnog napona. Sa aspekta starenja najgori sinergetski efekat daje $\chi \text{ SF}_6 + (1 - \chi) \text{ CF}_4$ ($\chi \leq 1$). Ova gasna smeša nakon 10^{10} proboja impulsnim naponom menja mehanizam starenja. Do toga dolazi usled destrukcije molekula CF_4 sa malom verovatnoćom rekombinacije. Nakon destrukcije većeg dela molekula gasna smeša ubrzano stari. Taj efekat – negativni sinergistički efekat raste sa povećanjem procentualnog učešća CF_4 u smeši. Smeša $\chi \text{ SF}_6 + (1 - \chi) \text{ N}_2$ stari zadovoljavajuće polako i ne dolazi do promene mehanizma starenja usled destrukcije molekula N_2 . Razlog za ovaj efekat je velika verovatnoća rekombinacije molekula N_2 .



Slika 7. Konstrukcija krivih preostalog veka za dvokomponentne smeše a) $0.8\text{SF}_6+0.2\text{N}_2$, b) $0.8\text{SF}_6+0.2\text{He}$ i c) $0.8\text{SF}_6+0.2\text{CF}_4$.

5 ZAKLJUČAK

Dobijeni rezultati pokazuju da pozitivni izolacioni sinergistički efekti u uslovima brzog i ultrabrzog opterećenja naponskim efektima zavise od odnosa brzine naponskog impulse i brzine mehanizma kojima se ostvaruje sinergija. Najpozitivniji sinergistički efekat pokazuje smeša SF₆ i N₂ a najslabiji smeša SF₆ i CF₄. Takav rezultat je objašnjen praktično kontinualnim uspostavljanjem spektra slobodnih elektrona pri interakcijama sa molekulima N₂. To je posledica malo razmaknutih rotacionih i vibracionih kvantnomehaničkih stanja molekula N₂. Sličan efekat se ne javlja u smeši SF₆ i He pošto se usporenje spektra slobodnih elektrona može postići samo pobuđivanjem atomskih kvantnomehaničkih stanja He (a to ne isključuje ni jonizaciju He elektronima iz repa spektra). Pokazano je da je pozitivan sinergistički efekat smeše SF₆ i CF₄ zanemarljiv, osim sa aspekta smanjenja efekta staklene baste. Treba napomenuti da smeša SF₆ i He ima najizraženiji sinergistički efekat sa aspekta dužine veka trajanja. To se objašnjava atomskom strukturom plemenitog gasa He. U tom pogledu smeša SF₆ i CF₄ ima lose osobine pošto nakon disocijacije molekula CF₄ proces njenog starenja menja mehanizam i ubrzava se.

6 ZAHVALNICA

Ovaj rad je rezultat istraživačkog projekta koji je delimično finansijski podržalo Ministarstvo za nauku, tehnološki razvoj i inovacije Republike Srbije, po osnovu Ugovora o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada istraživačko-inovacionih organizacija.

7 LITERATURA

- [1] Rajović Z., Vujisić M., Stanković K., Osmokrović P., Influence of SF₆-N₂ gas mixture parameters on the effective breakdown temperature of the free elektron gas, (2013) IEEE Transactions on Plasma Science, 41 (12), art. no. 6645459, pp. 3659 - 3665, DOI: 10.1109/TPS.2013.2286153
- [2] Manfred Maiss, Ingeborg Levin, Global increase of SF₆ observed in the atmosphere, Volume 21, Issue7, 1 April 1994, Pages 569-572, <https://doi.org/10.1029/94GL00179>;
- [3] Patra, P. & Lal, Shyam & Subbaraya, B. & Jackman, Charles & Rajaratnam, Ponnarashi. (1997). Observed vertical profile of sulfur hexafluoride (SF₆) and its atmospheric applications. Journal of Geophysical Research. 102. 8855-8859. 10.1029/96JD03503;
- [4] Jusić A., Stojić T., Lazarević D., Kovačević U., The influence of parameters of gas-insulated system on the duration of electrical breakdown at points near to Paschen minimum, (2023) Vacuum, 217, art. no. 112549, DOI: 10.1016/j.vacuum.2023.112549;
- [5] Electrical Breakdown of Gases, John M. Meek, J. D. Craggs, John Wiley & Sons (January 1, 1978);
- [6] Osmokrovic 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, DOI: 10.1109/27.256784
- [7] Osmokrovic P., Djogo G., Applicability of simple expressions for electrical breakdown probability in vacuum, (1989) IEEE transactions on electrical insulation, 24 (6), pp. 943 - 947, DOI: 10.1109/14.46317;
- [8] Jusić A.R., Lazarević D.R., Turković I.M., Influence of ionizing radiation on the stochasticity of overvoltage protection at low, medium, and high voltage levels in gas surge arresters, (2023) Nuclear Technology and Radiation Protection, 38 (1), pp. 18 - 29, DOI: 10.2298/NTRP2301018J
- [9] Nenad Kartalović, Alija Jusić, Dušan Nikezić, Koviljka Stanković, Validity of the law of similarity for impulse and DC breakdown of gases in the vicinity of the Paschen's minimum, (2023) Vacuum, Volume 207, 111683, <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111683>.
- [10] B. Chervy, H. Riad and A. Gleizes, "Calculation of the interruption capability of SF₆-CF₄ and SF₆-C₂ mixtures. I. Plasma properties," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 24, no. 1, pp. 198-209, Feb. 1996, doi: 10.1109/27.491760;
- [11] L. G. Christophorou and R. J. Van Brunt, "SF₆/sub 6//N/sub 2/ mixtures: basic and HV insulation properties," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 2, no. 5, pp. 952-1003, Oct. 1995, doi: 10.1109/94.469988;
- [12] Osmokrovic 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, DOI: 10.1109/TIM.2005.862023
- [13] Lazarevic, Stojić T., Jusić A., Kovačević U., A semi-empirical algorithm for determining the impulse characteristics of gas-insulated two-electrode systems in the vicinity of Paschen minimum with and without taking into account the spark channel thermoionization time, (2023) Vacuum, 213, art. no. 112153, DOI: 10.1016/j.vacuum.2023.112153
- [14] Qiu, Y., and Y. P. Feng. "Investigation of SF₆-N₂, SF₆-CO₂ and SF₆-Air as Substitutes for SF₆ Insulation," In Electrical Insulation, 1996., Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on, vol. 2, pp. 766-769. Montreal, QC, Canada: IEEE;

- [15] Belić Č., Jusić A.R., Kovačević U.D., Malaš V.S., Poparić G., The influence of ionizing α and γ radiation on the statistics of the random variable electrical breakdown of electronegative gases, (2024) Nuclear Technology and Radiation Protection, 39 (4);
- [16] Y. A. Safar, N. H. Malik and A. H. Qureshi, "Impulse Breakdown Behavior of Negative Rod-Plane Gaps in SF₆-N₂, SF₆-Air and SF₆-CO₂ Mixtures," in IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI-17, no. 5, pp. 441-450, Oct. 1982, doi: 10.1109/TEI.1982.298488;
- [17] Berg, J.; Kuffel, E. Breakdown voltage of characteristics of SF₆-CF₄ mixture in uniform and non-uniform field gaps. In Proceeding of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, QC, Canada, 16–19 June 1996
- [18] B. Chervy, J. -J. Gonzalez and A. Gleizes, "Calculation of the interruption capability of SF/sub 6/-CF/sub 4/ and SF/sub 6/-C/sub 2/F/sub 6/ mixtures. II. Arc decay modeling," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 24, no. 1, pp. 210-217, Feb. 1996, doi: 10.1109/27.491761;
- [19] VDI-Buch, Andreas Küchler, "High Voltage Engineering Fundamentals, Springer-Verlag GmbH Germany 1996, 2005, 2009, 2017, 2018
- [20] Osmokrović, P., Stojković M., Stanković K., Vujisić M., Kovačević D., "Synergistic effect of SF₆ and N₂ gas mixtures on the dynamics of electrical breakdown", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume: 19, Issue: 2, April 2012;
- [21] A. Jusić, "Influence of Critical Working Conditions on Stability of Varistor Characteristics", IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, Volume: 24, Issue: 3, September 2024
- [22] Han S. Uhm, Yong S. Byeon, Ki B. Song, Eun H. Choi, Han-Yong Ryu, Jaimin Lee; Analytical investigation of electrical breakdown properties in a nitrogen-SF₆ mixture gas. Phys. Plasmas 1 November 2010; 17 (11): 113510. <https://doi.org/10.1063/1.3501022>
- [23] Polužanski V., Kovacevic U., Bacanin N., Rashid T.A., Stojanovic S., Nikolic B., Application of Machine Learning to Express Measurement Uncertainty, (2022) Applied Sciences (Switzerland), 12 (17), art. no. 8581, DOI: 10.3390/app12178581
- [24] PHAM, Hong-Lam and Sunjun, Jin and BUI, Duy-Linh and NGUYEN, Tuan-Khai and BUI, Van-Loat and PHAM, Quang-Trung and PHAN, Viet-Cuong and LE, Tuan-Anh and NGUYEN, Tien-Quan and NGUYEN, Ngoc-Quynh and NGUYEN, Huu-Quyet and PHAN, Tien-Dung and Le, Ngoc-Thiem, Calibration of External Radiotherapy Ion Chamber in Megavoltage X Ray Field of Medical Linear Accelerator
- [25] P. Osmokrović, D. Filipović, M. Pešić, Z. Lazarević, "Transient Electric Field Measurement in the Liquid Dielectrics Using Computerized Laser Tomography", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Volume: 56, Issue: 6, December 2007, DOI: 10.1109/TIM.2007.908312;
- [26] P. Osmokrovic; D. Petkovic; O. Markovic, "Measuring probe for fast transients monitoring in gas insulated substation", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Volume: 46, Issue: 1, February 1997;