

**Univerzitet u Beogradu
Mašinski fakultet**

Radomir Todorović

**PREDIKCIJA KARAKTERISTIKA
DIELEKTRIKE VAKUUMSKIH
PREKIDAČA NA OSNOVU ISPITIVANJA
PRETPROBOJNIH FENOMENA**

doktorska disertacija

Beograd, 2015.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Radomir B. Todorović

**PREDICTION OF VACUUM CIRCUIT
BREAKERS' INSULATING
CHARACTERISTICS BASED ON THE
EXAMINATION OF PRE-BREAKDOWN
PHENOMENA**

doctoral dissertation

Belgrade, 2015

Komisija za pregled, ocenu i odbranu doktorske disertacije

Mentori:

dr Dobrila Škatarić, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

dr Zoran Trifković, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

Članovi komisije:

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

dr Tomislav Stojić, vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

dr Predrag Osmokrović, redovni profesor
Državni univerzitet u Novom Pazaru

Datum odbrane: _____

PREDIKCIJA KARAKTERISTIKA DIELEKTRIKE VAKUUMSKIH PREKIDAČA NA OSNOVU ISPITIVANJA PRETPROBOJNIH FENOMENA

REZIME

U ovom radu se razmatra uticaj sklopnih operacija na izolacione karakteristike vakuumskih sklopnih elemenata. Razmatraju se sledeće sklopne operacije: uklop bez struje – isklon bez struje, uklop bez struje - uklop sa nominalnom strujom, uklop bez struje - isklon sa strujom kratkog spoja. Pri tome se ovaj uticaj ispituje na slučajne veličine *ac* probojni napon, impulsni probojni napon i na pretprobojne parametre V_{-4} , V_{-5} i V_{-6} (dc naponi pri kojima je pretprobojna struja 10^{-4} A, 10^{-5} A i 10^{-6} A). Dobijeni efekti promene karakteristika nakon sklopnih operacija se porede sa odgovarajućim rezultatima dobijenim sa istim sklopnim elementima kondicioniranih kontakata. Tako dobijeni rezultati se tumače preko mehanizma električnog pražnjenja u vakuumu. Osnovni rezultat, a ujedno i cilj rada, je ispitivanje relacija korelacije i regresije između eksperimentalno dobijenim statističkim uzorcima slučajne veličine *ac* i impulsni probojni napon i njima odgovarajućih statističkih uzoraka slučajnih veličina pretprobojnih parametara V_{-4} , V_{-5} i V_{-6} . Ispitivanje se vrši na komercijalnim vakuumskim sklopnim elementima sa CuCr i CuBi kontaktima.

Ključne reči: vakuumski sklopni elementi, sklopne operacije, pretprobojni parametar, probojni napon, korelacija, regresija.

Naučna oblast: Mašinstvo.

Uža naučna oblast: Tehnička fizika.

UDK broj: 621.3.015.5

PREDICTION OF VACUUM CIRCUIT BREAKERS' INSULATING CHARACTERISTICS BASED ON THE EXAMINATION OF PRE-BREAKDOWN PHENOMENA

ABSTRACT

This work considers the influence of switching operations on the insulating characteristics of vacuum circuit breakers. The following operations, all with circuit-making without current, have been taken into account: circuit-breaking without current, circuit-breaking with nominal current and circuit-breaking with short-circuit current. The influence of switching operations is examined for the random variables breakdown voltage (ac and pulse) and the pre-breakdown parameters V_{-4} , V_{-5} , and V_{-6} . Parameters V_{-4} , V_{-5} , and V_{-6} represent the dc voltage at which the pre-breakdown current takes values of 10^{-4} , 10^{-5} , and 10^{-6} A, respectively. Switching element characteristics after the switching operations are compared with the corresponding results obtained for switching element with conditioned contacts. Obtained results are analyzed through mechanisms of electrical discharges in vacuum. The main result is an examination of the correlation and regression between the experimentally obtained breakdown voltage (ac and pulse) random variable and its corresponding pre-breakdown parameters V_{-4} , V_{-5} , and V_{-6} , respectively. Statistical samples created by using this method do not require the repetition of switching operations and therefore the dielectric strength of the vacuum insulation is kept in its initial state. The examination is carried out on commercial vacuum switching elements with CuCr and CuBi contacts.

Keywords: Vacuum switching element; switching operation; pre-breakdown parameter; breakdown voltage; correlation; regression.

Scientific field: Mechanical Engineering.

Special topic: Technical Physics.

UDC number: 621.3.015.5

SADRŽAJ

UVOD.....	1
1. OSOBINE DIELEKTRIČNIH MATERIJALA.....	6
1.1. Proboj gasova.....	9
1.2. Elementarni procesi električnog pražnjenja u gasovima.....	9
1.3. Električni proboj gasova.....	10
1.4. Pašenov zakon.....	15
1.4.1. Anomalni Pašenov efekat.....	17
1.5. Dinamika električnog proboja gasa.....	18
1.6. Proboj vakuuma.....	20
2. VAKUUMSKI PREKIDAČI.....	25
2.1. Uticaj sklopnih operacija na karakteristike vakuumskih prekidača.....	34
2.1.1. Uticaj zavarivanja kontakata.....	35
2.1.2. Dielektrične karakteristike kontakata nakon sklopnih operacija koje dovode do zavarivanja.....	36
2.1.3. Dielektrične karakteristike kontakata nakon prekidanja luka.....	38
3. ODABRANE TEORIJSKE FUNKCIJE RASPODELE.....	40
3.1 Osnove korelacije i regresije.....	41
3.1.1 Ocena koeficijenta korelacije.....	45
3.1.2 Ocena regresionih pravih.....	47
3.2 Poređenje uzoraka u pogledu zajedničke populacije.....	49
3.3. U test (poređenje dva uzorka bez raspodele).....	50
3.4. <i>F</i> test (poređenje dve empirijske varijanse).....	51
4. EKSPERIMENT, EKSPERIMENTALNI POSTUPAK I OBRADA EKSPERIMENTALNIH REZULTATA.....	52
4.1. Eksperiment I, eksperimentalni postupak i obrada eksperimentalnih rezultata.....	53
4.1.1. Opis aparature i postupak određivanja Bragove krive.....	53
4.1.2. Eksperimentalni postupak.....	55
4.1.3. Obrada eksperimentalno dobijenih rezultata.....	56

4.1.4. Merenje probojnog napona.....	58
4.1.5. Eksperimentalni postupak.....	60
4.1.6. Obrade eksperimentalno dobijenih rezultata.....	60
4.2. Eksperiment II, eksperimentalni postupak i obrada eksperimentalnih rezultata.....	61
4.2.1. Ispitni vakuumski sklopni elementi.....	61
4.2.2. Podešavanje rastojanja kontakata.....	62
4.2.3. Pogon prekidača.....	63
4.2.4. Izolovanje sklopnih komora od vanjskih preskoka.....	63
4.2.5. Visokonaponski izvori.....	64
4.2.5.1. Izvor impulsnog napona.....	65
4.2.5.2. Izvor naizmjeničnog napona.....	65
4.2.5.3. Izvor jednosmernog napona.....	66
4.2.5.4. Elektronski uređaj za automatsko isključenje ispitnog trafoa.....	66
4.2.5.5. Izvor velike struje.....	68
4.2.6. Merni uređaji.....	68
4.2.6.1. Merenje visokog napona.....	69
4.2.6.2. Merenje napona i struje električnog luka.....	69
4.2.6.3. Merenje emisione struje.....	70
4.2.6.4. Registrovanje mernih signala.....	70
4.2.7. Zaštita od X-zračenja.....	71
4.2.8. Šema ispitnih krugova.....	72
4.2.9. Eksperimentalni postupak.....	75
4.2.10. Obrada eksperimentalno dobijenih rezultata.....	77
5. REZULTATI I DISKUSIJA.....	78
5.1. Rezultati i diskusija eksperimenta I.....	79
5.2. Rezultati i diskusija za eksperiment II	93
5.2.1. Kondicionirani kontakti	94
5.3. Rezultati i diskusija za eksperiment Iib.....	99
5.3.1. Kondicionirani kontakti.....	99

6. ZAKLJUČAK.....	110
7. LITERATURA.....	114

UVOD

UVOD

Teoretski vakuum je prostor bez mehaničkih osobina. Tako teoretski vakuum je, za sada, nemoguće ostvariti. Zbog toga se, za praktične potrebe, koristi tehnički vakuum. Tehnički vakuum se definiše kao sistem u kojem je srednja slobodna dužina puta slobodnih čestica veća od karakteristične dimenzije tog sistema. Takav tehnički vakuum se, u inženjerskoj praksi, postiže primenom mehaničkih, molekularnih i difuznih vakuum pumpi priključenih na vakuumsku komoru. Da bi se osobine vakuuma mogle koristiti na duži vremenski period vakuumske komore trebaju biti ili dobro obezbeđene od curenja (statički vakuum) ili stalno priključene na sisteme za vakuumiranje (dinamički vakuum). Međutim, bez obzira da li se vakuumska komora koristi kao statička komora ili kao dinamička ona predstavlja potencijalnu opasnost u sklopu unutar kojeg se koristi pošto može doći do implozije.

U elektrotehnici se vakuum najčešće koristi kao dielektrik pošto je on, u tom smislu, skoro idealan. Naime, u vakuumu ne može da dođe do samoodržavajućeg lavinskog procesa, odnosno do električnog proboja. Međutim, ovo razmatranje nije u potpunosti tačno, jer iako nije moguće ostvariti električni proboj vakuuma, moguće je ostvariti proboj vakuumske dielektrike (razlika između dielektrika i dielektrike je što dielektriku čine dielektrik i elektrodni sistem). Do električnog proboja vakuumske dielektrike dolazi klasičnim lavinskim mehanizmom u isparenom materijalu elektroda koje su, prethodno, dovedene u termički nestabilno stanje. Termička nestabilnost elektroda vakuumske dielektrike može se izazvati Džulovim efektom struje hladne emisije ili mikrodelića elektrodnog materijala ubrzanih električnim poljem. I pored mogućnosti električnog proboja vakuuma, što nije potpuno istraženo, vakuum predstavlja dielektrik najboljih karakteristika sa aspekta tehničke primene.

Ipak vakuum nije često u praktičnoj primeni kao dielektrik zbog praktičnih problema, koji prate njegovo korišćenje. Jedan od najčešćih električnih aparata sa vakuumskom dielektrikom su vakuumski komutacioni aparati i pribori koji obuhvataju

široku paletu proizvoda, od kontaktora malih dimenzija do energetskih automatskih prekidača na niskonaponskom ili visokonaponskom nivou.

Visokonaponski vakuumski prekidači imaju prednost nad drugim, odgovarajućim, tipovima prekidača pošto mogu da vrše prekidanje struje i kada ona nije u nuli. Ta osobina, koja se neretko koristi, za posledicu ima čestu pojavu luka tokom operacije rasklopa. Ove pojave mogu dovesti do drastičnih promena topografija kontaktnih površina pa, samim tim, i vrednosti probojnog napona prekidača otvorenih kontakata. Imajući to u vidu može se konstatovati da dielektrika vakuumskih prekidača manifestuje visoku reverzibilnost dielektričkih svojstava tokom eksploatacije. Samim tim nije moguće eksperimentalno formirati reprezentativni uzorak, tj. uzorak sa prihvatljivom statističkom nesigurnošću, slučajne promenljive probojni napon vakuumskih prekidača nakon sklopno-rasklopne operacije. Posledica toga je nedovoljno pouzdano poznavanje vrednosti probojnog napona nakon operacije rasklopa, što je ujedno jedna od kritičnih karakteristika prekidača uopšte (tj. najgori mogući događaj za prekidač u praksi je proboj/provođenje u rasklopu). Da bi se takva mogućnost isključila, uz zadržavanje optimalnih međukontaktne rastojanja u stanju rasklopa, potrebno je moći predvideti vrednost probojnog napona.

Predmet ovog rada je ispitivanje mogućnosti predviđanja vrednosti probojnog napona međukontaktne rastojanja merenjem emisije struje između razmaknutih kontakata, uz uzimanje u obzir prethodne sklopne operacije i materijala kontakata kao parametar. To je rađeno na osnovu hipoteza: 1) Emisioni mehanizmi proboja vakuuma se zasnivaju na dovođenju katode ili anode vakuumske dielektrike u stanje termičke nestabilnosti Džulovim efektom na mikrošiljcima kroz koje protiče struja hladne emisije. Na osnovu toga se može očekivati da postoji korelacija između vrednosti emisije struje i probojnog napona u slučaju da je prethodno izvršena sklopna operacija uklop bez struje-rasklop bez struje. Naime, kao što je rečeno, tokom ove sklopne operacije treba očekivati zavarivanje kontakata i kidanje varova na kontaktima, što dovodi do formiranja većeg broja mikrošiljaka (potencijalnih izvora emisije struje) na kontaktima (i anodnom i katodnom), 2) Prilikom sklopne operacije uklop bez struje-rasklop sa nominalnom strujom je za očekivati kombinovani mehanizam proboja međukontaktne rastojanja. Naime, tokom te sklopne operacije je moguće da nominalna struja kondicionira kontaktne površine i

mikrošiljke nastale kidanjem varova, pretvori ih u kapljice koje su delom slobodne pa učestvuju u emisionoj struji mehanizmom mikrodelića koji se superponira sa strujom hladne emisije iz mikrošiljaka koji nisu istopljeni procesom kondicioniranja, 3) Prilikom sklopne operacije uklop bez struje-rasklop sa strujom kratkog spoja može se očekivati slična situacija kao i u predhodnom slučaju samo uz mnogo veći doprinos mehanizma mikrodelića iz razloga što je struja kratkog spoja višestruko veća od nominalne struje.

Tokom istraživanja su primenjene teorijske metode, eksperimentalne metode i statističko-numeričke metode. Teoretske metode su primenjene za postavljanje hipoteza i tumačenje dobijenih rezultata. Eksperimentalne metode su primenjene za dobijanje statističkih uzoraka slučajnih promenljivih pretprobojni parametar V_{-4} , V_{-5} i V_{-6} (tj. vrednosti dc napona pri kojima su međuelektrodne struje 10^{-4} , 10^{-5} i 10^{-6} A) i slučajne promenljive probni napon nakon izvođenja sklopnih operacija uklop bez struje – rasklop bez struje, uklop bez struje – rasklop sa nominalnom strujom i uklop bez struje – rasklop sa strujom kratkog spoja, kao i za istraživanje i razgraničavanje između različitih mehanizama proboja vakuuma na laboratorijskim uzorcima. Eksperimenti su vršeni po dobro kontrolisanim laboratorijskim metodama na diodnim konfiguracijama sa mogućnošću promene parametara vakuumske dielektrike i na četiri vrste komercijalnih vakuumskih prekidača sa CuCr i CuBi kontaktima. Za sve eksperimentalne postupke se težilo da kombinovana nesigurnost bude manja od 5%. Statističko – numeričke metode su primenjene za određivanje korelacije i regresije između statističkih uzoraka pretprobojnih parametara i probojnih napona uz tip sklopne operacije kao parametar.

U skladu sa tim rad se sastoji iz uvoda u kome je predstavljen problem koji se želi rešiti, cilj istraživanja i metodologija istraživanja koja se namerava primeniti. U prvom poglavlju (Osobine dielektričnih materijala) su date teoretske osnove električnog pražnjenja u gasovima i vakuumu. Ovo poglavlje je podeljeno na podpoglavlja: proboj gasova, elementarni procesi električnog pražnjenja u gasovima, Pašenov zakon, anomalni Pašenov efekat, dinamika električnog proboja gasa i proboj vakuuma. Drugo poglavlje (Vakuumski prekidači) obrađuje primenu vakuuma za izradu komutacione opreme i prednosti i probleme vezane za tu primenu. U ovom poglavlju je, takođe, dat pregled predhodnih istraživanja uticaja sklopnih operacija na ireverzibilnost dielektričnih osobina vakuumske

dielektrike. U trećem poglavlju (Odabrane teorijske funkcije raspodele) su date osnove matematičke statistike, statističke organizacije eksperimenata, a poseban akcenat je stavljen na relacije korelacije i regresije. Četvrto poglavlje (Eksperiment, eksperimentalni postupak i obrada eksperimentalnih rezultata) opisuje eksperimentalni postupak i podeljeno je na dva dela. U prvom delu je opisana oprema, eksperimentalni postupak i postupak obrade eksperimentalnih podataka vezanih za eksperimente na laboratorijskim uzorcima. U drugom delu je opisana oprema, korišćena za eksperimente na komercijalnim vakuumskim prekidačima. U petom poglavlju su prikazani i diskutovani dobijeni rezultati. U ovom poglavlju je učinjen napor da se, makroskopski, dobijeni rezultati objasne sa aspekta elementarnih procesa električnog pražnjenja u vakuumu. U zaključku disertacije su sumirani dobijeni rezultati i date preporuke kako za njihovu primenu i inženjersku praksu tako i za dalje moguće istraživanje u ovoj oblasti.

1. OSOBINE DIELEKTRIČNIH MATERIJALA

1. OSOBINE DIELEKTRIČNIH MATERIJALA

Osnovna karakteristika dielektrika je njihova sklonost ka polarizaciji pod dejstvom električnog polja, po čemu se razlikuju od provodnika, kod kojih električno polje dovodi do prenosa mase i energije. Osobine koje su zajedničke svim dielektricima su vrednost specifične električne otpornosti od $10^6 \Omega\text{m}$ do $10^{18} \Omega\text{m}$, i širina zabranjene zone veća od 3,5 eV.

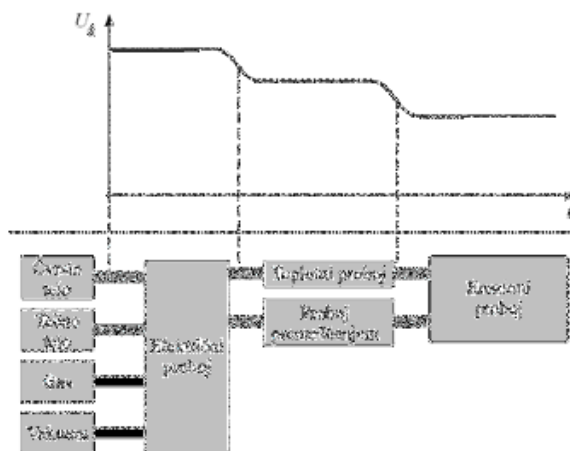
Najvažniji električni parametri dielektrika su: relativna dielektrična konstanta, faktor dielektričnih gubitaka, specifična unutrašnja i specifična površinska električna otpornost, kao i dielektrična čvrstoća. Ove osobine, kojima se karakterišu dielektrični materijali, posledica su njihovih fizičkih osobina i od presudnog su značaja, naravno pored odgovarajućih neelektričnih osobina, prilikom izbora nekog dielektričnog materijala za konkretnu namenu. Najvažniji faktori koji utiču na ove osobine su frekvencija, temperatura, vreme, vlažnost i mehaničke deformacije.

Dielektrična čvrstoća predstavlja minimalnu vrednost homogenog električnog polja pri kojoj dielektrični materijali gube svoju osnovnu karakteristiku da razdvajaju potencijale, odnosno pri kojoj se kroz njih ostvaruje kratak spoj. Ova pojava se naziva proboj dielektrika. U praksi se dielektrična čvrstoća određuje eksperimentalno, tako što se dielektrik, između elektroda koje obezbeđuju pseudohomogeno električno polje¹, opterećuje sporo rastućim jednosmernim naponom dok se ne desi proboj. Tako definisana dielektrična čvrstoća se odnosi isključivo na trenutni proboj, odnosno čisto električni proboj dielektričnih materijala.

¹ Pseudohomogeno električno polje se koristi da bi se izbegli ivični efekti. Najčešće se koriste elektrode profila Rogovskog, koje, pri jednom određenom međuelektrodnom rastojanju, svojom konturom prate liniju potencijala na kojoj se nalaze.

Sa stanovišta primene dielektričnih materijala, njihova najvažnija osobina je proboj dielektrika. Do proboja dielektrika dolazi kada se intezitetom ili trajanjem spoljašnjeg električnog polja u njemu pokrenu provodni mehanizami. Tako nastaje trenutni ili odloženi proboj dielektrika.

Do odloženog proboja dielektrika može da dođe samo u slučaju kada je on u čvrstom ili tečnom agregatnom stanju. U slučaju dielektrika u čvrstom agregatnom stanju, ova vrsta proboja je povezana sa procesom zagrevanja materijala dejstvom električnog polja, pa je u pitanju termički proboj. U slučaju dielektrika u tečnom agregatnom stanju, ova vrsta proboja se naziva proboj premošćenjem. Ako pri probouju nekog dielektrika znatan efekat imaju procesi starenja, onda se odloženi proboj naziva erozioni proboj. U slučaju dielektrika u gasnom agregatnom stanju ili vakuumu, do proboja dolazi samo električnim mehanizmima, što znači da je on praktično nezavisan od trajanja naponskog naprezanja. Na Slici 1.1 prikazana je zavisnost probojnog napona od trajanja naponskog naprezanja, uz odgovarajuće probojne mehanizme.



Slika 1.1. Zavisnost probojnog napona U_d od trajanja naponskog naprezanja (t)
(prema P. Osmokrović [1])

Dielektrični materijali se, prema ponašanju nakon dielektričnog proboja, dele na reverzibilne i ireverzibilne. Reverzibilni dielektrici nakon proboja u potpunosti vraćaju svoja dielektrična svojstva. Ireverzibilni dielektrici nakon dielektričnog proboja povrate

delimično svoja dielektrična svojstva, ili ih nepovratno gube. Gasovi i vakuum su reverzibilni, a tečnosti i čvrsta tela ireverzibilni dielektrici.

Mikroskopski mehanizmi fenomena koji se makroskopski manifestuju kao električni proboj najviše zavise od agregatnog stanja dielektrika [1].

1.1. PROBOJ GASOVA

Gasovi su, bez izuzetka, u svom osnovnom stanju dielektrični materijali. Oni su, ujedno, i najrasprostranjeniji dielektrici sa aspekta primene u elektrotehnici. Pored toga, sam mehanizam električnog proboja gasova je teorijski objašnjen, a i mehanizmi proboja dielektričnih materijala u drugim agregatnim stanjima uglavnom se zasnivaju na mehanizmu električnog proboja gasova.

1.2. ELEMENTARNI PROCESI ELEKTRIČNOG PRAŽNENJA U GASOVIMA

Jonizacija elektronima je osnovni elementarni proces svih električnih pojava u gasovima. Javlja se kao rezultat sudara elektrona sa molekulima ili atomima gasa, čime se stvaraju pozitivni joni i novi elektroni². Da bi došlo do jonizacije elektronima, potrebno je da energija slobodnih elektrona bude veća od energije veze elektrona u molekulima, odnosno atomima gasa. Sama verovatnoća jonizacije elektronima je složena funkcija parametara kvantnomehaničkog sistema "slobodni elektron - molekul gasa". Ako su gasovi elektronegativni, odnosno radi postizanja stabilnosti molekulske strukture pokazuju afinitet ka zahvatanju elektrona, u njima jedan deo slobodnih elektrona biva zahvaćen neutralnim molekulima. Na taj način dolazi do zamene lako pokretljivih elektrona teško pokretljivim negativnim jonima. Proces jonizacije elektronima, kao i zahvat slobodnog elektrona od strane elektronegativnog molekula gasa, nazivaju se primarni elementarni procesi električnog pražnjenja u gasovima.

² U svakom gasu postoji veliki broj slobodnih elektrona i jona nastalih jonizujućim procesima izazvanim kosmičkim zračenjem i sudarima molekula u termičkom kretanju. Koncentracija ovih slobodnih elektrona i jona uravnotežena je rekombinujućim procesima.

Pored navedenih primarnih, postoje i sekundarni elementarni procesi električnog pražnjenja u gasovima. Sekundarni elementarni procesi su od presudnog značaja za uspostavljanje efekta samoodržanja probajnog procesa. Oni se dele na procese aktivne na elektrodama (jonsko izbijanje, fotoemisija, izbijanje metastabilom) i na procese aktivne u gasu (jonizacija pozitivnim jonima, fotojonizacija, jonizacija metastabilom).

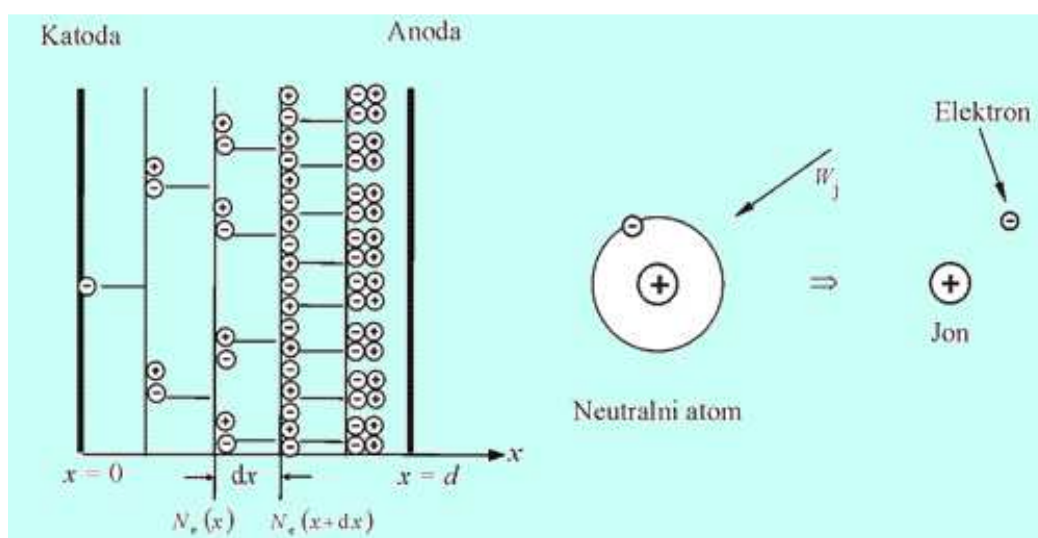
Pri stvaranju modela električnih pražnjenja u gasovima, elementarni procesi se opisuju preko lavinskih koeficijenata, α , η i γ . Ti koeficijenti, često nazvani i Tauzendovi koeficijenti, dele se, prema procesu koji opisuju, na primarne (α, η) i sekundarne (γ). Primarni Tauzendovi koeficijenti se definišu na sledeći način: α , ili koeficijent jonizacije, predstavlja broj elektrona nastalih jonizujućim procesom po jedinici puta slobodnog elektrona u pravcu polja, a η , ili koeficijent pripajanja, predstavlja broj elektrona po jedinici puta u pravcu polja pripojenih elektronegativnim molekulima. Sekundarni Tauzendov koeficijent, γ , predstavlja ukupan elektronski prinos sekundarnim procesima električnog pražnjenja u gasovima po jednoj primarnoj jonizaciji.

Ovako definisani lavinski koeficijenti nemaju konstantnu vrednost, već se menjaju u zavisnosti od vrste gasa, električnog polja i pritiska. Sekundarni lavinski koeficijent može da zavisi i od materijala elektroda i topografije njihovih površina. Zavisnost lavinskih koeficijenata od pomenutih parametara je data semiempirijskim izrazima [1], [2].

1.3. ELEKTRIČNI PROBOJ GASOVA

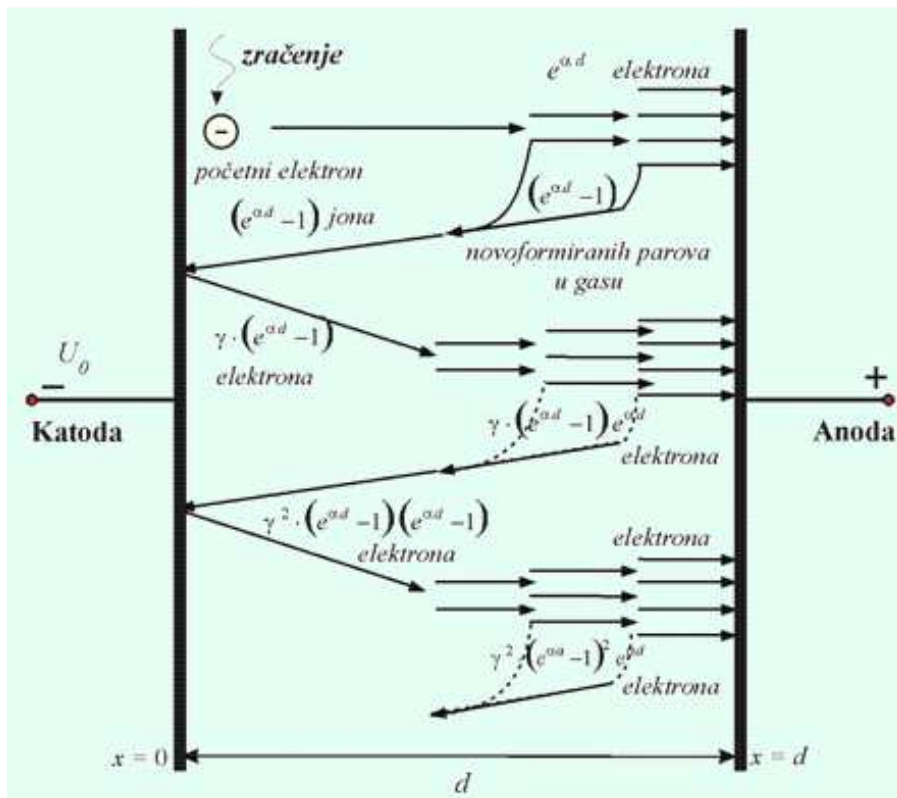
Gasovi pod normalnim uslovima sadrže, pored neutralnih molekula, odnosno atoma, slobodne elektrone i jone. Ako se u gasu uspostavi spoljašnje električno polje, doći će do usmerenog kretanja elektrona i jona po pravcu polja, pri čemu elektroni, kao mnogo lakše čestice, preuzimaju nesrazmerno više energije između dva sudara. Ukoliko jedan slobodni elektron, na srednjoj slobodnoj dužini puta između dva sudara sa neutralnim molekulom ili atomom, preuzme od električnog polja dovoljno energije da pri sudaru izvrši jonizaciju, on postaje inicijalni elektron. U prvom sudaru formira novi jonsko-elektronski par, to jest još jedan slobodni elektron. Nakon sledeće srednje slobodne dužine puta, ta dva

slobodna elektrona formiraju još dva nova elektrona, i tako dalje geometrijskom progresijom dolazi do lavinskog procesa, Slika 1.2. Pljusak elektrona na anodi, nastao ovakvom primarnom lavinom, ne predstavlja i proboj gasa. Tek ako se po svakoj lavini sekundarnim elementarnim procesima formira dovoljan broj sekundarnih inicijalnih elektrona, električno pražnjenje u gasu postaje samoodržavajuće, što može, eventualno, dovesti do proboja gasa, Slika 1.3.



Slika 1.2. Nastajanje lavine elektrona udarnom elektronskom jonizacijom
(prema P. Osmokrović [1])

Sam električni proboj gasa može da se odvija prema dva različita mehanizma, u zavisnosti od toga jesu li dominantni sekundarni procesi električnog pražnjenja na elektrodama ili u gasu. Ako su dominantni sekundarni procesi na elektrodama, radi se o Tausendovom mehanizmu proboja gasa, koji je karakterističan za potpritiske gasa i mala međuelektrodna rastojanja. Ako su dominantni sekundarni procesi u gasu, radi se o strimerskom mehanizmu proboja, koji je karakterističan za natpritiske i veća međuelektrodna rastojanja. Granica između Tausendovog i strimerskog mehanizma proboja nije oštra, i u graničnoj oblasti se električni proboj odvija kombinacijom ova dva mehanizma.



Slika 1.3. Uz tumačenje Tausendovog mehanizma proboja
(prema P. Osmokrović [1])

Pri stvaranju matematičkog modela električnog pražnjenja u gasovima, obično se uzima slučaj elektronegativnog gasa, kao opštiji slučaj. Tada, po jedinici puta inicijalnog elektrona, u pravcu polja nastaje α jonsko-elektronskih parova, čijih se η elektrona pripaja elektronegativnim molekulima. Nakon pređenog puta x , prema anodi, jedan inicijalni elektron generiše $n(x)$ elektrona, čiji se broj na sledećem elementu puta uveća za:

$$dn(x) = n(x)(\alpha - \eta) dx = n(x) \bar{\alpha} dx \quad (1.1)$$

gde je $\bar{\alpha} = (\alpha - \eta)$ koeficijent neto jonizacije.

Rešavanjem diferencijalne jednačine (1.1), dobija se broj slobodnih elektrona, $n(x)$, i pozitivnih jona, $n^+(x)$, u tački x :

$$n(x) = e^{\bar{\alpha} x} \quad (1.2)$$

$$n^+(x) = \frac{\alpha}{\bar{\alpha}} [e^{\bar{\alpha} x} - 1] \quad (1.3)$$

U slučaju da se proboj odvija Tauzendovim mehanizmom, samoodržanje procesa se zasniva na izbijanju sekundarnih inicijalnih elektrona sa katode pozitivnim jonima. Prema tom mehanizmu, u trenutku kada primarna elektronska lavina posle pređenog puta, jednakog međuelektrodnom rastojanju d , stigne na anodu, sekundarni mehanizmi na katodi generišu $\gamma n^+(d)$ sekundarnih inicijalnih elektrona. Velikim brojem tako generisanih lavina, na anodu stiže:

$$n = \sum_{k=0}^{\infty} \left[\gamma \frac{\alpha}{\bar{\alpha}} (e^{\bar{\alpha}d} - 1) \right]^k e^{\bar{\alpha}d} \quad (1.4)$$

elektrona, odnosno, uz uslov konvergentnosti ovog reda:

$$n = \frac{e^{\bar{\alpha}d}}{\left[1 - \gamma \frac{\alpha}{\bar{\alpha}} (e^{\bar{\alpha}d} - 1) \right]} \quad (1.5)$$

Iz relacije (1.5) se, za uslov električnog proboja gasa Tauzendovim mehanizmom, dobija izraz:

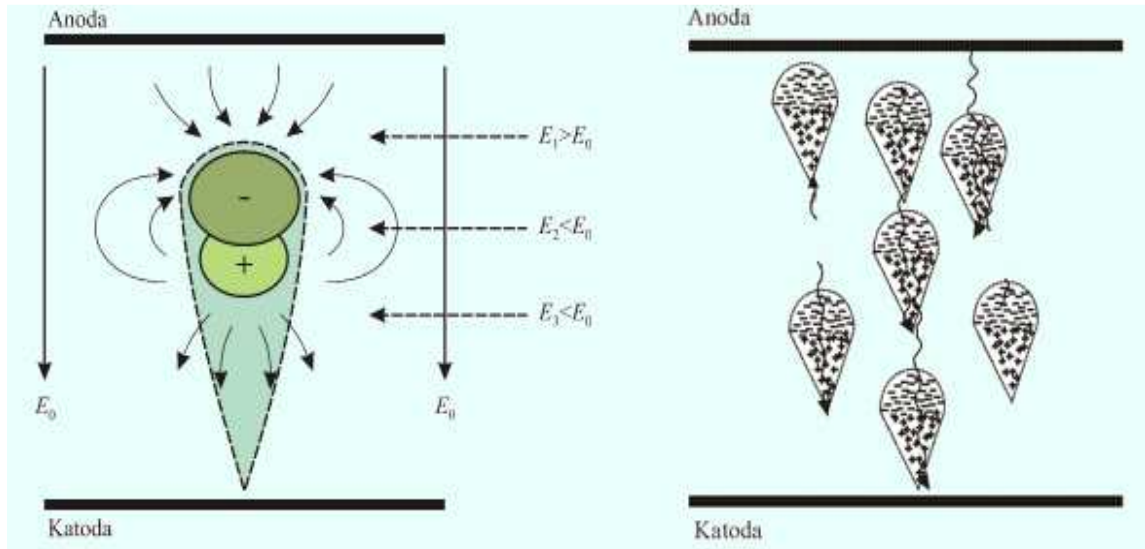
$$\gamma \frac{\alpha}{\bar{\alpha}} (e^{\bar{\alpha}d} - 1) = 1 \quad (1.6)$$

Prilikom izvođenja uslova za proboj gasa Tauzendovim mehanizmom, pretpostavljeno je da inicijalni elektron na svakoj srednjoj slobodnoj dužini puta između dva sudara od polja preuzima isti iznos energije. Ova pretpostavka je opravdana samo za slučaj homogenog električnog polja. U slučaju da električno polje u međuelektrodnom prostoru nije homogeno, uslov za električni proboj Tauzendovim mehanizmom postaje:

$$\gamma \int \alpha e^{\int \bar{\alpha} dx} dx = 1 \quad (1.7)$$

Za razliku od Tauzendovog mehanizma proboja gasa, prema kome proboj nastupa tek kada se gustina elektrona izazvana sekundarnim procesima izjednači sa gustom elektrona primarne lavine, nezavisno od njene vrednosti, proboj strimerskim mehanizmom biva izazvan samo jednom lavinom. Do ovoga efekta dolazi kada količina naelektrisanja u primarnoj lavini dostigne dovoljno veliku vrednost da se usled nje bitno poveća polje u

pravcu katode, pa da elektroni, nastali fotojonizacijom, mogu biti privučeni od pozitivnih jona lavine pre nego što se ovi pokrenu, Slika 1.4.



Slika 1.4. Uz tumačenje strimerskog mehanizma (prema P. Osmokrović [1])

Tako izazvano prividno kretanje pozitivnih jona formira u međuelektrodnom prostoru uzane provodne kanale, strimere, koji se brzinom od 10^6 m/s kreću prema katodi. Stizanjem jednog strimera na katodu, premošćuje se međuelektrodni prostor, i kroz tako uspostavljeni strimerski most poteče struja. Ta struja, Džulovim efektom, izaziva termojonizaciju u kanalu strimera, čime visokootporni strimer pređe u plazma-stanje, i nastupa električni proboj.

Fenomen strimerskog pražnjenja ima egzaktan matematički model, koji se ne zasniva na eksperimentalnim opažanjima. Uvažavajući činjenicu da prostornim naelektrisanjem izazvano električno polje mora biti bar istog reda veličine kao i spoljašnje polje, može se zaključiti da do proboja gasa ovim mehanizmom dolazi ako je koncentracija elektrona u primarnoj lavini veća od 10^5 cm⁻³. Ovaj zahtev je ispunjen ako je:

$$\int_0^d \bar{\alpha} dx = 10,5 \quad (1.8)$$

1.4. PAŠENOV ZAKON

U mnogim oblastima inženjerske prakse "zakoni sličnosti"³ pružaju mogućnost da se u fazi konstrukcije jednog sistema osobine originala ispituju na odgovarajućim modelima. Primena ovih zakona je, takođe, od posebnog značaja u oblastima prirodnih nauka u kojima se tražene veličine ne mogu odrediti, ili je postupak njihovog numeričkog proračuna veoma složen [2], [3]. Sličnost koja se u postupku koristi predstavlja proporcionalnost dve istorodne fizičke veličine (predstavljene istom diferencijalnom jednačinom) u dva geometrijski slična sistema sa funkcionalno zavisnim koeficijentima proporcionalnosti. Takve fizičke osobine se nazivaju analogne osobine.

U slučaju električnog pražnjenja u gasovima, osnovni uslov za važenje zakona sličnosti je ispunjen, pošto je pražnjenje uslovljeno potencijalnim poljem u gasu, do čije vrednosti se dolazi rešavanjem Laplasove diferencijalne jednačine:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (1.9)$$

Dva elektrodna sistema izolovana gasom se mogu smatrati sličnim u slučaju upotrebe istog gasa, istih konstrukcionih materijala i konstantnih međusobnih geometrijskih odnosa (među koje se ubraja i srednja slobodna dužina puta elektrona) [4].

Najpoznatija posledica zakona sličnosti, primenjenog na oblast gasnih pražnjenja, je Pašenov zakon [5] [6]. Po tom zakonu, električno gasno pražnjenje u homogenom električnom polju jednoznačno zavisi od proizvoda pritiska i međuelektrodnog rastojanja⁴. Ovaj stav se lako dokazuje polaganjem od jednačine gasnog stanja:

$$pV = \frac{m}{M} RT \quad (1.10)$$

Nakon deljenja izraza zapreminom V , jednačina (1.10) prelazi u oblik:

$$p = \rho \frac{RT}{M} \quad (1.11)$$

³ Često se za zakone sličnosti sreće i naziv "zakon modela".

⁴ U uopštenoj formi Pašenov zakon važi i za nehomogene elektrodne konfiguracije.

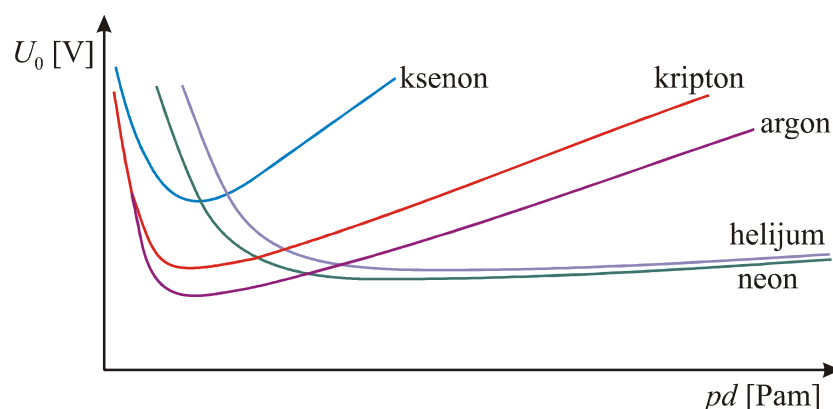
gde je ρ –gustina posmatranog gasa. Pošto je ρ obrnuto proporcionalna srednjoj slobodnoj dužini puta elektrona, λ , sledi:

$$p \lambda = const \quad (1.12)$$

a kako prema zakonu sličnosti odnosi geometrijskih veličina moraju biti konstantni, uključujući srednju slobodnu dužinu puta elektrona λ , dobija se:

$$pd = const \quad (1.13)$$

gde je d –međuelektrodno rastojanje.



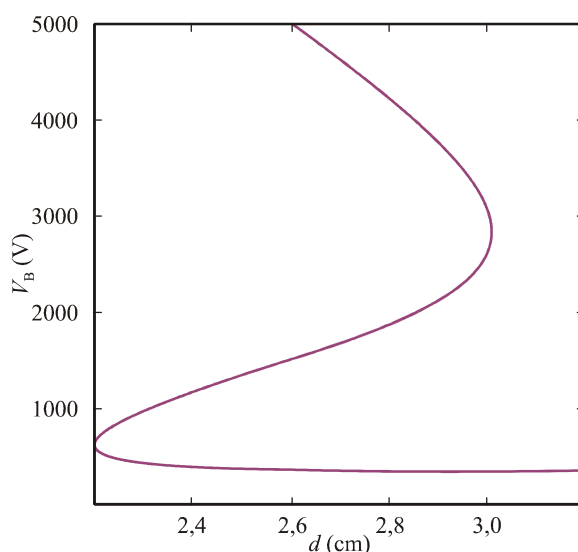
Slika 1.5. Pašenove krive za različite plemenite gasove (prema S. Brown [7])

Odavde sledi da je proizvod pritiska i međuelektrodnog rastojanja nezavisna promenljiva u slučaju električnog pražnjenja u gasovima. Taj zaključak ima za praktičnu posledicu mogućnost smanjivanja dimenzija sistema izolovanih gasom proporcionalno povećanju pritiska.

Zavisnost probojnog napona nekog gasa u homogenom električnom polju od proizvoda pd naziva se Pašenov kriva. Odgovarajuća kriva (Slika 1.5) ima oblik nesimetrične U – krive sa minimumom (Pašenov minimum), za sve gasove, u oblasti vrednosti proizvoda pd reda 0,1 Pam. Do analitičkog izraza za Pašenovu krivu nekog gasa može se doći polazeći od Tauzendovog, odnosno strimerskog, uslova proboja i zavisnosti lavinskih koeficijenata od odnosa električnog polja i pritiska [1], [7], [8].

1.4.1. ANOMALNI PAŠENOV EFEKAT

Anomalni oblik Pašenove krive pri malim vrednostima pd nađen je u helijumu. Ovakav oblik ilustruje detalje uzajamnog dejstva zavisnosti γ i η od E/p . Efekat je prikazan na slici 1.



Slika 1.6. Anomalni Pašenov efekat (prema S. Brown [9])

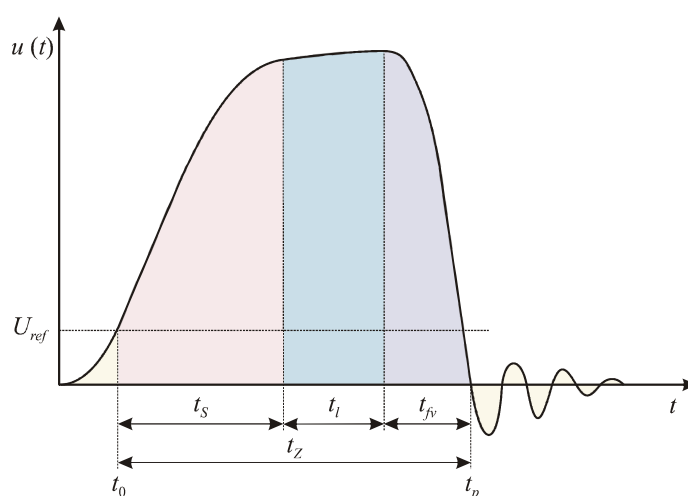
Na slici se vidi da za jedan opseg potencijalne razlike do proboja dolazi samo ako se napon snizi do određene vrednosti. Objašnjenje leži u činjenici da kod helijuma verovatnoća jonizacije elektronom ima maksimum pri energiji od oko 100 eV. Za vrednost E/p kojima odgovara veća energija elektrona u gasu, smanjenje razlike potencijala ne sprečava već olakšava proboj, ukoliko γ ostaje konstantno. Proizvod pd ima minimum kad je $dV_B/d(E/p) = V_B/(E/p)$. Ovaj uslov odgovara maksimumu η u funkciji od E/p , pri čemu γ ostaje konstantno. Pri većim vrednostima E/p , γ raste i kriva probojnog napona (V_B) na slici 1.6 ponovo savija pri $d = 3$ cm i $V_B = 3000$ V. U najvećem broju gasova povećanje γ maskira uticaj smanjenja η , i ovaj neobični oblik Pašenove krive se retko sreće [9].

Pored ovakvoga tumačenja anomalnog Pašenovog efekta postoji i drugo tumačenje koje se svodi na ivične efekte. Naime, kako je tokom eksperimentalnog postupka nemoguće ostvariti u potpunosti homogeno polje (takvo polje bi podrazumevalo primenu elektroda beskonačnih površina) i kako se eksperimentalni postupak snimanja Pašenovih krivih, po pravilu, vrši pri konstantnom međuelektrodnom rastojanju uz promenu pritiska dolazi, nakon prolaska kroz Pašenov minimum, da varnica bira put duž ivičnih linija polja, koje su duže od centralnih pa da se proboj odvija pri naponu u tački minimuma. Po tome tumačenju se jedan deo proboja odvija duž ivičnih linija polja, a drugi deo duž centralnih linija polja u zavisnosti od verovatnoće pojave slobodnog elektrona u odgovarajućoj kritičnoj zapremini. I ako je tako tumačenje anomalnog Pašenovog efekta, na prvi pogled, vrlo prihvatljivo ono, i pored više uspešno izvedenih eksperimenata u cilju njegove provere, još nije u potpunosti prihvaćeno [10-14]. U ovom radu prilikom proučavanja vakuumskih mehanizama proboja biće razmatran i ovaj aspekt tumačenja anomalnog Pašenovog efekta pošto, ako je to tumačenje tačno, ono spada u vakuumske mehanizme (srednja slobodna dužina puta je veća od međuelektrodnog rastojanja).

1.5. DINAMIKA ELEKTRIČNOG PROBOJA GASA

U dosadašnjem razmatranju pojave električnog proboja gasa nije vođeno računa o obliku naponskog opterećenja, već se smatralo da je električno polje, potrebno kao izvor energije elementarnim procesima električnog pražnjenja u gasovima, makroskopski nepromenljivo u međuelektrodnom prostoru. Ovakvim posmatranjem se dolazi do pojma statičkog (*dc*) proboja, koji, za praktične potrebe, biva realizovan sporo rastućom potencijalnom razlikom između elektroda. Međutim, česta pojava atmosferskih i komutacionih prenapona nameće potrebu za proučavanjem proboja kao posledice promenljivog električnog polja, sa brzinom promene uporedivom sa globalnom brzinom mikroskopskih fenomena električnog pražnjenja u gasovima, odnosno dinamičkog proboja. Za ispitivanje dinamičkog proboja gasa koristi se impulsni napon. Na Slici 1.7 je prikazan karakterističan oblik impulsnog napona kojim je ostvaren proboj gasa.

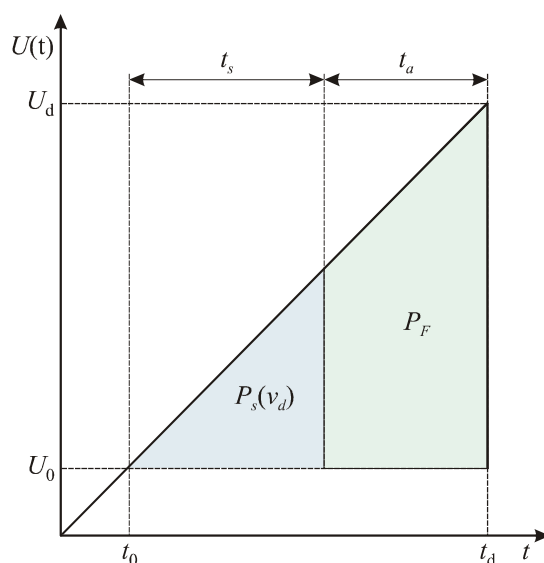
Sa t_s , na Slici 1.7, označeno je statističko vreme. Ono predstavlja vremenski period od prekoračenja minimalne vrednosti probojnog napona (statičkog napona koji se može odrediti numerički ili eksperimentalno) do pojave inicijalnog elektrona (slobodnog elektrona koji se nalazi na energetski povoljnom mestu, što mu omogućava pokretanje lavinskog procesa). Na istoj slici je sa t_l označeno vreme formiranja lavine, odnosno vreme koje počinje sa pojavom prve lavine, a završava početkom glavnog pražnjenja. Vreme potrebno za formiranje termalnog kanala varnice je na Slici 1.7 označeno sa t_{fv} , i naziva se formativno vreme.



Slika 1.7. Karakterističan oblik impulsnog napona kojim je ostvaren proboj
(prema P. Osmokrović [1])

Trenutak nastanka inicijalnog elektrona određen je verovatnoćom pojave slobodnog elektrona na energetski povoljnom mestu na kome može, duž srednje slobodne dužine puta, preuzeti od električnog polja energiju veću ili jednaku energiji jonizacije gasa. Iz toga proizlazi da je dinamički probojni napon stohastička veličina, za razliku od statičkog probojnog napona, koji je deterministička veličina. Za procenu vrednosti slučajne promenljive "dinamički probojni napon" neke dvoelektrodne konfiguracije izolovane gasom, koristi se takozvani zakon površine. On omogućava da se sa određenom pouzdanošću odredi oblast u naponsko-vremenskoj ravni, u kojoj se vrednost dinamičkog probojnog napona nalazi, bez obzira na oblik primenjenog impulsnog napona. Ta oblast se naziva impulsna karakteristika, i važan je pokazatelj ponašanja gasne izolacije.

Sam zakon površina se zasniva na empirijskoj činjenici da je, bez obzira na oblik primenjenog naponskog impulsa $u(t)$, površina u naponsko-vremenskoj ravni između krivih $u = U_0$ i $u = u(t)$ konstantna, odnosno $P_F + P_S(v_d) = \text{const}$, Slika 1.8. Prema tome, moguće je, na osnovu merenja (ili numeričkog određivanja) statičkog probajnog napona i jedne serije dinamičkih probajnih napona poznatim naponskim impulsom, odrediti vrednost te površine, što omogućava da se za svaki drugi oblik impulsnog napona proračuna oblast unutar koje se, sa unapred određenom verovatnoćom, nalazi vrednost probajnog napona.



Slika 1.8. Linearna aproksimacija impulsnog napona kojim je ostvaren probaj (prema P. Osmokrović [1] i P. Osmokrović [4])

1.6. PROBOJ VAKUUMA

Teorijski, vakuum predstavlja prostor bez mehaničkih karakteristika. Međutim, činjenica je da se u vakuumu definišu osnovne elektromagnetne konstante (magnetna permeabilnost vakuuma i dielektrična permitivnost vakuuma), odnosno da vakuum ima elektromagnetne karakteristike. Prema tome, može se zaključiti da se vakuum ne može smatrati nematerijalnom sredinom, jer se materijalnost ne može svesti samo na mehanička svojstva, već su i elektromagnetna svojstva ravnopravan odraz materijalnosti prirode.

Teorijski vakuum, kao sredinu bez mehaničkih svojstava, za sada je praktično nemoguće ostvariti. Čak i u međuzvezdanom prostoru nedaleko od galaktičkih ravni postoji oko 10^6 atoma po m^3 . Najsavršenije vakuumske komore, do sada proizvedene, imaju gustinu rezidualnog gasa 10^9 molekula, odnosno atoma po m^3 . Poređenja radi, treba napomenuti da se u istoj zapremini vazduha pod normalnim atmosferskim prilikama nalazi $2,7 \cdot 10^{26}$ molekula. Zbog toga se, za praktične potrebe, definiše tehnički vakuum.

Tehnički vakuum predstavlja takav sistem u kome dužina slobodnog puta čestica premašuje karakteristične razmere tog sistema. Posledica ovakve definicije tehničkog vakuuma je da ista gustina materije može, istovremeno, da bude gas i vakuum, u zavisnosti od dimenzija sistema u kome se nalazi. Na primer, međuzvezdani prostor se može smatrati gasnom sredinom, jer su međuzvezdana rastojanja stotinak puta veća od slobodnog puta atoma i molekula u njemu.

U električnom pogledu, tehnički vakuum je idealan izolator, pošto je srednja slobodna dužina puta naelektrisanih čestica u njemu, po definiciji, veća od karakteristične razmere sistema (u ovom slučaju, od međuelektrodnog rastojanja). Posledica toga je da u vakuumu ne može da dođe do samoodržavajućeg lavinskog procesa, odnosno do električnog proboja.

Ovakvo razmatranje, međutim, nije u potpunosti tačno, jer iako nije moguće da se probije vakuum kao izolator, moguće je ostvariti električni proboj vakuumske izolacije (razlika između izolatora i izolacije je što izolaciju čine izolator i elektrodni sistem). Električni proboj vakuumske izolacije odvija se klasičnim lavinskim mehanizmom u isparenom materijalu elektroda. Do isparavanja materijala elektroda dolazi kada se bar jednoj elektrodi dovede dovoljno energije da se izazove njena termička nestabilnost, što dovodi do njenog delimičnog isparavanja u međuelektrodni prostor.

Termička nestabilnost jedne od elektroda elektrodnog sistema izolovanog vakuuomom može se izazvati emisionim putem, ili putem mikroskopskih delića elektrodnog materijala ubrzanih električnim poljem.

U osnovi svih emisionih mehanizama iniciranja proboja vakuumske izolacije je elektronska emisija. Elektronska emisija sa hladnih metalnih elektroda (hladna emisija) izaziva se električnim poljem na površini elektrode. Zahvaljujući električnom polju,

smanjuje se veličina potencijalne barijere na granici metal-vakuum, i elektroni, kvantnomehantičkim tunel-efektom, prolaze kroz barijeru. Električno polje potrebno za izazivanje hladne emisije može da se ostvari na mikrošiljcima elektrodnih površina. Takvi mikrošiljci mogu, lokalno, da povećaju makroskopsko električno polje više stotina puta. Elektroni emitovani sa mikrošiljaka formiraju struju elektronske emisije, koja dovodi do termičke nestabilnosti jedne ili obe elektrode. U zavisnosti od elektrode na kojoj prvo dolazi do termičke nestabilnosti, emisioni mehanizam iniciranja proboja vakuuma može biti katodni ili anodni [16-18].

Katodni mehanizam iniciranja proboja vakuuma nastaje kada vrednost emisione struje sa mikrošiljaka na katodi pređe određenu kritičnu vrednost, odnosno, kada lokalno električno polje na vrhu mikrošiljaka pređe određenu kritičnu vrednost. U tom trenutku dolazi do pozitivne povratne sprege između temperature mikrošiljaka Džulovim efektom, što izaziva porast emisione struje (i otpornost mikrošiljaka) i formiranje oblaka plazme iznad katode. Tako formiran oblak plazme (katodna plazma), dovodi do povećanja električnog polja na površini katode, izazivajući porast emisione struje. Ovako nastala emisiona struja većeg intenziteta dovodi do termičke nestabilnosti anode, rezultujući isparavanjem anodnog materijala i formiranjem oblaka plazma ispred anode (anodna plazma). Kada se katodna i anodna plazma dotaknu, premošćuje se međuelektrodni prostor i dolazi do lavinskog procesa i proboja izolacije. Prema ovom zakonu do termičke nestabilnosti mikroizbočine dolazi kada emisiona struja sa njenog vrha pređe određenu kritičnu vrednost [15], odnosno kada mikroskopsko polje na vrhu mikroizbočine pređe određenu "kritičnu vrednost".

Anodni mehanizam iniciranja proboja vakuuma nastaje usled sudara elektronskog snopa katodne emisione struje sa anodom, što dovodi do znatnog lokalnog zagrevanja na njoj. Deo koji se zagreva ovim putem naziva se anodna mrlja. Kada se anodna mrlja zagreje iznad temperature topljenja, dolazi do isparavanja materijala anode u međuelektrodni prostor, pri čemu katoda ostaje termički stabilna. Tako nastala termička nestabilnost anode se razvija dok gustina pare u međuelektrodnom prostoru ne postane dovoljna da se ispuni Tausendov uslov za lavinski proboj [10-21].

Značajna je uloga materijala u iniciranju proboja katodnim mehanizmom što je eksperimentalno potvrđeno. To je razumljivo, jer fizička svojstva materijala anode određuju, pored energije elektronskog snopa, topljenje anode. Ipak odlučujuća za anodni proboj je energija elektronskog snopa koju prima anoda. Sa povećanjem međuelektrodnog rastojanja nije potrebno linearno povećati napon da bi se dobila ista ova energija. Upravo zato za anodni proboj važi zavisnost od međuelektrodnog rastojanja slabija od linearne.

Na elektrodama u vakuumu se nalazi mnoštvo mikrodelića nastalih topljenjem materijala elektroda prethodnim probajima, sklopnim operacijama ili fabrikacijom elektrodnog sistema. Deo ovih mikrodelića je slabo, ili nikako, vezan za površine elektroda. Dovođenjem napona na elektrodni sistem, prisutni mikrodelići se naelektrišu mehanizmom elektrostatičke indukcije, nakon čega se, dejstvom elektrostatičkih sila, odvajaju od elektrodnih površina i ubrzavaju u međuelektrodnom prostoru. Nakon primene napona ti mikrodelići usled elektrostatičke indukcije poprimaju naelektrisanje i usled elektrostatičkih sila mogu biti otkinuti od površine elektroda i ubrzani u međukontaktom prostoru. Kada gustina pare materijala mikrodelića bude dovoljna za ispunjenje Tauzendovog uslova lavinskog proboja, dolazi do proboja vakuuma mehanizmom mikrodelića. Postoji više hipoteza o tome kako mikrodelić koji preleće međukontaktni razmak može da dovede do proboja [22], [23].

Ako mikrodelić ima dovoljno veliku brzinu, proboj nastaje nakon sudara mikrodelića sa elektrodom, tako što dolazi do kompletnog isparavanja materijala mikrodelića. Tako nastali oblak pare i plazma se šire i u nekom trenutku je u njemu proizvod pritisak-dijametar takav da pad napona na oblaku zadovoljava Pashenov kriterijum i tada nastaje lavinski proboj u oblaku pare, koji inicira i proboj celog razmaka. Međutim da bi mikrodelići imali posebnu energiju za svoje isparavanje, potrebno je da prilikom sudara imaju brzinu blisku brzini zvuka za materijal od koga se sastoje (a to je reda 5 km/s). Tako velike brzine se praktično ne sreću u tipičnim elektrodnim sistemima, tako da ova hipoteza nije objasnila mehanizam nastanka proboja koji deluje u elektrodnim sistemima. Latham [24] je uspostavio hipotezu prema kojoj se mikrodeliću nakon kvazielastičnog sudara, u kome je promenio i polaritet svog naelektrisanja, u ponovnom preletanju razmaka poveća kinetičku energiju iznad vrednosti koju je imao pre sudara. Ovaj

proces odbijanja od elektroda može ponoviti isti mikrodelić više puta, tako da može postići brzinu potrebnu za prethodno navedeni mehanizam proboja. Ovaj model je razmatran upravo zbog primene tog mehanizma na razmake sa malim naponom ($V < 15$ kV), gde je brzina koju dobija mikrodelić nakon jednostrukog prelaska razmaka relativno mala.

Hipoteza o lavinskom mehanizmu proboja [22] zasnovana je na pretpostavci o mogućnosti iniciranja reakcionog lanca u kome naelektrisana čestica preleće vakuumski razmak i prilikom sudara sa molekulima iz adsorbovanih slojeva gasa na elektrodama ili sa molekulima nečistoća formira više naelektrisanih čestica koje preleću vakuumski razmak u suprotnom smeru i opet svaka od njih jonizuje više čestica u međuelektrodnom prostoru i to može prerasti u gasni proboj.

Ukoliko reakcioni lanac krene proboj se vrlo brzo razvija (μ s). Nužni uslovi za delotvornost ovog mehanizma su postojanje adsorbovanih slojeva ili nečistoća na elektrodama i da je proizvod sekundarnih koeficijenata elektroda veći od 1. Do sada eksperimentalno nije dokazana ovako postavljena hipoteza o lavinskom mehanizmu proboja [22], [23]. U svakom slučaju lavinski proboj je moguć za sisteme koji nisu čisti.

U radovima [25], [26] i [27] autori su eksperimentalno pokušali da potvrde tačnost hipoteze o postojanju lavinskog mehanizma proboja vakuuma. U tim radovima su određene i granice između anomalnog Pašenovog efekta proboja vakuuma i katodnog odnosno anodnog mehanizma proboja vakuuma. Iako predložena potvrda o postojanju lavinskog mehanizma proboja vakuuma kao i postojanje, relativno, određenih granica između raznih mehanizama proboja u tačkama levo od Pašenovog minimuma deluje uverljivo ona treba da bude dodatno ispitana i potvrđena što će biti i jedan od rezultata ovog rada.

2. VAKUUMSKI PREKIDAČI

2. VAKUUMSKI PREKIDAČI

Za uključenje i isključenje strujnih kola pod opterećenjem i za automatsko uključenje, koriste se prekidači snage. Sama konstrukcija prekidača prilagođena je njihovoj osnovnoj nameni. Ovi prekidači mogu prekinuti strujni krug kako pri nominalnoj struji tako i pri struji kratke veze koja izaziva znatno dinamičko i termičko naprezanje prekidača i celokupne elektroopreme. Ovo nepoželjno naprezanje može se umanjiti tako što se prekidači prave sa kratkim vremenom isključenja. Prekidači se izrađuju za sve nominalne struje i napone koji se javljaju u eksploataciji [28], [29] .

Prekidači imaju veliki značaj u svakom energetsom postrojenju. Električni luk koji se javlja u toku prekidanja ili uspostavljanja strujnih krugova, odnosno dužina njegovog trajanja, intenzitet i način gašenja, uticao je na razvijanje mnogobrojnih konstrukcija koje su sve savršenije i pouzdanije. Najčešće su u upotrebi sledeći tipovi prekidača:

1. Uljni prekidači.
2. Malouljni prekidači.
3. Pneumatski (vazdušni) prekidači.
4. Prekidači sa magnetnim oduvavanjem luka.
5. Hidromatski prekidači (ekspanzioni).
6. Vakuumski prekidači.
7. Prekidači sa sumpor-heksafluoridom (SF₆-prekidači).

Kod ovih tipova prekidača, koristi se jedno ili više sredstava za gašenje električnog luka, kao što su povećanje razmaka između kontakata, podela električnog luka na više kratkih lukova, produženje luka delovanjem magnetnog polja, strujanje tečnosti i gasova uzdužno ili poprečno na električni luk, dodir luka sa dielektrikom i slično [28-31].

U gašenju luka mogu da učestvuju vazduh, komprimirani vazduh, ulje, gas, voda, vakuum, sumpo-heksafluorid i drugi medijumi.

U nekim konstruktivnim rešenjima, radni otpor luka može biti toliko veliki da ograničava struju kratkog spoja i povećava faktor snage, pa samim tim dovodi do pada povratnog napona. Predugo trajanje luka može dovesti do znatnih oštećenja kako prekidača

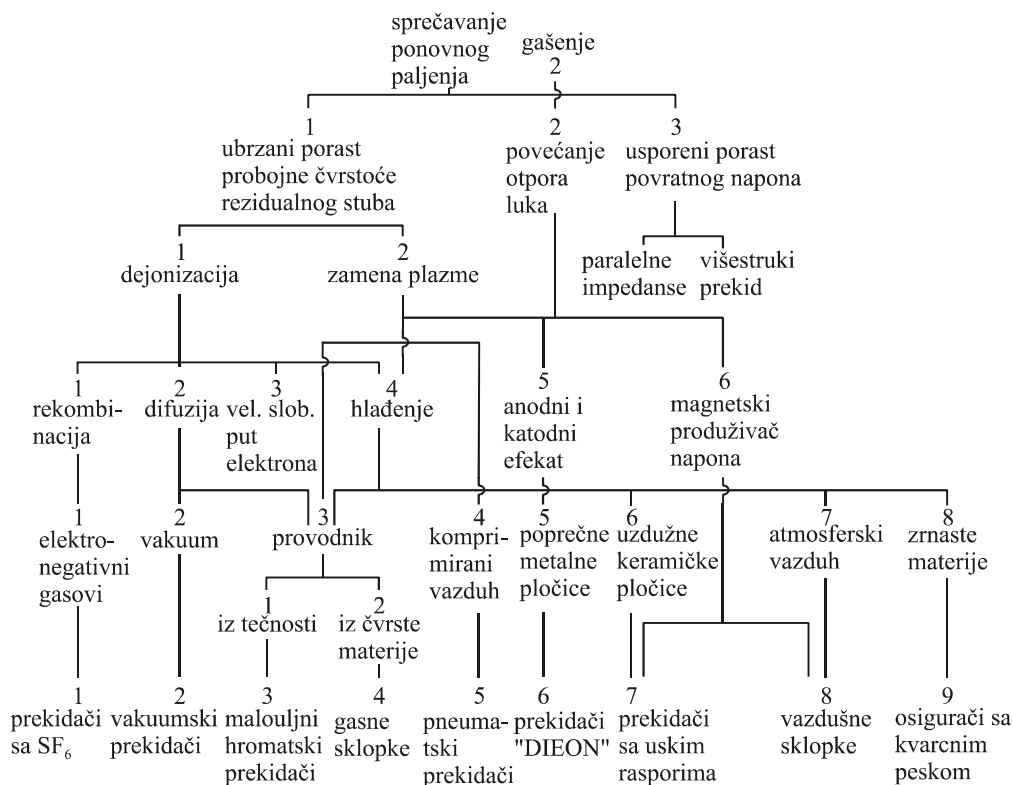
tako i ostale elektroopreme. Iz tog razloga, potrebno je što je moguće više ograničiti trajanje električnog luka.

Za gašenje električnog luka i za sprečavanje njegovog ponovnog paljenja u prekidačima, postoje brojne metode koje su prikazane na Slici 2.1. Redovi A,B,C i D odnose se na fizičke procese, E i F na medijume za gašenje luka a G na tip aparata. Aparati se mogu podeliti na:

1. Aparate sa dugačkim lukom ili sa posebnim medijumom za gašenje luka.
2. Aparate sa kratkim lukom ili bez posebnog medijuma za gašenje luka.

Čvrste materije koje mogu biti medijum za gašenje električnog luka su: keramički materijali, staklo i fiber. Tečnosti su voda i ulje dok u gasovite medijume spadaju vazduh, komprimirani vazduh, sumpor-heksafluorid i drugi gasovi. Naravno i vakuum se može koristiti kao medijum za gašenje električnog luka [32-34].

Smatra se da prekidači sa vakuumom i „deion“ pripadaju drugoj grupi a svi ostali prvoj grupi [28].



Slika 2.1. Principi gašenja luka (prema R. Milošević i Ž. Bago [28])

Početak razvoja vakuumskih prekidača vezuje se za 1920. godinu kada je predloženo korišćenje vakuuma kao prekidnog ambijenta i u početku je dočekan sa skepticizmom. Tada je, na Tehnološkom Institutu u Kaliforniji (CIT), počelo sistematsko istraživanje vakuuma koje je sproveo profesor Rojal Sorensen zajedno sa svojim diplomcima Medenhalom, Otisom, Lindvalom, Hamiltonom i Hejvudom [35], [36].

Sorensen i Medenhal su 1926.godine prijavili rezultate dobijene sa njihova prva tri prekidača. Ovi rezultati su bili veoma značajni. Znanje koje je stečeno pri ovim istraživanjima doprinelo je razumevanju samog vakuumskog luka. Došlo se do zaključka da je napon vakuumskog luka oko 20 V i da je energija oslobođena lukom znatno manja u vakuumskom nego u uljnom prekidaču. Takođe, postignuta je veća električna izdržljivost zbog gašenja luka između kontakata. Do kraja dvadesetih godina, istraživanja su nastavljena na CIT-u.

Progres koji su napravili Sorensen i njegovi saradnici, dovodi do toga da 1927.godine General Electric Company kupuje prava korišćenja patenta. Ova kompanija započinje svoj program pod vođstvom D.C.Prinsa a u istraživanje uključuje i Hejvuda. U tom periodu izgrađen je i testiran veliki broj prekidača. Iako je u tom periodu izdato relativno malo radova, došlo se do veoma važnih zaključaka [37].

Opšti ekonomski uslovi u ranim tridesetim godinama i poboljšanja u tehnologiji uljnih sklopki, dovode do napuštanja programa prekidača u General Electric-u. Nakon toga, sledi period od skoro dvadesetak godina u kome je veoma malo urađeno u vezi sa prekidanjem struje u vakuumu. Iako je u ovim godinama zatišja, relativno malo toga postignuto u vezi sa vakuumskim prekidačkim tehnologijama, razvijale su se tehnike i procesi koji su doprineli otklanjanju prepreka za realizaciju vakuumskih prekidačkih jedinica [38], [39].

Pedesetih godina počinje komercijalna proizvodnja vakuumskih prekidača. 1958. godine Ros je objavio rad koji je obrađivao primenu u prekidanju struja kondenzatora. Prvi vakuumski uređaj napravljen je 1959. godine, bio je nivoa 115 kV, pokretan je kalemom a njegova pojava označila je ulazak vakuumske opreme za prekidanje u tadašnju konzervativnu industriju.

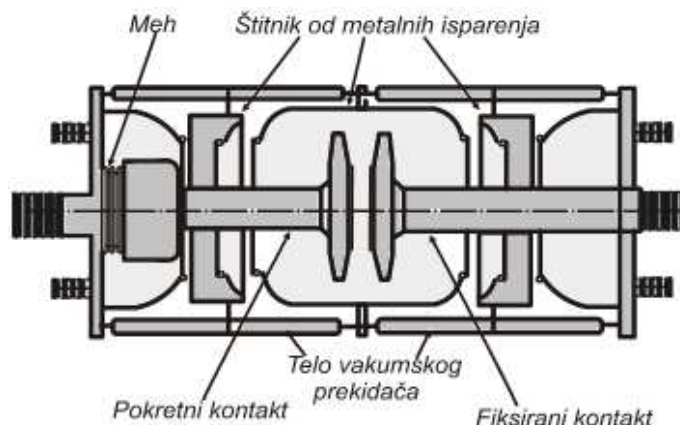
General Electric Company je 1952.godine započela istraživanja u razvojnoj laboratoriji u Šenektadu a 1955.godine oformljena je druga istraživačka laboratorija kompanije i kontrolno odeljenje u Filadelfiji. Ovoj grupi je poveren zadatak dizajniranja, izgradnje i testiranja prototipa vakuumskog prekidača za prekidanje jakih struja [40-42].

Otprilike istih godina kada je General Electric Company lansirala svoj vakuumski program, u britanskoj asocijaciji pod nazivom British Electrical and Allied Industries Association (ERA), započeto je istraživanje pod vodstvom M.P.Risa. On je zajedno sa svojim saradnicima, u periodu od 1953.-1959. godine, radio na fundamentalnim temama vezanim za razumevanje električnog luka u vakuumu. Njihov rad bio je i teoretski i eksperimentalni. Iako rad u kompaniji ERA nije obuhvatao sam razvoj vakuumskih prekidača jer je budžet bio ograničen, rezultati istraživanja su dosta doprineli ovom razvoju. Dr. Ris se 1961.godine pridružio asocijaciji pod nazivom Associated Electrical Industries (AEI) i bio osnovni pokretač ulaska te kompanije u industriju prekidačke vakuumske opreme. Krajem šezdesetih godina, kompanije English Electric i Reyrolle se združuju u jednu kompaniju pod nazivom Vacuum Interrupters Ltd (VIL) i započinju proizvodnju vakuumskih prekidača. Ubrzo se spajanjem AEI, English Electric i Gec oformljuje jedna kompanija pod logom GEC-a [43], [44].

Uspeh u SAD-u, GEC-ovog prekidača *circa*, povećava broj vakuumskih proizvoda, naročito srednjenaponske vakuumske prekidačke opreme. Međutim, zbog nepoznavanja prednosti vakuumskih proizvoda kao što su lako održavanje, dugotrajan radni vek, tihi rad itd., kupci su bili oprezni pri kupovini ovih proizvoda.

Šezdesetih godina, General Electric razvija vakuumske prekidače za naponske nivoe od 4 do 800 kV. 1967. godine prekidači za nivoe od 121 do 800 kV, izvode se kao serijski moduli prekidanja. Dolazi se do zaključka da je za jedan modul najbolji naponski nivo od 45 kV (zbog mehaničkih i električnih osobina, kao i zbog ekonomskih razloga). Zato su razvojna istraživanja bila su usmerena ka povećanju do tada postignute naponske sposobnosti od 15 kV. Do 1969.godine, vršena su testiranja eksperimentalnih prekidača na 20 kA, 45 kV a nekoliko godina kasnije su se i razvili 40 kA ,45 kV moduli. Osnovna konstrukcija koja je prikazana na Slici 2.2, oslanjala se na principe koji su korišćeni za prekidače od 1 kV. Spiralni kontakti otvarali su se do razmaka od 3/4 inča. Izolacioni

dodatak bio je stakleni i podupirao je tri štita za kondenzovanje metalne pare za razliku od pojedinačnog štita koji je bio na prekidačima 15 kV. Iako su prekidači razvijeni i napravljeni, do komercijalne proizvodnje nije došlo. Sličan sled događaja pojavio se i u AEI-u [45], [46].



*Slika 2.2. Poprečni presek vakuumskog prekidača 45kV, 40kA
(prema R. Milošević, Ž. Bago [28])*

U tom periodu, želja da vakuumska prekidačka oprema zameni vazdušne magnetne prekidače, mogla je biti zadovoljena samo sa novom generacijom opreme. Nakon kasnog starta, i Westinghouse kao i General Electric razvija uspešnu proizvodnju vakuumske prekidačke opreme. Novi prekidači su bili upola manji, omogućavali su prostorni sklop na dva nivoa i poboljšana je njihova pouzdanost što je u kasnim sedamdesetim godinama, privuklo pažnju industrijskih korisnika. U tom periodu i u Japanu otpočinje proizvodnja ovih prekidača i pojavljuje se veliki broj novih proizvoda. Japanci su bili prvi koji su u komercijalne svrhe iskoristili aksijalno magnetno polje za poboljšanje rada prekidača. Japanski inženjeri i naučnici su dali značajan doprinos za razumevanje procesa prekidanja struja. Takođe, iako nešto kasnije, i evropski proizvođači doprineli su samom tehnološkom razvoju svojim naučnim i tehničkim dostignućima [46], [47].

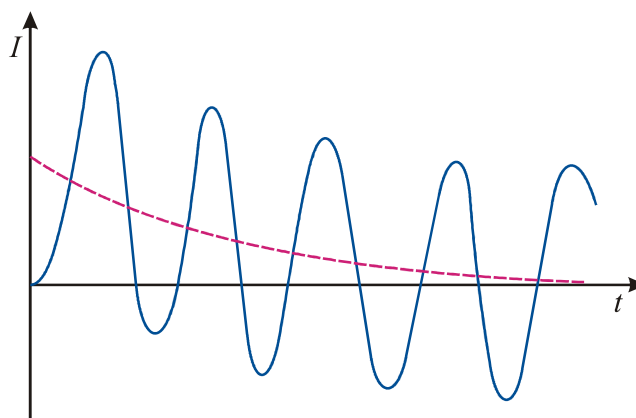
U današnje vreme, problemi koji su se pojavljivali u početku razvoja vakuumske tehnike, davno su rešeni. Vakuumska sklopna tehnika je potpuno osvojila područje sklopnih aparata i aparatura srednjeg napona, a sve više osvaja i područje sklopnih aparata visokog napona.

Karakteristike vakuumskih prekidača su: velika pouzdanost, velika mehanička i električna trajnost, lako održavanje (nema potrebe za zamenu i dopunjavanje medija za gašenje luka), male dimenzije i težina, struja se prekida pri prvom prolasku struje kroz nulu bez ponovnog paljenja, sigurnost od eksplozije i požara, nema zagađivanje okoline.

Struja kratkog spoja je u opštem slučaju asimetrična i sadrži DC komponentu (Slika 2.3). Iako DC komponenta traje tri do četiri periode (subtranzijentni period), prouzrokuje izuzetno velike elektrodinamičke sile.

Ukoliko je povratni napon veći od podnosivog napona, dolazi do ponovnog paljenja električnog luka. Vakuumski sklopni aparati imaju sposobnost prekidanja struja čija je frekvencija daleko veća od industrijske.

Električni luk u vakuumu, zavisno od veličine struje koja se prekida, može imati dva oblika: difuzni luk (struje manje od 10 kA) i koncentrisani uski luk (veće od 10 kA). Koncentrisani uski luk osciluje pod uticajem elektromagnetnih sila po rubu elektroda, nastaje velika količina metalnih para, što značajno oštećuje obe elektrode. Smanjeno oštećenje kontakata osigurava se difuznim oblikom luka bez obzira na prekidnu struju. Današnje vakuumske komore koriste čeonu tip kontakata, odnosno delovanje magnetnog polja na električni luk između kontakata. Najčešće se koristi radijalno magnetno polje strujnih petlji formiranih posebnom geometrijom kontakata kao i delovanje uzdužnog (aksijalnog) magnetnog polja [48-50].



Slika 2.3. Asimetrična struja kvara sa eksponencijalno opadajućom DC komponentom
(prema R. Milošević i Ž. Bago [28])

U većini sklopnih aparata, prekidanje struja se postiže mehaničkim razdvajanjem kontakata pri čemu se javlja električni luk. U trenutku razdvajanja kontakata, međukontakti prostor postaje provodljiv a struja nastavlja da teče bez obzira što su se kontakti razdvojili. U naizmeničnim strujnim krugovima, pojava električnog luka sprečava naglo prekidanje struje a time i pojavu velikih prenapona u mreži. Kada struja dostigne vrednost nula, električni luk se gasi. Potrebno je da se osigura da se električni luk ponovo ne upali. Gorenjem luka razvija se velika toplotna energija koja može da izazove velika termička i mehanička naprezanja. Posle gašenja električnog luka prolaskom struje kroz nulu, potrebno je osigurati da električna čvrstoća međukontaktnog prostora bude dovoljno velika da ne dođe do ponovnog paljenja luka. Ako to nije postignuto, luk se ponovo pali sve do narednog prolaska struje kroz nulu. Da bi prekidanje luka bilo uspešno, potrebno je nakon gašenja luka u što je moguće kraćem vremenu uspostaviti adekvatnu dielektričnu čvrstoću međukontaktnog prostora, veću od povratnog napona na priključcima prekidača [51], [52].

Vakuum je svaki medijum čiji je pritisak ispod normalnog atmosferskog pritiska. Vakuum ima deset puta veću probojnu čvrstoću od vazduha. Razlog tome je veliki slobodan put čestica zbog čega se ostvaruje mali broj sudara elektrona i molekula vazduha te ne nastaje dovoljan broj nosioca naboja. Glavni nosioci električnog luka nisu joni već elektroni.

Zakovitosti uključenja i isključenja struje pokazuju da je električni luk jedna od fizičkih osnova delovanja i funkcionisanja prekidača. Postizanje optimalnih karakteristika prekidača zavisi od svojstva električnog luka. Ispitivanjem se došlo do zaključka da se tokom prebacivačkih operacija, napon luka u vakuumu kreće oko 20V a struja luka oko nekoliko stotina ampera. Samo trajanje luka biće kraće od jedne periode. Samim tim, oštećenje kontakata svedeno je na najmanju moguću meru pa se može očekivati dugi vek trajanja prekidača.

Rezanje struje je pojava prekidanja struje pre njenog prolaska kroz prirodnu nultu tačku. Ovaj fenomen javlja se kod svih sklopnih aparata sa medijumima koji snažno gase električni lik u procesu prekidanja. On je naročito izražen pri prekidanju malih induktivnih struja a posledica je nestanka uslova za stabilno gorenje električnog luka. Sedamdesetih godina otkriven je fenomen virtuelnog rezanja struje pri sklapanju vakuumskim

prekidačem. Ono se može pojaviti u nekim strujnim krugovima, pretežno pri isklapanju ispražnjenih kondenzatorskih baterija, a za posledicu može imati visoke prenapone. Ukoliko ovi prenaponi nisu pod kontrolom, mogu znatno oštetiti opremu iza prekidača. Ova pojava se bitno razlikuje od rezanja malih struja od nekoliko ampera u blizini prirodne nul-tačke, kada električni luk postaje nestabilan što se događa kod svih vrsta medija za gašenje.

Vakuumski okidači (TVG) prvi put su se pojavili u literaturi pedesetih godina XX veka. Uslovi za njihovu proizvodnju stekli su se približno kada je osvojena tehnologija vakuumskih prekidača sa kojima imaju dosta toga zajedničko TVG i vakuumski prekidači imaju sličan spoljašnji izgled i sličnu konstrukciju. TVG imaju par elektroda između kojih je međuelektrodni prostor kao i kontakti prekidača. Jedina razlika je međuelektrodni razmak stalan, odnosno elektrode se ne pomeraju. Okidač se nalazi u sastavu jedne od elektroda, obično na osovini. Karakteristične veličine okidača su: nominalna struja, napon i vreme provođenja. Kada TVG odreaguje, ponaša se veoma slično kao konvencionalni vakuumski prekidač. Izuzetna osobina TVG-a je veliki opseg radnog napona, a njihova primena je raznolika.

Još jedan primer korišćenja vakuuma u oblasti prekidanja struje su i vakuumski topljivi osigurači. Kao i TVG oni imaju par elektroda ali su premošćene topljivim elementom koji u normalnim uslovima provodi struju. U slučaju kvara, ovaj element se prekida, odnosno istopi. Prednost ovih vakuumskih osigurača što se mogu koristiti u bilo kojoj sredini, lagan je i malih dimenzija [51], [52].

Vakuumski uređaji, s obzirom na veliki opseg svoje prekidne moći, imaju široku primenu. Vrlo brzo, nakon rešenih tehničkih i tehnoloških problema vezanih za proizvodnju vakuumskih komora, javila se potreba za standardima. Oni su definisali uslove za različite primene, davali nominalne vrednosti, predlagali metode za testiranje opreme, a u nekim slučajevima i pružali uputstva za upotrebu. Pojava međunarodnog tržišta dovela je do potrebe za međunarodnim sporazumom o standardima. Ovu ulogu dobila je International Electrotechnical Commission-IEC. Tokom godina, standardi su se razvijali i prilagođavali novim uslovima. Standardi zahtevaju da posle ispitivanja prekidne moći prekidača, stanje

kontakata bude takvo da on može i dalje prekidati i provoditi nazivnu struju bez prekomernog zagrevanja kontakata.

Za vakuumske komore sklopnih aparata postoji standard koji definiše dozvoljenu granicu X-zračenja i utvrđuje potrebna ispitivanja za nove komore kojima se proverava njihova ispravnost. Za proveru vakuuma u vakuumskim komorama u eksploataciji testom dielektrične čvrstoće, standard propisuje ispitivanje sa 75% vrednosti ispitnog napona, kako bi se izbegla opasnost od zračenja. Električno polje koje postoji u vakuumu u toku normalnog rada vakuumskih komora nema nikakvo štetno dejstvo na osoblje usled zračenja. Ipak, proizvođači vakuumskih komora, u zemljama sa strožijim zakonima o zaštiti na radu i zaštiti čovekove okoline, moraju u blizini vakuumskih sklopnih aparata, istaknuti upozorenja o mogućem zračenju.

Kao prednost vakuumskih sklopnih aparata u poređenju sa sklopnim aparatima koji koriste druge medije za gašenje, može se uzeti njihova sledeća specifična osobina. U slučaju neuspelog prekidanja strujnog kola u eksploataciji ili pri ispitivanju graničnih mogućnosti, kada dolazi do razaranja komora, mali je uticaj na okolinu u odnosu na npr. malouljne prekidače u sličnim slovima [53], [54].

2.1. UTICAJ SKLOPNIH OPERACIJA NA KARAKTERISTIKE VAKUUMSKIH PREKIDAČA

Kod vakuumskih sklopnih aparata nakon različitih sklopnih operacija mikroskopska topografija površine kontakata trpi značajne promene, koje se odražavaju na dielektričnu čvrstoću međukontaktne razmaka. Prema načinu na koji menjaju topografiju, površine kontakata sklopne operacije se dele na:

- sklopne operacije koje dovode do zavarivanja i raskidanja zavarenih kontakata, a to su uklapanje na zadatu struju/otvaranje bez tereta i uklop bez struje/isklop bez struje
- sklopne operacije kod kojih imamo dejstvo isklopnog električnog luka, tj. prekidanje zadate struje.

Zbog velike zavisnosti probajnog napona od stanja površine elektroda i zbog mogućeg kondiciranja elektroda naponom i probajima preporučuje se da se tokom dielektričnih ispitivanja pre svakog primenjivanja napona izvrši sklopna operacija.

2.1.1. UTICAJ ZAVARIVANJA KONTAKATA

Kontakti su u vakuumskim sklopnim elementima mnogo podložniji zavarivanju nego u gasovima ili ulju, zato što su u ultravisokom vakuumu kontaktne površne praktično idealno čiste, te eventualni varovi nisu oslabljeni stranim nečistoćama (npr. izolacioni film i slično). Zavarivanje se može ostvariti na nekoliko načina, od kojih su najznačajniji [55]:

1. Hladno zavarivanje (kada se veoma čiste površine kontakata zavaruju samo usled dodira ostvarenog dovoljnom kontaktnom silom);
2. Zavarivanje pri uklapanju struje (kada se zbog predluka i luka pri odskakivanju materijal topi i kontakti zatim zavaruju).

Ako se nakon stvaranja varova kontakti ostvaruju bez tereta, dolazi do raskida varova i nastaju oštri mikrošiljci na površini kontakata. Kao što je već navedeno, takvi oštri mikrošiljci omogućavaju iniciranje proboja emisionim mehanizmima.

Emisioni karakter mikrošiljaka nakon raskidanja varova određivan je direktnim snimanjem emisionih U-I karakteristika i snimanjem izgleda mikrošiljaka pomoću elektronskog mikroskopa (SEM). Emisione karakteristike su predstavljene na F.N. dijagramu i odatle su dobijene vrednost faktora lokalnog pojačanja polja čak i do $\beta=4000$, pa su pojedini autori [56] pretpostavili da nije verovatno da mogu postojati mikrošiljci sa takvom geometrijom. Po njima je elektronska emisija tako velika ne zbog geometrije mikrošiljaka, već zbog promena u izlaznom radu usled mikronečistoća i kristalnih nesavršenosti na površini elektroda. Međutim, Farrall [57] je poredeći izmerene faktore pojačanja polja β dobijene sa F.N. dijagrama i proračunski dobijene β za geometrijske dimenzije mikrošiljaka izmerene pomoću SEM, utvrdio da je emisija tako velika ipak samo zbog geometrije metalnih mikrošiljaka, pošto raskinuti varovi daju veoma oštre šiljke. Za praksu pogodniji parametar, koji određuje emisivost elektroda, uveden je u [56].

Karakteristike mikrošiljaka pri raskidanju varova su slučajne veličine, kao što je to i sama veličina sile raskidanja zavarenih kontakata. Ipak u [58] je eksperimentalno prikazano da, statistički posmatrano, manjim vrednostima slie zavarivanja odgovaraju veće vrednosti napona V_{-4} (tj. slabije emisione karakteristike).

2.1.2 DIELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE KONTAKATA NAKON SKLOPNIH OPERACIJA KOJE DOVODE DO ZAVARIVANJA

Više autora [56-59] je saopštilo jaku korelaciju između izmerene struje EE i probajnog napona nakon raskidanja zavarenih kontakata. U [55] su prikazani rezultati oko 2000 testova na četiri različita vakuumska sklopna elementa (CuBi i CuCr kontakti). Dobijena je praktično linearna zavisnost između probajnog napona i napona V_{-4} .

U [60] su vršena ispitivanja dielektrike na tri tipa vakuumskih sklopnih elemenata sa CuBi kontaktima i tri tipa sa CuCr kontaktima. Dielektrično ispitivanje naizmeničnim naponom je napravljeno i nakon sklopne operacije uklopa na struju kratkog spoja $I=10$ kA i isklopa bez struje. Izmeren je srednji probajni napon od 40 kV do 55 kV za sklopne elemente sa CuBi i kontaktima zavisno od tipa kontakta i trajanja predluka. Za CuCr kontakte izmeren je srednji probajni napon od 64 kV do 73 kV. Rastojanje kontakata je bilo takođe $d=10$ mm. Dielektrična čvrstoća nakon obe navedene sklopne operacije za neke od gornjih tipova komora merena je i za udarni impulsni napon i dobijena je do 10% manja vrednost nego za naizmenični napon. Protumačeno je da je ta razlika, iako nije velika, posledica kondiciranja elektroda tokom podizanja napona, zašta ima vremena pri naizmeničnom naponu, a pri impulsnom nema [56], [61].

U [32] je vršeno ispitivanje dielektrike za vakuumski sklopni element sa CuBi kontaktima. Nakon uklopa/isklopa bez struje srednji probajni napon 50 Hz bio je 90 kV, a nakon uklopa 20 kA/isklopa bez struje bio je 29 kV. Rastojanje kontakata je bilo $d=10$ mm.

U [62] su ispitivani CuCr kontakti u ispitnoj vakuumskoj komori. Nakon uklopa/isklopa bez struje izmeren je srednji probajni napon od 105 kV za $d=3$ mm i 225 kV za $d=10$ mm. Dakle, za ovu drugu operaciju izmerena je linearna zavisnost probajnog napona od međuelektrodnog rastojanja.

Za kontakte sa CuBi u [63] ispitivana je dielektrična čvrstoća za udarni impulsni napon nakon sklopne operacije uklop na zadatu struju/isklop bez struje. Za uklop bez struje izmeren je srednji probajni napon od 72 kV, a za uklop $I=12$ kA srednji probajni napon od 47 kV. Rastojanje kontakata je bilo $d=12$ mm.

U [64] je ispitivan uticaj hladnih vrhova na degradiranje dielektrike. Dva tipa vakuumskih sklopnih komora (sa CuBi i CuCr kontaktima) su pod presom podvrgnuta kompresiji kontakata silom kontaktnog pritiska od 2150 N, koja je bila nekoliko puta veća od nominalne kontaktne sile tih komora. Nakon toga je meren jednosmerni probojni napon za međukontaktno rastojanje $d=2$ mm. Probojni napon kondicioniranih kontakata je bio 60 kV za CuBi i 55 kV za CuCr. Nakon kompresije probojni napon je opao na 26 kV za CuBi i 30 kV za CuCr, tj. došlo je do značajnog dekondiciranja elektroda usled hladnog zavarivanja. Međutim, ovaj proces kompresije je ponovljen više puta i zbog "otvrdnjavanja" kontakata dobija se porast probojnog napona (do 53 kV za CuBi i 41 kV za CuCr).

U radovima [65], [66], [67] i [68] se razmatra uticaj sklopne operacije sa kidanjem zavarenih kontakata na dielektrični čvrstoću vakuumskih prekidača sa CuCr kontaktima i vakuumskih prekidača sa CuBi kontaktima. U ovim radovima je opsežan eksperimentalni uzorak statistički obrađen, a dobijeni rezultati su povezani sa očekivanim mehanizmom proboja i objašnjeni na taj način. Međutim, i pored nesumljive vrednosti prikazanih rezultata, oni sa praktičnog stanovišta imaju manu, pošto se razmatra statistički uzorak slučajne promenljive *ac* probojni napon (ili impulsni probojni napon) veličine 100 slučajnih preomenljivih, nakon jednog izvedenog proboja. Iako je tokom eksperimentalnog postupka korišćen $G\Omega$ -ski otpornik, redno vezan sa uzemljenim kontaktom prekidača, dobijaju se Weibull-ove raspodele koje su karakteristične za uticaj prethodnih proboja. Takvi rezultati su u praksi neupotrebljivi, pošto proboj nakon rasklopa za vakuumski prekidač pod opterećenjem uglavnom vodi havariji. Iz toga razloga će u ovom radu biti posmatrane slučajne promenljive *ac* i impulsno probojni napon sa odgovarajućim pretprobajnim naponom, ali isključivo nakon izvršne sklopne operacije.

2.1.3. DIELEKTRIČNE KATAKTERISTIKE KONTAKATA NAKON PREKIDANJA LUKA

U [65] je izvedeno prekidanje struje 60 Hz vršne vrednosti 0,1-45 kA modelskim Cu elektrodama čeonog tipa (diam. 50 mm). Nakon prekidanja pojedine zadate struje, međuelektrodno rastojanje se postavi na $d=2\text{mm}$ i primeni serija od 100 naponskih impulsa (širine 2 s, vršne vrednosti napona 100 kV) i snima kondicioniranje probojnog napona. Dobijeno je da probojni napon prvog naponskog impulsa nakon prekidanja struje $I \geq 5\text{ kA}$ znatno opada u odnosu na napon kondicioniranih elektroda i da je opadanje najveće za slučaj kada je za katodu naponskog impulsa uzeta katoda luka (i to iznosi oko 50% za struje 5 kA i 25 kA). Za slučaj kada su prekidane strije do 25 kA, serija naponskih impulsa uspeva kondicionirati probojima elektrode na isti nivo probojnog napona. To znači da za te struje razaranje elektrode od strane luka nije nepovratno.

U [66] je meren probojni napon za impulsni napon 80/100 μs na sklopnim elementima sa CuCr kontaktima spiralnog tipa nakon prekidanja struja do 36 kA (vršno). Nakon prekidanja struje do 5 kA nije bilo smanjenja dielektrične čvrstoće u odnosu na kondicionirano stanje, tj. za međuelektrodno rastojanje $d=15\text{ mm}$ srednji probojni napon iznosio je 210 kV.

U [56] su vršena dielektrična ispitivanja nakon prekidanja struje na vakuumskom sklopnom elementu sa CuBi kontaktima. Za struje prekidanja do 5 kA dobijeno je da probojni napon malo zavisi od oblika ispitnog napona, tj. da je naizmenični probojni napon do 10% veći od impulsnog. Dakle, za ovaj slučaj (kada je luk bio sužen) probojni napon veoma zavisi od oblika primenjenog napona. Autori su zaključili da je to posledica toga što su usled prekidanja struje nastali mikrodelići, koje nije mogao aktivirati udarni impulsni napon (strmine 50 kV/ μs), pa je za taj brži napon dielektrična čvrstoća znatno viša.

U [60] dati su rezultati za naizmenični probojni napon za tri tipa CuBi komora i tri tipa CuCr komora izmereni nakon operacija prekidanja struje $I=1\text{ kA}$. Rastojanje kontakata je bilo 10 mm.

U radovima [12], [30], [67], [68] su na već pomenuti način, prikazani i rezultati o uticaju sklopnih operacija na prekidanje struje (nominalne i kratkospojne). Za te rezultate važi ista primedba koja je iznesena za prikazane rezultate u slučaju uticaja sklopne operacije sa kidanjem varova bez pojave luka. Pored toga što važi ta primedba, takođe važi i namena da se dobijeni rezultati koriguju i prilagode praktičnim potrebama, ovim radom.

U radu [68] prikazani su rezultati uticaja sklopnih operacija na statističke uzorke impulsni i probojni napon i pretprobojnu karakteristiku $V_{4.}$. Međutim eksperimentalni postupak je bio koncipiran tako da je vršena sklopna operacija a nakon nje određivan ceo statistički uzorak posmatranih slučajnih promenljivih. Na taj način dolazilo je do memorijskih efekata, tj. dejstva prethodnih merenja na potonja, što se najbolje vidi iz pripadnosti posmatranih statističkih uzoraka slučajnih promenljivih Weibulovoj raspodeli. Takav pristup, iako daje korisne rezultate, nije u potpunosti reprezentativan te je u ovom radu delimično ponovljen sa tom, bitnom, razlikom što je pre svakog određivanja slučajnih promenljivih vršena odgovarajuća sklopna operacija.

3. ODABRANE TEORIJSKE FUNKCIJE RASPODELE

3. ODABRANE TEORIJSKE FUNKCIJE RASPODELE

Matematički modeli za slučajne procese proizvode slučajne promenljive kojima su pridružene izvesne «teorijske» funkcije raspodele. Počevši od matematičkog modela date su metode koje imaju ulogu u ocenjivanju statističkih zaključaka [69-73].

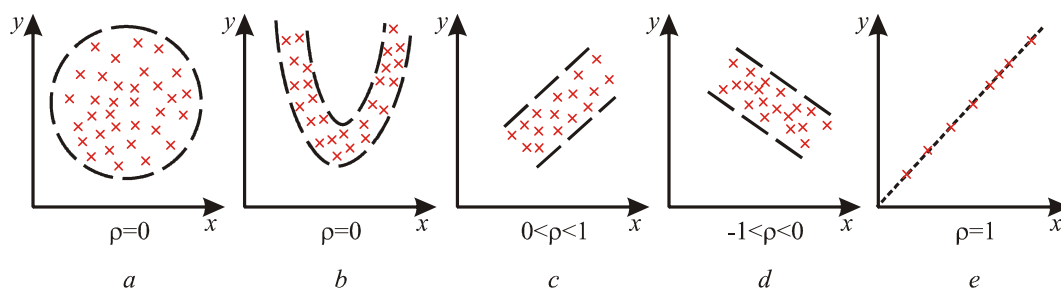
3.1 OSNOVE KORELACIJE I REGRESIJE

Ako se nekoliko slučajnih veličina istovremeno meri na ispitnim uzorcima, onda je od interesa da li su ove veličine međusobno povezane, koliko je jaka ta veza i kako se može matematički izraziti. Korelacija i regresija daju rešenje ovih problema.

Analiza korelacije prvo razmatra pitanje da li uopšte postoje linearne zavisnosti između slučajnih veličina X i Y koje se ispituju, i koliko su one jake, prema koeficijentu korelacije ρ . Pretpostavlja se da slučajne promenljive X i Y imaju normalnu raspodelu. Koeficijent korelacije može imati vrednosti $|\rho| \leq 1$. X i Y su nekorelisane za $\rho = 0$ (Slika 3.1a,b), tj. između njih ne postoji linearna zavisnost. Što je $|\rho|$ bliže jedinici, sve je čvršća korelacija između veličina. Kada je $\rho > 0$, X i Y rastu ili opadaju zajedno: ovo je "pozitivna korelacija" (Slika 3.1c). Kada je $\rho < 0$, velike vrednosti Y su vezane za male vrednosti X : to je "negativna korelacija" (Slika 3.1g). $|\rho| = 1$ predstavlja potpunu korelaciju, savršenu funkcionalnu zavisnost (Slika 3.1d). Procenjene vrednosti r , za koeficijent korelacije ρ , određivane su iz uzoraka sa n parova vrednosti (x_i, y_i) na način opisan u oglavlju 3.1.1.

Analiza regresije ispituje, na osnovu uzoraka, mogućnost postojanja funkcionalne veze, s jedne strane između slučajnih promenljivih X i Y , a s druge strane između slučajne promenljive i parametara (npr. zavisnost vremena proboja od primenjenog napona). Dva problema sa različitim sadržajem su na isti način matematički obrađeni. U mnogim primenama u tehnici visokog napona, posebno je zanimljiva zavisnost od jednog parametra, tako da će ovde u delu koji sledi biti razmotran ovaj slučaj. U najjednostavijem slučaju

parovi vrednosti $(x_i; y_i)$ bili bi grafički prikazani za regresiju (x_i bi onda, na primer, bilo parametar, a y_i realizovana slučajna promenljiva). Ovde će se razmatriti samo slučaj kada postoji linearna zavisnost između veličina X i Y , ili kada se ona može dobiti jednostavnom transformacijom $X^* = f_1(X)$ i $Y^* = f_2(Y)$ (linearna regresija).



Slika 3.1. Položaj ishoda veličina X i Y (šematski) (prema P. Osmokrović [69])

- a Nekorrelisane veličine
- b Linearno nekorelisane veličine
- c Pozitivna korelacija
- d Negativna korelacija
- e Potpuna korelacija (funkcionalna zavisnost)

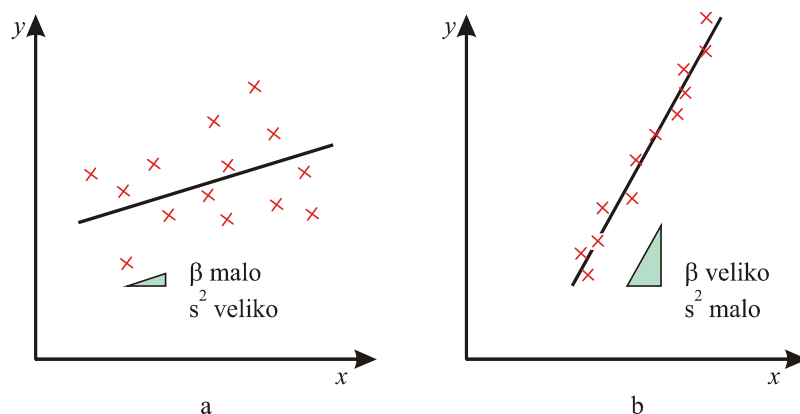
U linearnoj regresiji, s pretpostavkom da su slučajne promenljive normalno raspodeljene, slučajne veličine su uglavnom povezane linearnom funkcijom.⁵ Ova regresiona prava predstavlja očekivanje

$$\begin{aligned} EY &= \alpha + \beta EX \\ Y &= \alpha + \beta X \end{aligned} \quad (3.1)$$

U najjednostavnijem slučaju, izvodi se iz uzoraka grafički, crtanjem optimalne prave kroz grafički predstavljene parove vrednosti $(x_i; y_i)$ (Slika 3.2). Ako se traže tačne vrednosti, procenjene vrednosti $(a; b)$ moraju da se izračunaju za koeficijente α i β (koeficijent pravca) metodom najmanjeg kvadrata greške.

⁵ Linearna regresija daje veoma upotrebljive rezultate čak i kada je slučajna promenljiva samo aproksimativno normalno raspodeljena ("robustni" metod).

Ako su ishodi dosta rasuti na regresionoj pravoj, i ako je prema tome koeficijent pravca mali, linearna zavisnost između veličina X i Y je slaba (Slika 3.2a). Ukoliko je sa druge strane, raspršenost slabija, a β veliki, to ukazuje na jaku zavisnost (Slika 3.2b).



Slika 3.2. Položaj ishoda veličina X i Y , kao funkcija jačine njihove zavisnosti (šematski) (prema P. Osmokrović [69])

- a Slaba zavisnost
- b Jaka zavisnost
- β Koeficijent pravca
- s^2 Varijansa

Važno je da se napravi tačna razlika između zavisne i nezavisne veličine (parametra). U proceni y od x , empirijska regresiona prava

$$y = a_{yx} + b_{yx}x \quad (3.2)$$

predstavlja optimalno fitovanje empirijski definisanih vrednosti y (Slika 3.3a). Zbir vertikalnih odstupanja je minimalan, dok je u obrnutom slučaju

$$x = a_{xy} + b_{xy}y \quad (3.3)$$

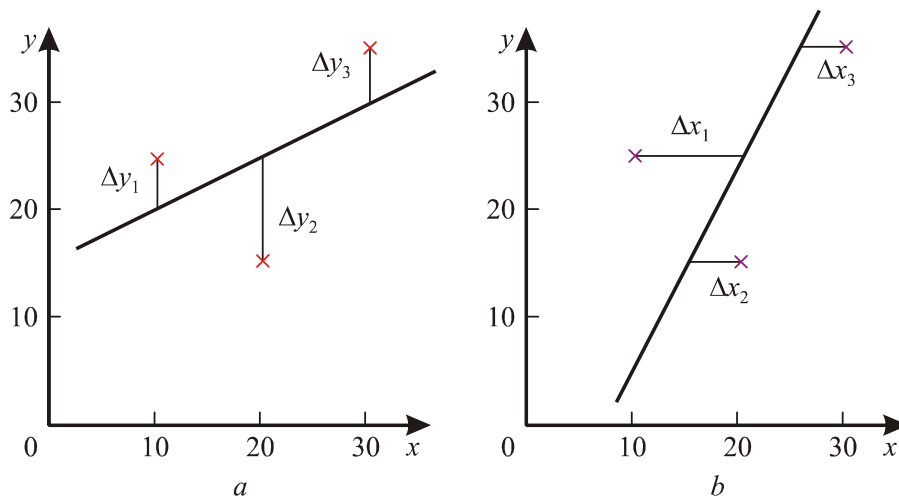
zbir horizontalnih odstupanja minimalan (Slika 3.3b). Od problema će zavisiti koja regresija treba da bude izvršena. Kako korelacija raste, nestaju razlike između regresionih pravih opisanih jednačinama 3.2 i 3.3 (Slika 3.4). Za koeficijente korelacije $|r|=1$, regresione prave se poklapaju, a za koeficijente pravca važi izraz 3.4.

$$b_{xy} = \frac{1}{b_{yx}} \quad (3.4)$$

dok je obično ($|r| \leq 1$)

$$r = \sqrt{b_{yx} b_{xy}} \quad (3.5)$$

U daljem izlaganju će biti pokazano kako treba izračunavati koeficijente korelacije i pravca u jednostavnom linearnom slučaju. Stručna literatura iz oblasti statistike pruža inženjerima iscrpan materijal za mnoge složenije slučajeve.



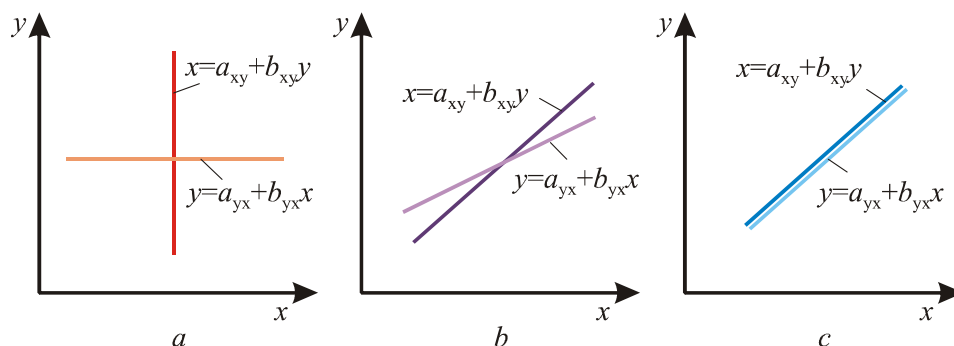
Slika 3.3 Zamena uloga zavisnih i nezavisnih veličina u regresiji
(prema P. Osmokrović [69])

a Regresija y od x

$$(\sum(\Delta y_i)^2 = \min)$$

b Regresija x od y

$$(\sum(\Delta x_i)^2 = \min)$$



Slika 3.4. Zavisnost između regresionih pravih x i y i koeficijenta korelacije r (šematski) (prema P. Osmokrović [69])

- a) $r = 0$ (ugao između regresionih pravih 90°)
- b) $0 < r < 1$ (ugao između regresionih pravih $0^\circ < \alpha < 90^\circ$)
- c) $r = 1$ (ugao između regresionih pravih 0°)

3.1.1 OCENA KOEFICIJENTA KORELACIJE

Ovde će biti razmatran uzorak koji se sastoji od n parova vrednosti $(x_i; y_i)$. Ovi uzorci se određuju aritmetičkim sredinama \bar{x} i \bar{y} i srednjim kvadratnim odstupanjima s_x i s_y . Pored toga, uvodi se empirijska kovarijansa

$$s_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (3.6)$$

koja povezuje dve veličine, i predstavlja proizvod srednjih odstupanja.

Iz ovih veličina se dobija empirijski koeficijent korelacije

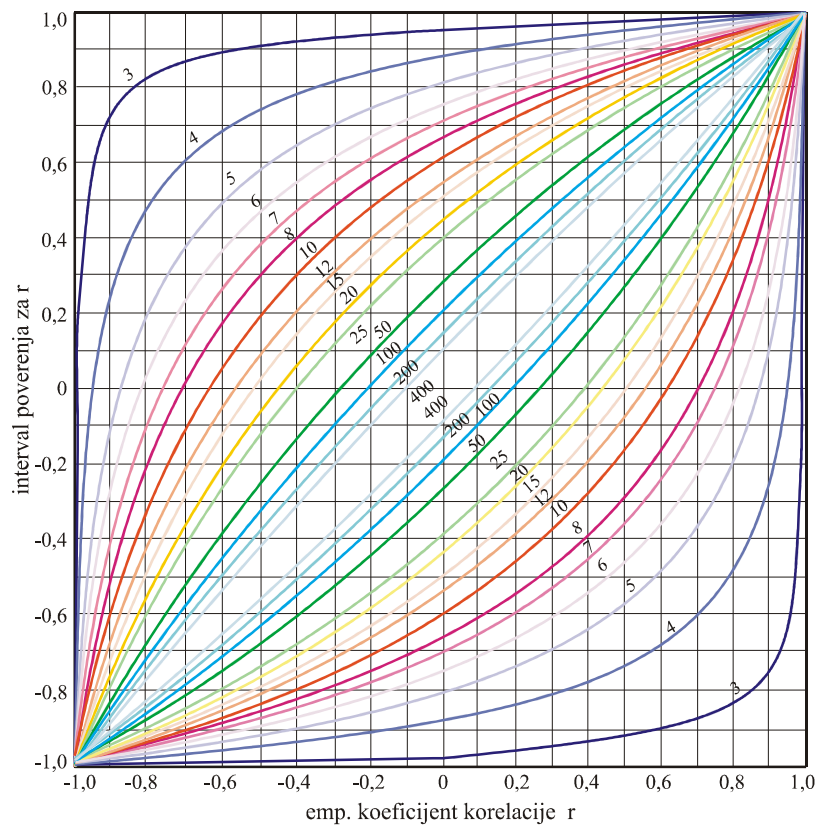
$$r = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} \quad (3.7a)$$

koji može da se izračuna i preko

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2)(\sum_{i=1}^n y_i^2 - n \bar{y}^2)}} \quad (3.7b)$$

Prema Sachs-u [76], dvostrani interval poverenja može da se očitava sa Slike 3.5. Ukoliko interval poverenja ne uključuje vrednost $\rho = 0$, može se zaključiti da $\rho \neq 0$, tj. korelacija postoji.

Slika 3.5 daje interval poverenja $[g_u = -0,12; g_0 = +0,84]$, koji pokriva vrednost $\rho = 0$. Ne može se, stoga, smatrati za sigurno da postoji korelacija između intenziteta parcijalnog pražnjenja i probajnog napona. Tačniji zaključak se dobija povećanjem veličine uzorka n .



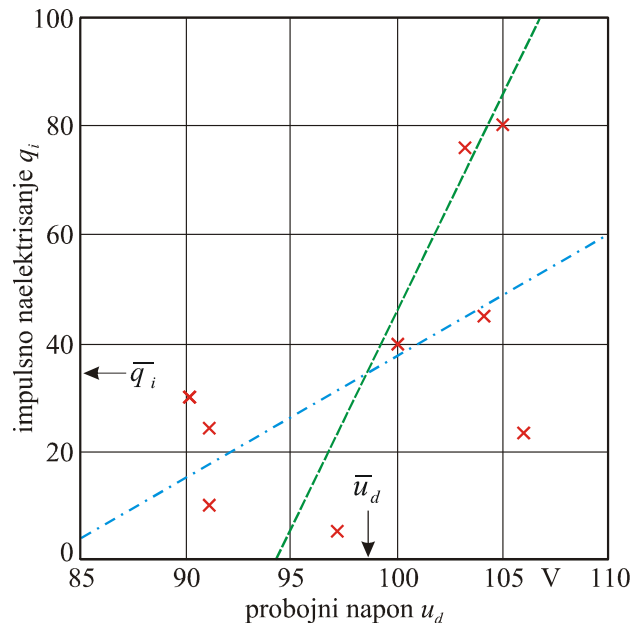
Slika 3.5. Dvostrani intervali poverenja za koeficijent korelacije sa nivoom poverenja $\varepsilon = 0,95$, kao funkcija uzorka veličine n (prema Sachs [76])

3.1.2 OCENA REGRESIONIH PRAVIH

Ako se uzme uzorak od n parova vrednosti $(x_i; y_i)$ koeficijent pravca se izračunava kao

$$b_{yx} = \frac{s_{xy}}{s_x^2} = r \frac{s_y}{s_x} \quad (3.8a)$$

$$b_{yx} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.8b)$$



Slika 3.6 Grafički prikaz veličina i moguće regresione prave
(prema P. Osmokrović [69])

- · - · - Regresija q_i od u_d

- - - - - Regresija u_d od q_i

Prema tome, sledeće važi za regresiju x od y (jedn. 3.3):

$$b_{xy} = \frac{s_{xy}}{s_y^2} = r \frac{s_x}{s_y} \quad (3.9a)$$

$$b_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.9b)$$

Slobodni član regresione prave a se dobija za dva slučaja kao

$$a_{yx} = \bar{y} - b_{yx} \bar{x} \quad (3.10)$$

$$a_{xy} = \bar{x} - b_{xy} \bar{y} \quad (3.11)$$

Ishodi su, naravno, rastureni oko regresione prave (Slika 3.6). Rezidualna varijansa se izračunava kao mera ove disperzije:

$$s_{Rxy}^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - a_{yx} - b_{yx} x_i)^2 \quad (3.12)$$

i

$$s_{Rxy}^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (x_i - a_{xy} - b_{xy} y_i)^2 \quad (3.13)$$

Za koeficijent pravca i za slobodnog člana regresione prave se, takođe, mogu dobiti varijanse. Ovde će biti dati za slučaj regresije y od x , koja se u stvari javlja u svim slučajevima kada se ostvaruje regresija za dati parametar.

Varijansa slobodnog člana a je

$$s_{ayx}^2 = s_{Ryx}^2 \left(\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{(n-1)s_x^2} \right) \quad (3.14)$$

a varijansa koeficijenta pravca b je:

$$s_{byx}^2 = \frac{s_{Ryx}^2}{(n-1)s_x^2} \quad (3.15)$$

Pomoću ove dve varijanse moguće je izračunati dvostrane intervale poverenja za slobodni član a

$$\left. \begin{array}{l} a_0 \\ a_u \end{array} \right\} = a_{yx} \pm t_{n-2; (1+\varepsilon)/2} S_{ayx} \quad (3.16)$$

i za koeficijent pravca b

$$\left. \begin{array}{l} b_0 \\ b_u \end{array} \right\} = b_{yx} \pm t_{n-2; (1+\varepsilon)/2} S_{byx} \quad (3.17)$$

$t_{m;q}$ je kvantil F raspodele sa $m = n - 2$ stepeni slobode i reda $q = (1 + \varepsilon)/2$. Pored toga mogu se naći opisi izračunavanja intervala poverenja za celokupnu regresionu pravu. Dve regresione prave mogu da se porede pomoću statističkih ispitivanja.

Kao što je već napomenuto, linearna regresija takođe može da se koristi kada se linearnost između posmatranih veličina dobija transformacijom. Koristi se i u ispitivanjima životnog veka na visoko-polimerizovanim izolacionim strukturama, a važna je i u određivanju funkcije izvodnice za izolaciju pri ispitivanju konstantnim naponom. Ako se određena teorijska funkcija raspodele uzima za funkciju izvodnicu (npr normalna raspodela $\Phi(x)$), onda će se postići linearizacija primenom odgovarajuće inverzne funkcije $[\Phi^{-1}(h_i) = \psi(h_i)]$

3.2 POREĐENJE UZORAKA U POGLEDU ZAJEDNIČKE POPULACIJE

Poređenja uzoraka su često potrebna, da bi se donele odluke koje se tiču kombinacije pojedinačnih uzoraka kojom će se stvoriti veliki ukupni uzorak, uticaja određenih parametara testa, ili javljanja zavisnosti u toku testa. Takva poređenja se mogu izvesti, u slučaju poznate funkcije raspodele, prema njihovim parametrima (parametarski testovi: testira se hipoteza o određenim parametrima), ili se u slučaju nepoznate funkcije

raspodele statistike testa dobijaju iz karakteristika ukupnog uzorka⁶ (neparametarski ili testovi bez raspodele, tj. testovi sume rangova kao što je U test).

Postoji veliki broj testova koji rešavaju problem u celini. Ovi testovi su uglavnom parametarskog tipa. Parametarski testovi su razvijeni specijalno za normalnu raspodelu. Međutim, kada se radi o proceni prosečnih trendova, ovi testovi se takođe mogu primeniti i na druge raspodele na osnovu postavki centralne granične teoreme, budući da postoje sasvim mala odstupanja između različitih tipova raspodele u opsegu $(x_{50} \pm s)$.

3.3. U TEST (POREĐENJE DVA UZORKA BEZ RASPODELE)

U test daje odgovor na pitanje da li dva uzorka potiču iz iste populacije bez obzira na njihovu funkciju raspodele [69-74].

Hipoteza: Funkcije raspodele $F(x)$ i $F(y)$ dveju populacija izetih iz tabele, koje se predstavljaju s dva uzorka veličina n_x i n_y i s realizacijama $x_1 \dots x_i \dots x_{n_x}$ i $y_1 \dots y_i \dots y_{n_y}$, su jednake: $F(x) = F(y)$.

Statistika testa: $(n_x + n_y)$ vrednosti uzoraka je zajedno poređano po veličini i numerisano od 1 do $(n_x + n_y)$. Brojevi se nazivaju "rangovima" $r(x_i)$ i $r(y_j)$, gde je isti rang (srednja vrednost rangova koji se pojavljuju) dodeljen identičnim ishodomima. Sume rangova se onda formiraju za svaki uzorak.

$$R_x = \sum_{i=1}^{n_x} r(x_i) \quad \text{za} \quad R_y = \sum_{j=1}^{n_y} r(y_j), \quad (3.18)$$

iz kojih se statistika testa

$$u = \min(u_x, u_y) \quad (3.19)$$

dobija sa

$$u_x = R_x - \frac{n_x(n_x + 1)}{2}$$

⁶ Ukupni uzorak se dobija kombinovanjem svih uzoraka koji se porede.

$$u_y = R_y - \frac{n_y(n_y + 1)}{2}$$

Kritična vrednost: Kritična vrednost $U_{n_x, n_y; \alpha}$ je data u tabelarnom obliku za jednostrani i dvostrani test (Müller i ostali autori, Tabela 18, čiji je izvod dat u [10]).

Poređenje: Hipoteza se odbacuje ako je $u < U_{n_x, n_y; \alpha}$.

3.4. F TEST (POREĐENJE DVE EMPIRIJSKE VARIJANSE)

F test daje odgovor na pitanje da li su dva uzorka sa empirijskim varijansama s_x^2, s_y^2 dobijena iz populacija sa istom varijansom, a takođe se koristi da bi se saznalo da li je neslaganje dve regresione prave slučajno (kao što je prikazano u delu 3.1.2) [69-75].

Hipoteza: Varijanse σ_x^2 i σ_y^2 dve normalno raspodeljene populacije predstavljene sa dva uzorka veličina n_x i n_y , i empirijskim varijansama s_x^2 i s_y^2 , su jednake: $\sigma_x^2 = \sigma_y^2$.

Statistika testa:

$$t = \frac{s_x^2}{s_y^2} \quad (3.20)$$

gde se oznake uzoraka x i y moraju odabrati tako da je $s_x^2 \geq s_y^2$.

Kritična vrednost: Kritična vrednost $F_{m_1; m_2; q}$ se dobija iz F raspodele kao kvantil sa stepenima slobode $m_1 = n_x - 1; m_2 = n_y - 1$ i redom $q = 1 - \alpha/2$ (dvostrani test na nivou značajnosti α).

Poređenje: Hipoteza se odbacuje ako je $t > F_{m_1; m_2; q}$.

4. EKSPERIMENT, EKSPERIMENTALNI POSTUPAK I OBRADA EKSPERIMENTALNIH REZULTATA

4. EKSPERIMENT, EKSPERIMENTALNI POSTUPAK I OBRADA EKSPERIMENTALNIH REZULTATA

Tokom rada vršena su dva tipa eksperimenta (Eksperiment I i Eksperiment II). Dobijeni rezultati tokom ovih eksperimenata su, zbog svoje specifičnosti drugačije obrađivani i interpretirani.

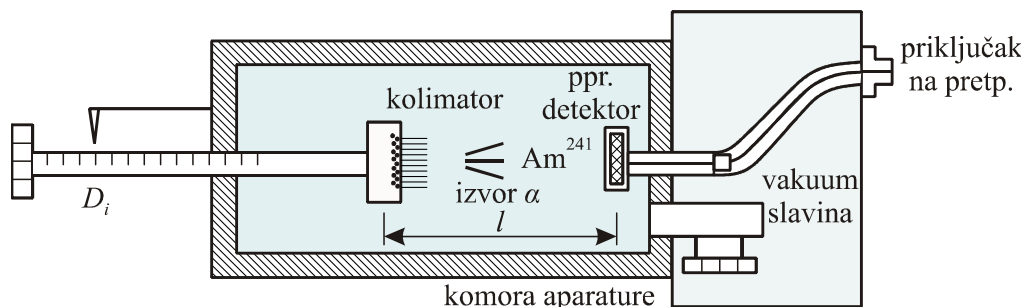
4.1. EKSPERIMENT I, EKSPERIMENTALNI POSTUPAK I OBRADA EKSPERIMENTALNIH REZULTATA

Eksperiment I bio je usmeren na ispitivanje mehanizma proboja vakuuma. Pri tome je posebna pažnja bila posvećena prelazima između različitih mehanizama proboja u graničnim oblastima. U skladu sa tim eksperimentalni postupak je bio veoma sofisticiran i tako koncipiran da je davao reproduktivne i pouzdane rezultate.

4.1.1. OPIS APARATURE I POSTUPAK ODREĐIVANJA BRAGOVE KRIVE

U cilju provere, ovde iznesenog objašnjenja analognog Pašenovog efekta, korišćeni su jonizovani efekti alfa čestica tj. efekat povećanja jonizacije pri kraju dometa (Bragova kriva). Iako se Bragova kriva može proračunati u radu je eksperimentalno snimana, pa je onda, pod istim uslovima korišćena [76], [77].

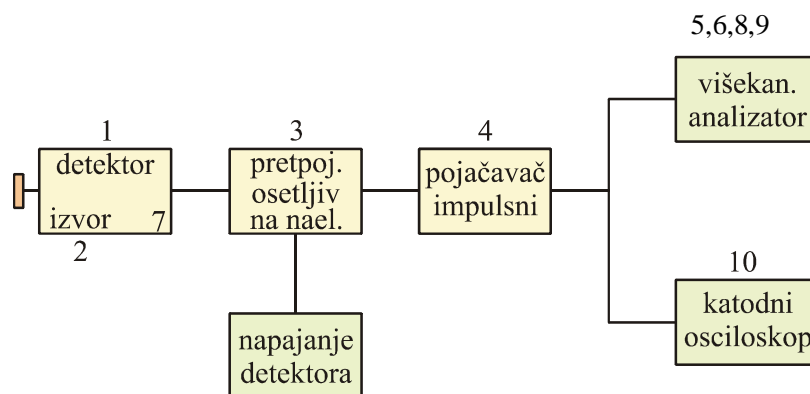
Aparatura se sastojala iz cilindrične komore u kojoj su bili smešteni radioaktivni α – izvor na pokretnom nosaču i poluprovodnički silicijumski detektor. Kao izvor se koristio Am^{241} intenziteta $100 \mu\text{C}$ ($T_{1/2} = 475$ god, $E_{\alpha} = 5,476$ i $5,443$ MeV).



Slika 4.1. Aparatura za merenje specifičnog gubitka energije i dometa α - čestica

Poluprovodnički detektor je bio silicijumski detektor sa površinskom barijerom radnog napona oko 50V [78].

Elektronski deo aparature sastojao se iz standardnih elemenata i to pretpojačavača impulsnog tipa osetljivog na naelektrisanje, impulsnog pojačavača, višekanalnog analizatora i registratora (skalera) sa odgovarajućim napajanjima.



Slika 4.2. Šema elektronskog dela aparature sa sl. 4.1

1. Cilindrična komora sa pokretnim nosačem za izvor i detektor.
2. Izvor Am^{241} , 100 μC ($T_{1/2}$ – 458 godina, E_{α} = 5,458 MeV i 5, 443 MeV).
3. Pretpojačavač.
4. Impulsni pojačavač.
5. Višekanalni amplitudski analizator (ili jednokanalni amplitudski analizator-VIKIA).
6. Hronometar (na ekranu VIKIA).

7. Silicijumski poluprovodnički detektor (radni napon 50 V).
8. Jednokanalni analizator (kao alternativa 5).
9. Skaler (uz 8, na ekranu VIKIA).
10. Katodni osciloskop.

4.1.2. EKSPERIMENTALNI POSTUPAK

Izvor je bio na rastojanju l (koje je odgovaralo dužini bočne cevi, u nastavku eksperimenta) od detektora i sniman je broj impulsa za vreme od 1 min. Rastojanje se postepeno povećavalo u skokovima od 1; 2; 4 mm i mereni su brojevi impulsa za isto vreme. Pritisak u aparaturi je menjan i podešavan na iste vrednosti i sa istim rezidualnim gasovima, kao u komori za merenje probojnog napona. Uz dalje povećanje rastojanja broj impulsa nije se menjao osetno, te su merenja delovala na vrednost pozadinskog zračenja. Pozadinsko zračenje poticalo je uglavnom od kosmičkog zračenja. Pozadinsko zračenje uzimano je u obzir nakon svakog merenja što je bilo neophodno zbog tačnosti postupka. Korišćenje izraza datih u uvodnim poglavljima i podataka iz merenja omogućavalo je određivanje karakteristika dometa dometa α – čestica u posmatranom gasu na datom pritisku.

Pritisak radnog gasa u komori podešavan je u sledećim koracima:

1. Višestruko vakuumiranje komore do pritiska 10^{-9} bar i punjenje radnim gasom do pritiska 1 bar.
2. Podešavanje pritiska igličastim ventilom na željenu vrednost (vrednosti pritiska su svođene na 0°C).

Tokom postupka određivana je kriva baždarenja, tj. veza između energije α - čestice i amplitude impulsa (u voltima) na izlazu iz pojačivača za uslove rada u eksperimentu. Komora je vakuumirana do pritiska koji je odgovarao pritisku nastavka eksperimenta. Nakon toga je sniman spektar α - čestica čija je srednja energija uzeta iz karakteristika izvora.

Rastojanje izvora od detektora pomerano je u skokovima od po 1, 2, odnosno 4 mm, od maksimalne vrednosti određene u tački 1, do minimalne vrednosti i pri tome je sniman

spektar α - čestica. Iz svakog spektra je određena, preko krive baždarenja, srednja energija α - čestica u detektoru.

Posle toga je određivana vrednost izraza

$$\frac{\Delta E}{\Delta x} = \frac{E_i - E_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}$$

u funkciji srednje energije.

4.1.3. OBRADA EKSPERIMENTALNO DOBIJENIH REZULTATA

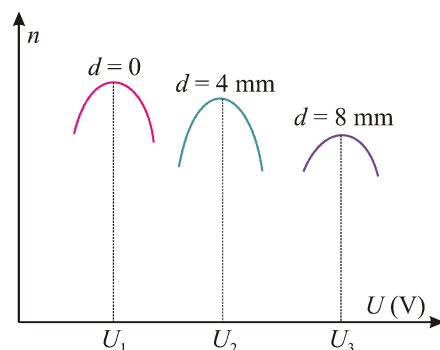
Pošto je aparatura bila povezana i izvor bio postavljen na udaljenost l od detektora snimao se spektar putem broja impulsa u intervalima vremena 20 s, na koliko je bio podešen merač vremena. Detektor se, zatim, postepeno udaljavao od izvora. Sa merenjem se prekidalo kada bi se došlo u položaj kada se broj merenih impulsa nije menjao osetno, što znači da je geometrija eksperimenta omogućavala da čestice dospeju do detektora. To je ujedno značilo da je pređen maksimalni domet i da se registruje samo pozadinsko zračenje [79], [80].

Snimanja su vršena za svako rastojanje, zavisnost $U-n$ (U je napon na jednocanalnom analizatoru, n je broj impulsa na skaleru sa širinom kanala 0,5 V oko svakog maksimuma broja impulsa n za određeno rastojanje d).

Vrednosti za d se birale su se sledećim redom:

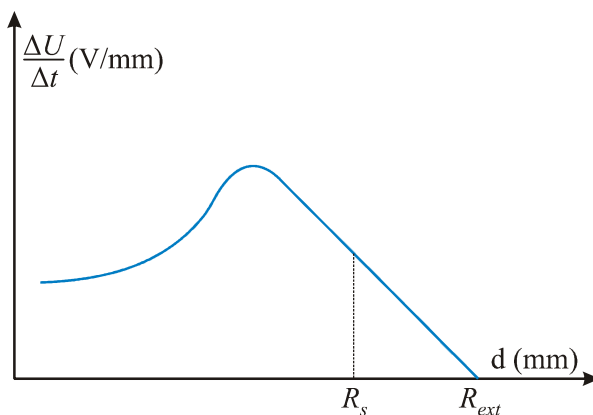
$d = 0, 4, 8, 12, 16, \quad 20, 22, 24, 26, 28 \quad 29,30,31,32$
skokovi po 4 mm skokovi po 2 mm skokovi po 1 mm

Zatim su rezultati predstavljeni grafički na sledećem dijagramu, gde je d parametar.



Slika 4.3. Spektri određeni višekanalnim analizatorom

Za konstruisanje Bragove krive korišćeno je: $\Delta U/\Delta S \sim \Delta E/\Delta S$. Iz tog razloga su se sa dijagrama očitavale vrednosti U koji odgovarale maksimalnom n za određeno d i predstavljale se grafički na sledećem dijagramu (sl. 4.4) što je davalo Bragovu krivu.

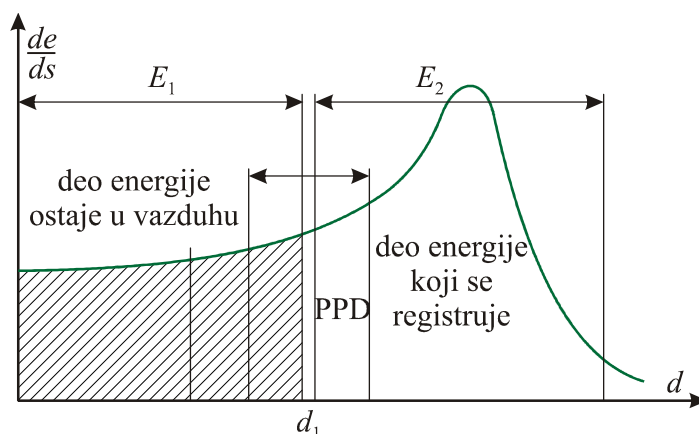


Slika 4.4. Bragova kriva

Sa nje se produženjem linearnog dela dobija ekstrapolisani domet $R_{ext} = d_{ext}$, a i srednji domet R_s . Srednji domet se dobija na sredini linearnog dela, a ekstrapolisani produženjem linearnog dela do preseka sa osnovnim nivoom. Zatim se iz dobijenih vrednosti određivala standardna devijacija dometa.

$$\sigma_R = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} (R_{ext} - R_s).$$

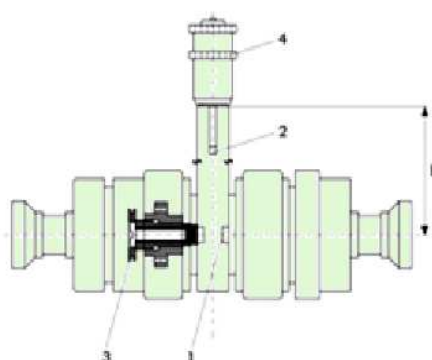
Iz dometa je zatim izračunata energija čestica na osnovu aproksimativnog obrasca.



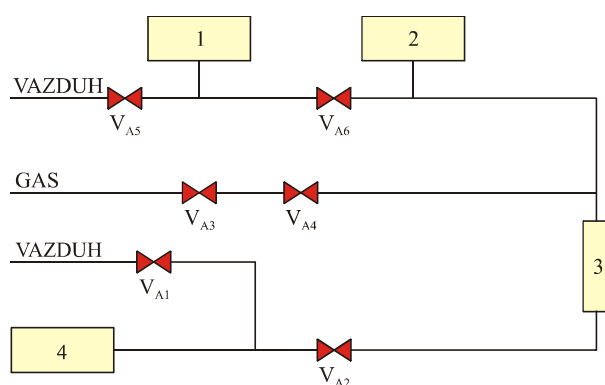
Slika 4.5. Princip merenja Bragove krive

4.1.4. MERENJE PROBOJNOG NAPONA

Na Slici 4.6 prikazana je ispitna gasno-vakuumska komora. Komora je bila projektovana za podpritiske i mogla je da održi podpritisk od 10^{-9} bara u toku 24 časa (sa mernom nesigurnošću tip B 3% [81]). Komora je povezivana sa gasnim kolom i sistemom vakuum pumpi, prikazanim na Slici 4.7.



Slika 4.6. Ispitna gasno-vakuumska komora (1 – sistem elektroda; 2 – nosač radioaktivnog izvora; 3 – popuna međuelektrodnog zazora i 4 – popuna rastojanja između radioaktivnog izvora i međuelektrodnog rastojanja); i -dužina koja odgovara geometrijskim uslovima prethodnog eksperimenta (snimanja Bragove krive)



Slika 4.7. Šema gasnog kola (1 – apsolutni instrument, 2 – relativni instrument, 3 – komora, 4 – vakuum pumpa, V_{A1} , V_{A2} , V_{A3} , V_{A5} i V_{A6} su dvopoložajni ventili, a V_{A4} je mikrometarski dozir ventil)

Elektrodni sistem korišćen u komori obezbeđivao je homogeno električno polje primenom elektroda oblika Rogovskog, prilagođivan obliku električnog polja, približnih dimenzija 17 mm. Nulta tačka međuelektrodnog rastojanja određivana je merenjem omske otpornosti. Pritisak gasa, odnosno rezidualnog gasa u slučaju vakuuma, podešavan je nakon višestrukih ispiranja komore tim gasom. Pod ispiranjem komore se ovde podrazumeva naizmenično vakuumiranje komore do pritiska 10^{-9} bara i punjenje radnim gasom do pritiska 1bar. Nakon ispiranja komore podešavan je željeni pritisak pomoću preciznih igličastih ventila koji je odgovarao vrednosti pritiska pod kojim je prethodno snimljena odgovarajuća Bragova kriva. Vrednosti radnog pritiska su svodene na 0°C . Merna nesigurnost tip B podešavanja radne tačke (pritisak, međuelektrodno rastojanje) bila je manja od 5% [82-85]. Na komori sa Slike 4.6 se uočava bočna konstrukcija sa mirkometarskim zavrtnjem. Ova konstrukcija je služila za nošenje i pozicioniranje kolimisanog α izvora. Kao α izvor korišten je ^{241}Am . Mikrometarski zavrtnj na ovoj konstrukciji je služio za podešavanje rastojanja između izvora i tačke u, ili oko, međuelektrodnog prostora u kojoj je trebao da se nalazi Bragov maksimum za dati pritisak radnog gasa. Bragov maksimum se nalazi na kraju Bragove krive koja predstavlja zavisnost relativne specifične jonizacije i dometa α -čestica, i javlja se kao posledica stupanja α -čestice u termalnu ravnotežu sa česticama radnog gasa. On znatno nadmašuje po efikasnosti jonizacionog procesa ostale tačke putanje α čestice [86-90]. Stoga se može smatrati, u prvoj aproksimaciji, da ovakva konstrukcija omogućava drastično povećanje broja jonsko-elektronskih parova unutar komore u tačno željenoj tački.

Prilikom utvrđivanja uticaja materijala elektroda na vrednost probajnog napona, elektrode su pravljene od bakra (izlazni rad 4,47eV), aluminijuma (izlazni rad 3,74eV), od legure aluminijuma-elektrona (izlazni rad 1,8eV) i od volframa (izlazni rad 4,5eV). Ova selekcija materijala je izvršena na osnovu velikog raspona vrednosti izlaznog rada, kao i na osnovu različitih vrednosti tačaka topljenja i toplotne provodnosti [16], [17]. Cilindrične bakarne elektrode su korišćene za utvrđivanje uticaja načina obrade elektrodnih površina na električni probaj. Aktivna površina bakarnih elektroda je peskarena ili polirana.

4.1.5. EKSPERIMENTALNI POSTUPAK

Eksperimentalni postupak sastojao se u sledećim koracima:

1. Formiranje elektrodnog sistema i zaptivanje komore.
2. Postavljanje komore u gasno-vakuumski krug.
3. Višestruko ispiranje komore radnim gasom.
4. Podešavanje pritiska radnog gasa (svedenog na 0°C u komori).
5. Kondicioniranje elektrodnog sistema sa 100 uzastopnih probojnih impulsa.
6. Merenje 1000 uzastopnih vrednosti dc probojnog napona.
7. Pozicioniranje Bragovog maksimuma u centar međuelektrodnog rastojanja.
8. Ponavljanje prethodnog merenja sa dc probojnim naponom suprotnog polariteta.
9. Merenje 1000 uzastopnih vrednosti impulsnog probojnog napona.
10. Ponavljanje prethodnog merenja sa impulsnim naponom suprotnog polariteta.
11. Ponavljanje merenja pod 6, 7, 8, 9 i 10 uz pozicioniranje Bragovog maksimuma u centar međuelektrodnog prostora i u okolini linije polja duž koje, prema prethodnom proračunu, postoji najveća verovatnoća pojave ivičnih proboja (anomalnog Pašenovog efekta).
12. Postavljanje novog elektrodnog sistema i naredne radne tačke (pritisak, međuelektrodno rastojanje i ponavljanje merne procedure).

4.1.6. OBRADE EKSPERIMENTALNO DOBIJENIH REZULTATA

Procedura obrade eksperimentalno dobijenih rezultata se sastojala u sledećim koracima:

1. Primena Šoveneovog kriterijuma na statističke uzorke, od po 1000 slučajnih promenljivih dc probojni napon i impulsni probojni napon i 100 slučajnih promenljivih emisija karakteristika, dobijenih merenjem i odbacivanje nepouzdanih rezultata.

2. Ispitivanje pripadnosti slučajnih promenljivih ili sukcesivnih delova slučajnih promenljivih (u slučaju da analiza pripadnosti statističkim raspodelama ukazuje na mogućnost da se radi o složenoj stastističkoj raspodeli aditivnog tipa) pojedinačnih statističkih uzoraka jedinstvenoj statističkoj raspodeli.
3. Primenom χ^2 testa, testa Kolmogorova i grafičkog testa testirane su slučajne promenjive na pripadnost normalnoj raspodeli, Vejbulovoj raspodeli i duploeksponecijalnoj raspodeli.
4. Određivanje parametara prethodno identifikovanih raspodela slučajnih promenljivih pojedinačnih statističkih uzoraka, momentnom i metodom maksimalne verodostojnosti.
5. Grafičko prikazivanje dobijenih parametara u zavisnosti od parametara eksperimenta (pritisak, međuelektrodno rastojanje, vrsta rezidualnog gasa, material, topografija elektroda i vrsta primenjenog napona).

4.2. EKSPERIMENT II, EKSPERIMENTALNI POSTUPAK I OBRADA EKSPERIMENTALNIH REZULTLTA

Ekspertiment II bio je usmeren na ispitivanje uticaja vrste prethodno izvršenih sklopnih operacija vakuumskih sklopnih elemenata na probojni napon i pretprobajne struje, odnosno na ispitivanje korelacije i regresije između njih.

4.2.1. ISPITNI VAKUUMSKI SKLOPNI ELEMENTI

Ispitivanja vršena na vakuumskim sklopnim elementima tip A, tip B sa CuCr kontaktima i tip C, tip D sa CuBi kontaktima. Parametri za sve tipove sklopnih komora dati su u Tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Parametri ispitivanih vakuumskih sklopnih elemenata

	tip A	tip B	tip C	tip D
nazivni linijski napon [kV]	12	12	12	12
nazivna trajna struja[kA]	2	1,6	2	1,6
struja prekidanja k.s. [kV]	20	20	20	20
procenat asimetrije [%]	50	50	50	50
struja uklapanja k.s. [kA]	50	50	50	50
hod kontakta [mm]	8	8	8	8

Izolacioni omotač (cilindričnog oblika) je bio kod svih tipova sklopnih komora napravljen od keramike Al_2O_3 . Kontakti su bili zatvoreni u komore, tako da im se nisu videli oblik i veličina.

4.2.2. PODEŠAVANJE RASTOJANJA KONTAKATA

Za merenje dielektričke čvrstoće kondicioniranih kontakata bilo je potrebno kontakte vakuumske sklopne komore razmaknuti na zadato međukontaktno rastojanje. To se postizalo (posebno za to izrađenim) pristrojem, koji se pričvršćavao na nosač pokretnog kontakta. Pristroj je na poseban način pretvarao rotiranje svog pokretnog člana (sa finim navojem) u translatorno pomeranje nosača pokretnog kontakta i to $1mm = 360^\circ$. Na taj način moglo se vrlo precizno namestiti međuelektrodno rastojanje preko ugaonog položaja pokretnog člana pristroja. Nulto rastojanje kontakata je određivano položajem kada prestaje električni kontakt (mereno pomoću ommetra).

4.2.3. POGON PREKIDAČA

Za izvršavanje sklopnih operacija sa vakuumskim sklopnim komorama, sklopne komore trebalo je staviti u odgovarajući prekidač sa pogonom. Sklopne komore tip A stavljene su u model prekidača konstruisanog i napravljenog u IRCE-u (Istraživačko Razvojni Centar za Elektroenergetiku, Energoinvest, Sarajevo). Pogon je bio motorno opružni. Bile su postignute one karakteristike pogona, koje je specificirao proizvođač sklopnih komora. Sila kontaktnog pritiska je bila 1500 N. Srednja brzina kontakata pri isklopu u prvih 6 ms nakon razdvajanja kontakata je bila 0,9 m/s. Srednja brzina kontakata pri uklopu poslednje je bila 3 m/s a pre dodira kontakata 0,6 m/s. Trajanje odskakivanja kontakata je bilo < 2ms. Karakteristike hod-vreme u operaciji uklop bez struje, i isklop bez struje vršene su induktivnim davačem HEWLETT-PACKARD, čiji je pokretni član bio povezan sa nosačem pokretnog kontakta, a izlazni signal je bio sniman digitalnim osciloskopom GOULD.

Sklopne komore tip B, tip C i tip D bile su stavljene u prekidač koji je proizveo isti proizvođač kao i komore. Pogon je bio elektromagnetni (napajanje elektromagneta 220 V jednosmerno). Karakteristike pogona su: sila kontaktnog pritiska 1200 N, srednja brzina kontakata pri isklopu 1,5 m/s i uklopu 0,8 m/s, trajanje odskakivanja kontakata < 2ms. Izvršeno je merenje vlastitih vremena pogona oba prekidača za operaciju isklopa, kako bi se moglo sinhronizovati otvaranje kontakata ispitivanih sklopnih elemenata sa strujom koju treba da prekinu (mereno je vreme između trenutka kada kalem dobije napon do trenutka kada se kontakti otvore).

4.2.4. IZOLOVANJE SKLOPNIH KOMORA OD VANJSKIH PRESKOKA

Pošto se očekivalo da će probojni napon međuelektrodnog rastojanja u vakuumu u pojedinim ispitivanjima biti veći od probojnog napona kroz vazduh po površini izolacionog omotača komora, trebalo je sprečiti te neželjene spoljne preskoke.

U tu svrhu kod ispitivanja kondicioniranih kontakata, kompletna sklopna komora sa pristrojem za podešavanje rastojanja kontakata je stavljena u najlonsku kesu napunjenu gasom SF₆ pritiska 1,2 bar. Napravljene su naponski dovodi od tanke žice i sve je pažljivo zalepljeno, tako da nije primećeno oticanje gasa. Kod dielektričnih ispitivanja nakon sklopnih operacija jedan pol prekidača sa komorom tip A je stavljen u posebno skrojenu najlonsku kesu napunjenu gasom SF₆ pritiska 1,2 bar, dok je prekidač sa komorama tip B tip C i tip D kompletan stavljen u kesu napunjenu sa SF₆. Pažljivo su zalepljeni svi otvori tako da nije bilo primetnog oticanja gasa. Izgled prekidača tip B stavijenog u kesu sa SF₆ može se videti na Slici 4.8.



Slika. 4.8. Ispitni krug u Niskonaponskoj laboratoriji IRCE-a

4.2.5. VISOKONAPONSKI IZVORI

Tokom eksperimentalnog postupka praćenja naizmjeničnog i impulsnog proboja vakuuma kvalitet visokog napona, to jest njegova čistoća i ponovljivost, su od posebnog značaja. Zbog toga je korišćenim visokonaponskim izvorima bila posvećena posebna pažnja.

4.2.5.1. IZVOR IMPULSNOG NAPONA

Za proizvodnje impulsnog napona korišćen je Marx-ov udarni generator (proizvodnje Haefely). Generator je imao četiri stepena sa kondenzatorima 70 kV/200 nF. Korišćen je spoj generatora koji daje talas 1,2/50 μ s. Stalno se radilo sa premašujućim naponima, tako da je proboj uvek bio na čelu talasa. Okidanje udarnog generatora ostvarivano je nakon punjenja kondenzatora generatora na željeni napon, tako što je smanjivano rastojanje iskrišta, putem ugrađenog hidrauličnog pogona. Korišćen je onaj broj stepeni koji je bio potreban za postizanje date vršne vrednosti udarnog napona. Za ispitivanje vakumskih dioda i elektroda stavljenih u vakuumsku komoru korišćen je samo jedan stepen generatora, dok su za ispitivanja kondicioniranih vakuumskih sklopnih komora korišćena i sva četiri stepena.

4.2.5.2. IZVOR NAIZMENIČNOG NAPONA

Naizmjeničnim naponom su dielektrički ispitivani samo vakuumski sklopni elementi. Za ispitivanja kondicioniranih kontakata, koja su se izvodila u SNL (srednje naponska laboratorija), korišćen je visokonaponski ispitni trafo proizvodnje CAEC 130 kV_{eff} / 30 kVA, prenosnog odnosa 1:300. Napajan je iz regulacionog trafoa 220 V/0-500V. Za ispitivanja kontakata nakon sklopnih operacija u Niskonaponsku laboratoriju IRCE-a prenesen je visokonaponski ispitni trafo proizvodnje VMT-Energoinvest 130 kV_{eff} / 7 kVA, prenosnog odnosa 1:600. Napajan je iz istog regulacionog trafoa kao prethodni ispitni trafo. Kod oba ispitna trafoa korišćen je isti elektronski uređaj za detektovanje proboja i automatsko isključenje napona na ispitnom trafou.

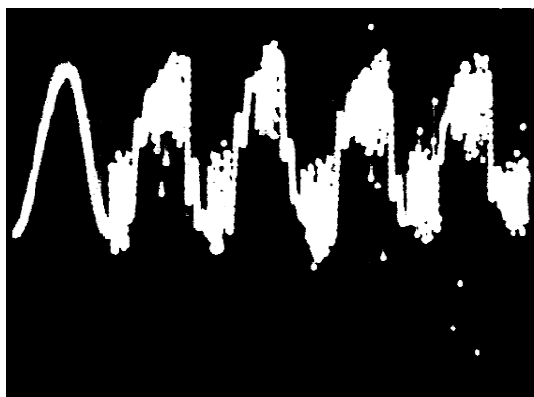
4.2.5.3. IZVOR JEDNOSMERNOG NAPONA

Za dielektrička ispitivanja vakuumskih dioda korišćen je visokonaponski jednosmerni izvor (proizvodnje Turr) sa maksimalnim naponom 30 kV i snagom 3 kVA. Ripl (talasnost) jednosmernog napona je bio manji od 1%. Visokonaponski trafo ispravljača napajao se preko regulacionog trafoa i to je omogućavalo podešavanje brzine porasta jednosmernog napona. Za automatsko isključenje visokonaponskog trafoa u slučaju proboja, korišćen je već navedeni elektronski uređaj. Kao *dc* izvor pri merenju emisione struje kontakata pre sklopnih operacija korišćena je visokonaponska dioda (proizvodnje Turr) za napone do 90 kV vršno, vezana sa ulazne strane na visokonaponski ispitni trafo, a sa izlazne strane na 4 visokonaponska kondenzatora 125 kV/100 nF u paraleli. Ripl (talasnost) izlaznog napona je bio manji od 5%. Veličina jednosmernog napona podešavala se preko regulacionog trafoa. Dioda je sa izlazne strane zaštićena iskrištem koje je proradivalo u slučaju da je napon na kondenzatoru premašivao 85 kV.

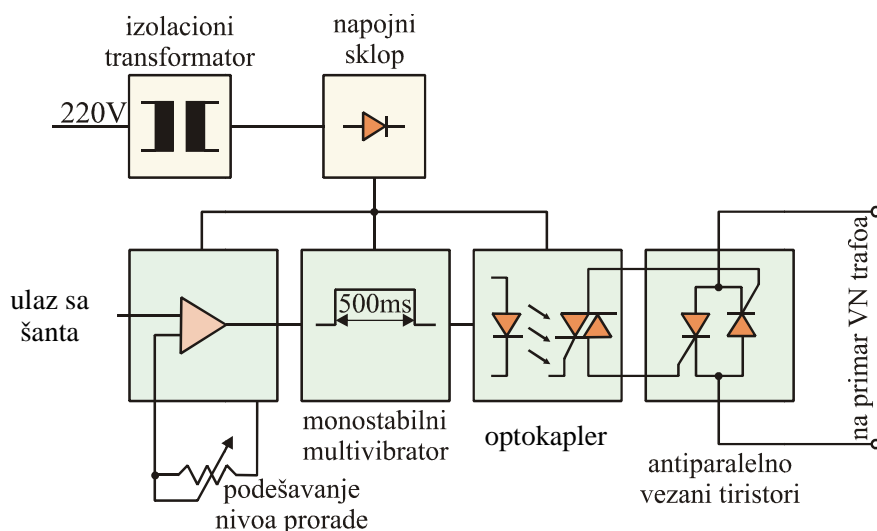
4.2.5.4. ELEKTRONSKI UREĐAJ ZA AUTOMATSKO ISKLJUČENJE ISPITNOG TRAFOA

Vakuum je, kao izolacioni medij, specifičan po tome što, ako pri dielektričnom ispitivanju naponom koji nije impulsni dođe do proboja, luk koji tada nastaje održava se samo ako je dovoljno velika struja luka da obezbeđuje stabilno gorenje luka. U protivnom, luk se spontano gasi i obnavlja se dielektrična čvrstoća vakuumskog razmaka. Ako je dovedeni visoki napon dovoljno veliki, dolazi do ponovnog proboja . . . itd. Tako može nastati niz uzastopnih proboja i obnavljanja dielektrične čvrstoće, kao što je prikazano na snimljenom oscilogramu takve jedne pojave na slici 4.9. Problem je što se proboj veoma brzo raščičava (mikrosekundni domen), tako da kroz primar ispitnog trafoa ne može teći struja kratkog spoja, odnosno ne može reagovati prekostrujna zaštita koja se obično postavlja na primar ispitnog trafoa. Iz tog razloga je bio napravljen elektronski uređaj, koji je palio dva tiristora postavljena antiparalelno sa primarom ispitnog trafoa. Blok-šema uređaja je data na Slici. 4.10. Proboj se detektuje tako što se na šantu $R = 1500$

postavljenom u seriju sa ispitivanim objektom u slučaju proboja pojavljuje napon veći od 50 V i to daje signal elektronskom sklopu da provedu tiristori.



Slika. 4.9. Pojava uzastopnih proboja prilikom dielektričnih ispitivanja naizmeničnim naponom kondicioniranih kontakata vakuumskih sklopnih elemenata; ($I_{div}=50\text{ kV}$ vršno)



Slika. 4.10. Blok-šema elektronskog sklopa za automatsko isključenje ispitnog trafoa

4.2.5.5. IZVOR VELIKE STRUJE

Mali napon vakuumske luka ($U_L < 100$ V) omogućuje da se sklopni eksperimenti sa vakuumskim lukom realizuju pomoću izvora niskog napona. Kao izvor velike struje u sklopnim ispitivanjima sa vakuumskim sklopnim komorama poslužio je kratkospojni generator (proizvodnje BBC) u Stanici velike snage LNN (laboratorija niskog napona) IRCE-a, snage 2x40 MVA, i napona generatora 1080 V, 625 V, 540 V, zavisno od spoja namotaja generatora. (Kinetičku energiju rotor generatora za vreme kratkog spoja dobija od zamajca, koji je prethodno bio ubrzan pomoću motorne grupe). Struja u kolu generatora je bila ograničena kratkospojnim prigušnicama i mogla se regulisati promenom induktiviteta kruga, ili promenom pobude generatora. Obavezni elementi kruga velike struje su uklopna sklopka i zaštitni prekidač, veoma robusni aparati proizvodnje UNELEC sa hidrauličnim pogonom. Upravljanje hidrauličnim pogonom je vršeno preko elektromagnetnih ventila sa vrlo stabilnim vremenom prorade. Automatsko upravljanje elementima jakostrujnog kruga, kod kojih nije bitno upustiti ih u rad sa tačnošću ispod 10 ms, vršeno je elektronskim programerom BBC. Oni elementi koji traže veoma precizno upuštanje u rad uključuju se sinhronim uključivačem ISKRA sa max greškom od $\pm 3^\circ$. U posmatranom slučaju sinhroni uključivač je davao nalog kalemu okidača ispitivanih prekidača da se otpočne operacija isklopa.

4.2.6. MERNI UREĐAJI

U oblasti tehnike visokih napona, pored toga što je potrebno imati kvalitetne izvore napona, neophodno je imati pouzdane merne sistema. Pri tome se pod mernim sistemom podrazumeva delitelj napona, prenosni sistem i registrujući sistem. Da bi se minimizirao šum merenja, prenosni sistem treba biti negalvanskog tipa ili uzemljen (tačnije dvostruko "širmovan" provodeći kroz 0 potencijal), a registrujući instrumenti trebaju biti u mernoj kabini zaštite reda 100 dB. Pored toga u celom mernom sistemu trebaju sve tačke biti zatvorene karakterističnim impedansama da bi se izbegle refleksije mernog talasa. Merna oprema korišćena u ovom radu je ispunjavala sve ove uslove.

4.2.6.1. MERENJE VISOKOG NAPONA

Vremenska promena visokog napona merila se deliteljima napona. Za udarni napon koristio se niskoomski otpornički delitelj $R_0=10\text{ k}\Omega$ prenosnog odnosa 273. Sa njegovog niskonaponskog dela signal je vođen koaksijalnim kablom 75Ω na ulaz registrujućeg uređaja koji je u svim merenjima bio Tektronixov digitajzer. Kabl je završavan otporom 75Ω .

Za jednosmerni napon koristio se visokoomski otpornički delitelj $132\text{ M}\Omega/23,4\text{ k}\Omega$ prenosnog odnosa 5600. Sa njegovog niskonaponskog dela skidan je signal i vođen običnim dvožilnim kablom na ulaz registrujućeg uređaja (digitajzer Tektronix). Za naizmenični napon korišten je u SNL čisto kapacitivni delitelj Micafil 200 kV (sa gasnim visokonaponskim kondenzatorom 20 pF) prenosnog odnosa 8000, a u Niskonaponsku laboratoriju je prenesen takođe čisto kapacitivni delitelj Haefely 600 kV (sa uljnim kondenzatorom 40 pF) prenosnog odnosa 1000:1. Sa niskonaponskog odcepa signal je vodjen koaksijalnim kablom 75Ω , do registrujućeg uređaja. U srednjenaponskoj laboratoriji to su bili Haefely-ev digitalni vršni voltmetar i digitajzer Tektronix, a u Niskonaponskoj laboratoriji su bili vršni voltmetar sa svetlećom mrljom Haefely i digitajzer Tektronix.

4.2.6.2. MERENJE NAPONA I STRUJE ELEKTRIČNOG LUKA

Napon električnog luka meren je omskim deliteljem $8\text{ k}\Omega/2\text{ k}\Omega$, prenosnog odnosa 5:1. Sa niskonaponskog dela delitelja signal je vođen upredenim dvožilnim kablom na registrujući uređaj (oscilograf sa svetlećim pokretnim zrakom SIEMENS). Kod merenja napona luka postoji velika razlika u veličini napona luka i vršne vrednosti p. p. n. -a koji se javi nakon gašenja luka, tako da je potrebno raditi na većem području ulaznog signala oscilografa, što onda dovodi do toga da se gubi na osetljivosti i rezoluciji merenja. Problem je rešen tako što je paralelno ulazu oscilografa stavljen antiserijski spoj dve Zener diode, koji odseca ulazni signal ako pređe Zenerov-ov probojni napon. Merenje struje električnog luka realizovano je koaksijalnim šantom $0,1\text{ m}\Omega$, predviđenim za struje do $40\text{ kA}_{\text{eff}}$. Signal sa šanta se vodi upredenim dvožilnim kablom na registrujući uređaj (oscilograf SIEMENS).

4.2.6.3. MERENJE EMISIONE STRUJE

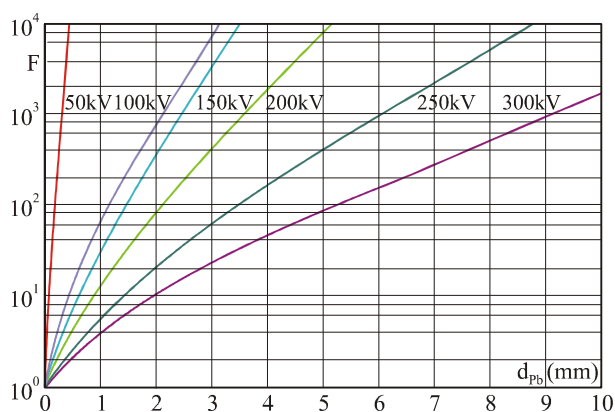
Merenje emisione struje se izvodilo samo za kontakte vakuumskih sklopnih elemenata. Merenje se realizovalo preko šanta 1500Ω postavljenog u seriju sa ispitnim objektom. Naponski signal sa šanta je preko koaksijalnog kabla vođen na jedan kanal digitajzera Tektronix. Na drugi kanal je, kao što je to već navedeno, vođen signal sa visokoomskog otporičkog delitelja. Na ispitni objekat je dovođen jednosmerni napon sa brzinom porasta od približno 20 kV/s , tako da se mogla zanemariti kapacitivna struja između kontakata sklopne struje i celokupna izmerena struja kroz šant se mogla pripisati emisiji sa katode. Za obradu rezultata uzimani su naponi V_{-6} , V_{-5} , V_{-4} i pri kojima sa katode teku struje elektronske emisije od 10^{-6} A , 10^{-5} A , 10^{-4} A respektivno.

4.2.6.4. REGISTROVANJE MERNIH SIGNALA

Kao što je već navedeno registrovanje mernog signala za napon na ispitivanom objektu je kod svih dielektričkih ispitivanja realizovano pomoću digitajzera Tektronix 3S0 AD. Digitajzer je imao: 2 kanala, frekvenciju semplovanja od maksimalno 60 MHz , rezoluciju 10 bita, memoriju od 2048 tačaka po kanalu, mogućnost pre-trigera na pojavu, eksternog trigera, ulaznu impedansu $10 \text{ M}\Omega$ itd. Za impulsni napon uzimana je frekvencija semplovanja 60 MHz , za naizmenični 20 kHz , a za jednosmerni 500 Hz . Digitajzer je bio povezan koaksijalnim kablovima sa osciloskopom Tektronix, koji je bio u X-Y modu i služio kao displej za prikazivanje sadržaja memorije kanala. Na taj način je bilo moguće direktno očitavati vrednosti pojedinih tačaka snimljene merne veličine. Polaroid-kamerom je bilo moguće fotografisati sadržaj displeja osciloskopa.

4.2.7. ZAŠTITA OD X-ZRAČENJA

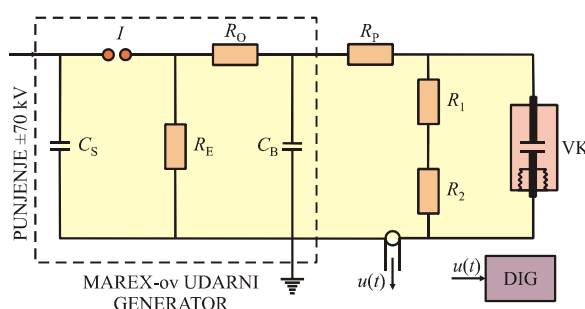
Prilikom dielektričnih ispitivanja međuelektrodnog razmaka u vakuumu dolazi do nastanka X-zračenja. Elektroni emitovani iz katode ubrzavaju se u međuelektrodnom prostoru i praktično bez sudara stižu do anode. Veliku kinetičku energiju koju zadobiju u preletu, prilikom sudara sa anodnom, ili predaju u vidu toplotne energije atomima anode ili jedan mali procenat elektroni izrače u vidu zakočnog zračenja i to predstavlja X-zračenje. Za ispitivanja na vakuumskim diodama i na elektrodama u vakuumskoj komori suviše su bili mali probajni naponi, da bi bilo opasnijeg X-zračenja. Kod ispitivanja vakuumskih sklopnih elemenata trebalo je preduzeti mere zaštite. Iz literature [77] preuzet je dijagram zavisnosti slabljenja intenziteta X-zračenja od debljine olovnog ekrana prikazan na sl. 4.11. U [77] meren je intenzitet X-zračenja za 24 kV komercijalne vakuumске sklopne komore i dobijen je uopšte najveći intenzitet zračenja od 200 mR/h pri 200kV. Pokazuje se da bi debljina ekrana od 2 mm bila dovoljna za zaštitu od tog zračenja (tako da se dobije iza paravana intenzitet zračenja manji od 2,5 mR/h). Zato su napravljeni olovni paravani debljine 4 mm i postavljeni su između sklopnih komora i pulta ispitnog trafoa, a oko pulta je napravljena paravan kabina debljine 1 mm da neutrališe eventualno reflektovano zračenje od zidova. Intenzitet X-zračenja unutar paravan kabine tokom dielektričnih ispitivanja naizmeničnim naponom merili su specijalisti iz Instituta za zaštitu zdravlja BiH, Sarajevo, ali nisu izmerili intenzitet zračenja veći od prirodnog fona.



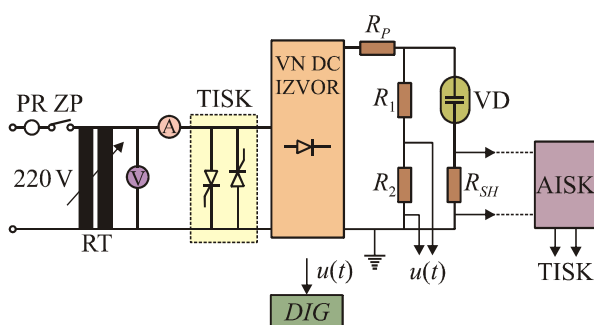
Slika. 4.11. Prigušenje intenziteta X-zračenja u funkciji debljine olova za razne energije X-zraka

4.2.8. ŠEMA ISPITNIH KRUGOVA

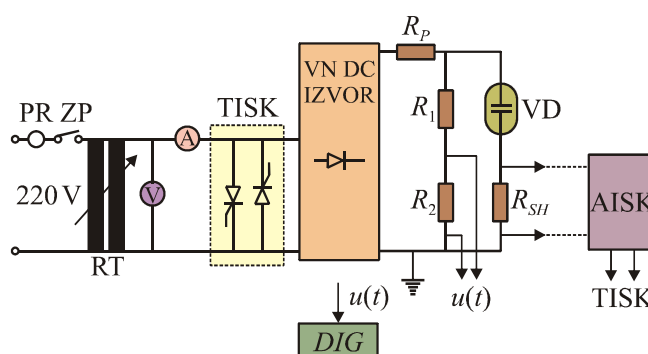
Dielektrična ispitivanja na promenljivim elektrodama koje se postavljaju u vakuumsku komoru vršena su u ispitnom krugu čija je šema data na sl. 4.12. To je uobičajeni krug za visokonaponska ispitivanja udarnim impulsom i sve njegove komponente su opisane u prethodnim odeljcima. Vrednost otpora za ograničenje struje pražnjenja je uzeta kao $R = 15000 \Omega$.



SIka. 4.12. Visokonaponsko ispitno kolo sa udarni impulsni napon (C_S - udarni kondenzatori, I - upravljivo iskriste, R_E - otpornik za začelje talasa, R_O - prigušni otpornik, R_1 , R_2 - niskoomski otpornički delitelj, VK - ispitivana vakuumaska komora, R_p - predotpor, DIG - digitajzer)



SIka. 4.13. Visokonaponski krug za dielektrička ispitivanja jednosmernim naponom (PR - prekostrujni relej, ZP - zaštitni prekidač, RT - regulacioni trafo, $TISK$ - tiristori za kratko spajanje primara $VN DC$ izvora, $VN DC$ izvor (proizvodnje Turr), R_p — predotpor, R_{SH} - davač sa $AISK$, $AISK$ — uređaj za automatsko isključenje $VN DC$ izvora, VD - ispitivana vakuumaska dioda, R_1 , R_2 – visokoomski otpornički delitelj, DIG - digitajzer)



Slika 4.14. Visokonaponski ispitni krug za naizmenični napon i istosmerni napon: PR-prekostrujni relej; ZP-zaštitni prekidač; RT-regulacioni trafo; TISK-tiristori za kratko spajanje ispitnog trafoa; IT-visokonaponski ispitni trafo; R_p -predotpor; C_1 , C_2 -kapacitivni delitelj; VK-ispitivana vakuumaska komora; R_{SH} davač za uređaj za automatsko isključenje ispitnog trafoa; AISK-uređaj za automatsko isključenje ispitnog trafoa; R_m -merni otpornik za merenje emisije struje u istosmernom ispitnom krugu; prov 1, prov 2- provodnici za uključivanje/isključivanje jednosmernog ispitnog kruga; prov 3-provodnik za uključivanje/isključivanje naizmeničnog ispitnog kruga; VND-visokonaponska dioda; ZI-zaštitno iskrište; C_{ISP} -kondenzator ispravljača; R_{ISP} -otpornik ispravljača; R_1 , R_2 -visokoomski otpornički delitelj; DIG digitajzer

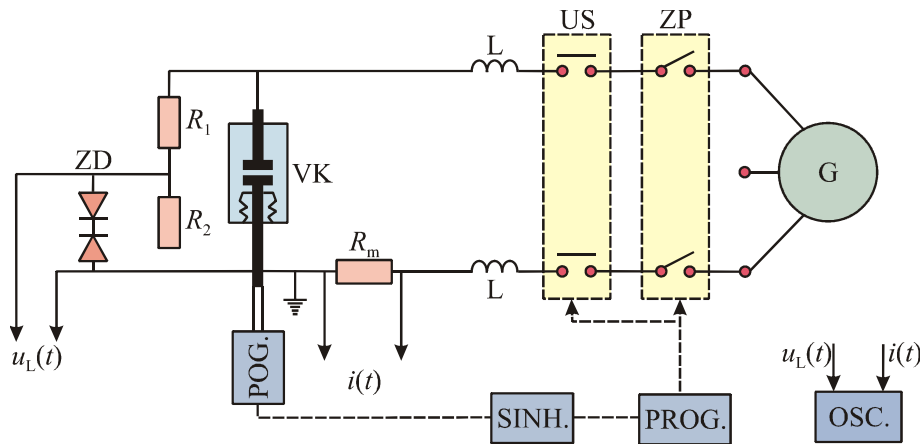
Dielektrična ispitivanja udarnim impulsnim naponom za vakuumske diode vršena su u istom kolu sa svim parametrima kolaa nepromenjenim. Dielektrična ispitivanja jednosmernim naponom za vakuumske diode vršena su u tom ispitnom krugu čija je šema data na sl. 4.13. Kao izvor visokog jednosmernog napona korišćen je Turr-ov jednosmerni visokonaponski izvor. Vrednost predotpora za ograničenje struje je bio $R_p = 5000\Omega$. Dielektrična ispitivanja udarnim impulsnim naponom za kondicionirane kontakte vakuumskih sklopnih elemenata vršena su takođe u krugu sa šemom na Slici 4.12. Dielektrična ispitivanja naizmeničnim naponom i merenje emisionih karakteristika jednosmernim naponom vršena su u ispitnom krugu sa šemom na Slici 4.14. Pri tome su tokom ispitivanja naizmeničnim naponom provodnici PROVI i PROV2 bili skinuti, a

PROV3 stavljen. Nasuprot tome, tokom ispitivanja jednosmernim naponom provodnici PROVI i PROV2 bili stavljeni, a PROV3 skinut. Ispitni trafo proizvodnje CEAE je u jednom slučaju koristio kao direktni ispitni izvor, a u drugom kao trafo ispravljača. Sve komponente kruga su opisane u prethodnim odeljcima. Vrednost predotpora za ograničenje struje je $R_p = 60k\Omega$. Izgled kruga za udarni impulsni napon i kruga za naizmenični napon fotografisani su na Slici 4.15. Sklopna ispitivanja prekidanja zadate struje vršena su u ispitnom krugu čija je šema data na Slici 4.16. Veličina struje u krugu regulisana je prigušnicama i pobudom generatora.

Dielektrična ispitivanja naizmeničnim naponom i merenje emisionih karakteristika jednosmernim naponom na kontaktima nakon sklopnih operacija vršena su u ispitnom krugu sa šemom na Slici 4.14. Za razliku od istog kruga za kondicionirane kontakte ovde je ispitni trafo proizvodnje VMT-Energoinvest i kapacitivni delitelj je proizvodnje Haefely. Izgled ovog kompletnog kruga, zajedno sa delom kruga jake struje fotografisan je na Slici 4.8.



Slika 4.15. Ispitni krug u Srednjenaponskoj laboratoriji IRCE-a



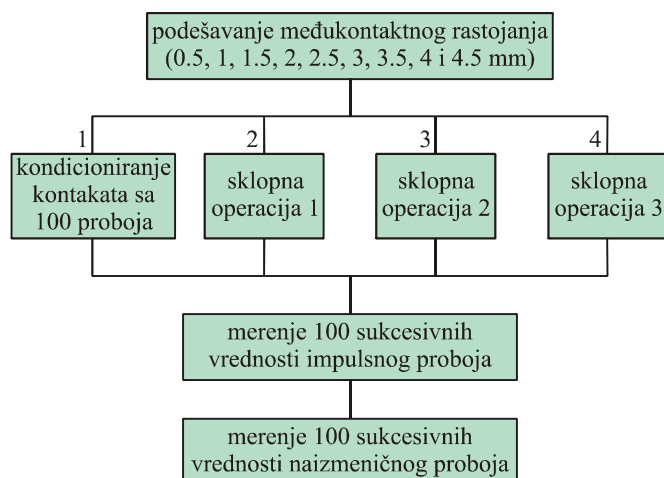
Slika. 4.16. Niskonaponski ispitni krug jake struje (G - kratkospojni generator sa zamajcem, ZP - zaštitni prekidač, US - uklopna sklopka, L - prigušnice, VK - vakuumna komora, $POG.$ - pogon ispitivanog prekidača, R_m - merni koaksijalni šant, R_1, R_2 - otpornički delitelj, ZD - zaštitne diode za ulaz oscilografa, OSC - oscilograf sa svetlećim zrakom)

4.2.9. EKSPERIMENTALNI POSTUPAK

Eksperimentalna procedura je sprovedena za tri različite sklopne operacije:

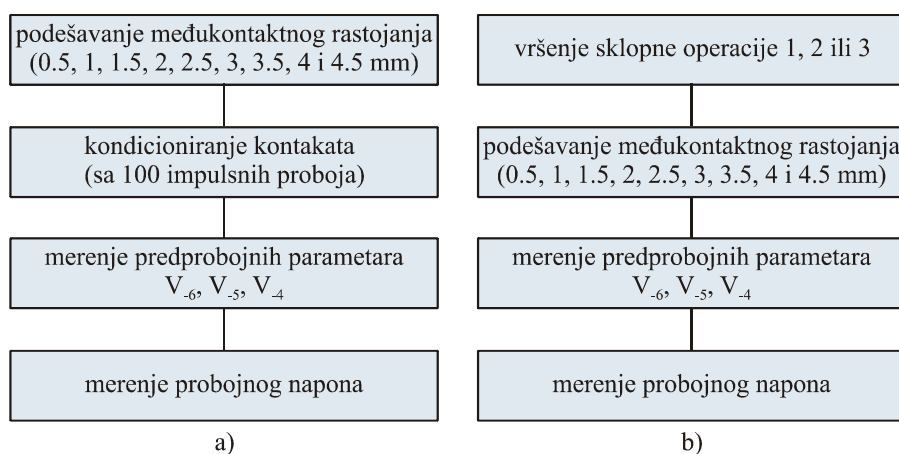
1. Uklop bez struje - rasklop bez struje (operacija 1).
2. Uklop bez struje - rasklop sa nominalnom strujom (operacija 2).
3. Uklop bez struje - rasklop sa nominalnom strujom kratkog spoja (operacija 3) kao i sa kondicioniranim kontaktima (operacija 0).

Dva tipa eksperimentalnih postupaka su sprovedena: Eksperiment IIa i Eksperiment IIb. Eksperiment IIa je vršen u cilju formiranja statističkih podataka slučajnih promenljivih impulsi probojni napon i naizmenični probojni napon. Blok dijagram eksperimenta IIa dat ja na Slici 4.17.



Slika 4.17. Blok dijagram eksperimentalnog postupka eksperimenta IIa

Ekspiriment IIb je vršen u cilju formiranja statističkih uzoraka slučajnih promenljivih: pretprobojni parametri V_{-6} , V_{-5} , V_{-4} , impulsni i naizmjenični probojni napon. Blok dijagram eksperimenta IIb prikazan je na Slici 4.18.



Slika 4.18. Blok dijagram eksperimentalnog postupka eksperimenta IIb
(a-kondicionirani kontakti; b-kontakti nakon sklopne operacije)

Merna nesigurnost je bila 4,6% (kombinovana merna nesigurnost) za jednosmerna merenja, 2,4% (merna nesigurnost tip B) za naizmjenična merenja, 4,8% (kombinovana nesigurnost) za impulsna merenja, 3,6% (merna nesigurnost tip B) za merenje nominalne struje i struje kratkog spoja, 2,3% (merna nesigurnost za merenje pretprobojnih parametara i manja od 0,5% (merna nesigurnost tip B) za merenje međukontaktne rastojanja.

4.2.10. OBRADA EKSPERIMENTALNO DOBIJENIH REZULTATA

Dobijeni statistički uzorci slučajnih promenljivih (dobijenih Eksperimentom IIa i IIb) pretprobojni parametri, impulsni probojni napon i naizmenični probojni napon su statistički obrađivani na sledeći način:

1. Snimljeni rezultati su uklanjani iz statističkog uzorka (primenom Šoveneovog kriterijuma).
2. Statistički uzorci od 100 slučajnih promenljivih su deljeni u 20 hronoloških poduzoraka od po pet slučajnih promenljivih koji su testirani U-testom da bi se proverilo da li svi uzorci pripadaju istoj statističkoj raspodeli.
3. Slučajne promenljive su za svaki uzorak testirane na pripadnost teoretskim statističkim raspodelama (grafički i Kolmogorov test su primenjivani), posmatrane teoretske raspodele su bile: normalna, Vejbulova i eksponencijalna
4. Korelacija između pretprobojnih parametara i probojnih napona je određivana primenom izraza 3.7.
5. Crtane su regresione krive između probojnih napona i pretprobojnih parametara primenom izraza 3.2 i 3.3.

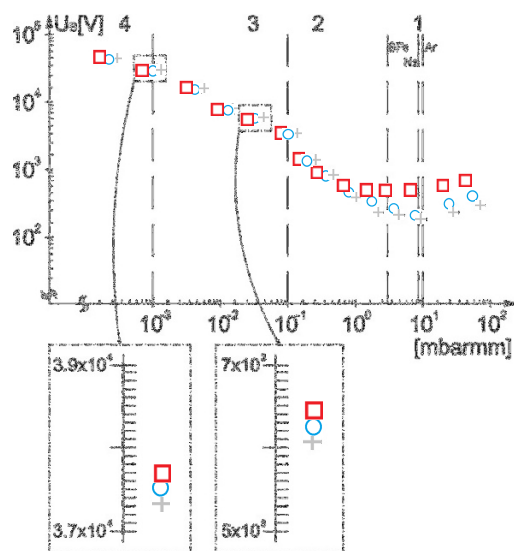
5. REZULTATI I DISKUSIJA

5. REZULTATI I DISKUSIJA

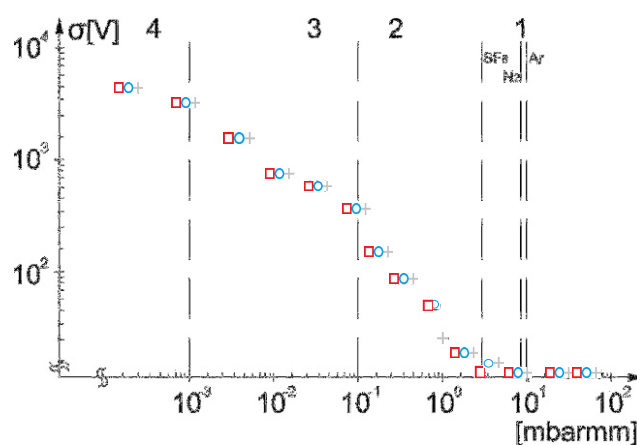
Rezultati dobijeni Eksperimentom I i Eksperimentom II su odvojeno diskutovani. Međutim, te rezultate u jednu celinu povezuje činjenica da se efekti uočeni eksperimentom II objašnjavaju mehanizmima proboja vakuuma koji su detaljno obrađeni diskusijom rezultata Eksperimenta I.

5.1. REZULTATI I DISKUSIJA EKSPERIMENTA I

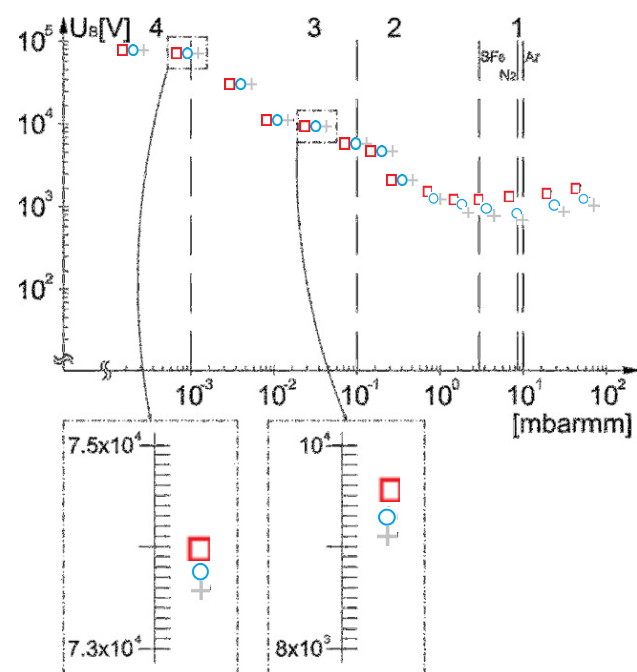
Na Slici 5.1a i 5.2a su prikazane zavisnosti srednje vrednosti dc i impulsnog probojnog napona od proizvoda pd (pritisak \times međuelektrodno rastojanje) uz parametar vrsta rezidualnog gasa, a na Slikama 5.1b i 5.2b odgovarajuća standardna odstupanja. Na slici 5.3 i 5.4 je data ista zavisnost za parametar međuelektrodno rastojanje. Na Slikama 5.5 i 5.6 prikazana je ista zavisnost za parametar materijal elektroda. Zavisnost dc impulsnog probojnog napona od proizvoda pd uz parametar topografija elektrodnih površina prikazana je na Slikama 5.7 i 5.8.



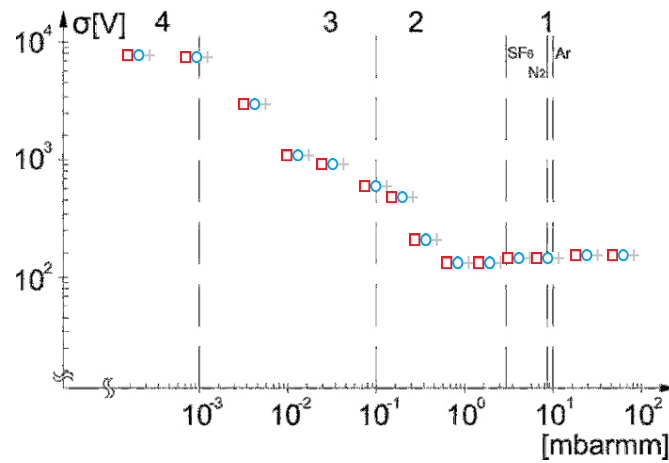
Slika 5.1a. Zavisnost srednje vrednosti dc probojnog napona sa vrstom gasa kao parametrom (\square - SF_6 , \circ - N_2 , $+$ - Ar); peskarene bakarne elektrode; međuelektrodno rastojanje 0.1mm



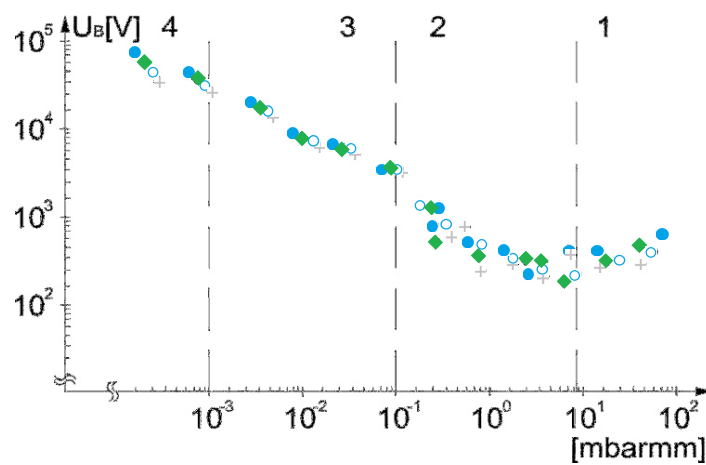
Slika 5.1b. Zavisnost odgovarajućeg standardnog odstupanja dc probajnog napona sa vrstom gasa kao parametrom (\square - SF₆, \circ - N₂, + - Ar); peskarene bakarne elektrode; međuelektrodno rastojanje 0.1mm



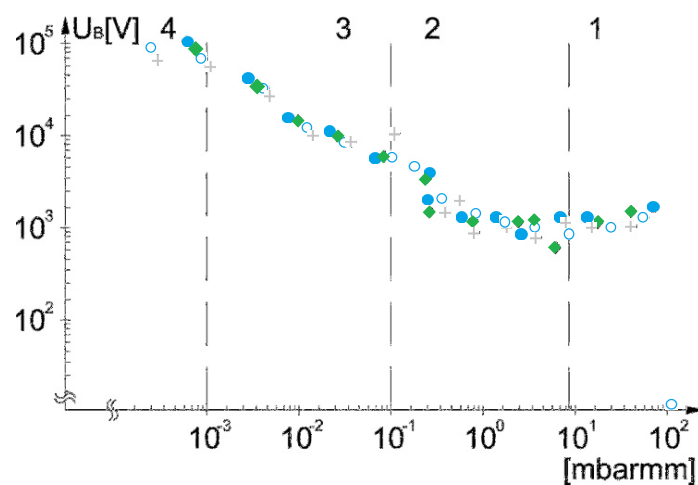
Slika 5.2a. Zavisnost srednje vrednosti impulsnog probajnog napona sa vrstom gasa kao parametrom (\square - SF₆, \circ - N₂, + - Ar); peskarene bakarne elektrode; međuelektrodno rastojanje 0.1mm



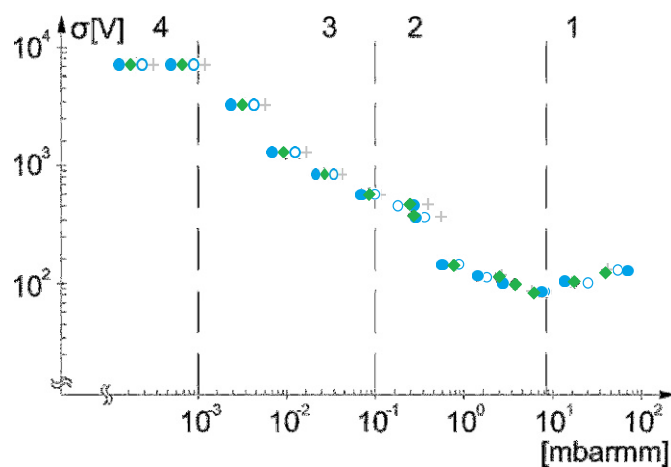
Slika 5.2b. Zavisnost odgovarajućeg standardnog odstupanja impulsnog probojnog napona sa vrstom gasa kao parametrom (\square - SF_6 , \circ - N_2 , $+$ - Ar); peskarene bakarne elektrode; međuelektrodno rastojanje 0.1mm



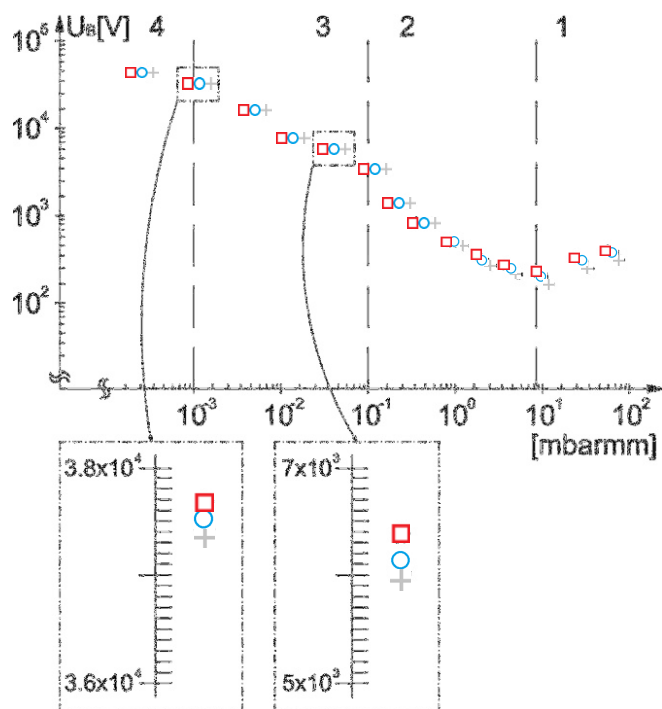
Slika 5.3a. Zavisnost srednje vrednosti dc probojnog napona sa međuelektrodnim rastojanjem kao parametrom (\circ - 0.1mm, \blacklozenge - 0.2mm, $+$ - 0.5mm, \bullet - 1mm); peskarene bakarne elektrode; gas N_2



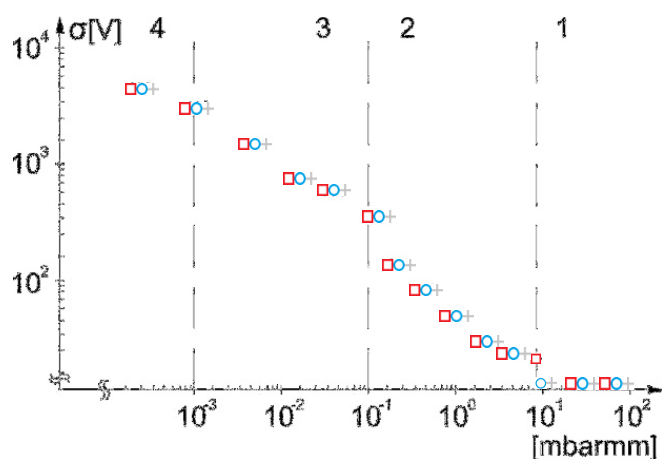
Slika 5.4a. Zavisnost srednje vrednosti impulsnog probojnog napona sa međuelektrodnim rastojanjem kao parametrom (○-0.1mm, ◆- 0.2mm, + - 0.5mm, ● - 1mm); peskarene bakarne elektrode; gas N_2



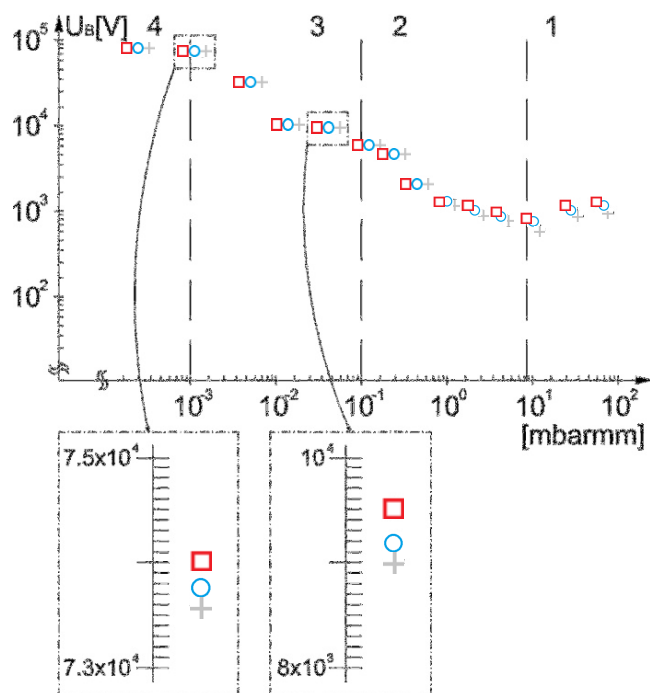
Slika 5.4b. Zavisnost odgovarajućeg standardnog odstupanja impulsnog probojnog napona sa međuelektrodnim rastojanjem kao parametrom (○-0.1mm, ◆- 0.2mm, + - 0.5mm, ● - 1mm); peskarene bakarne elektrode; gas N_2



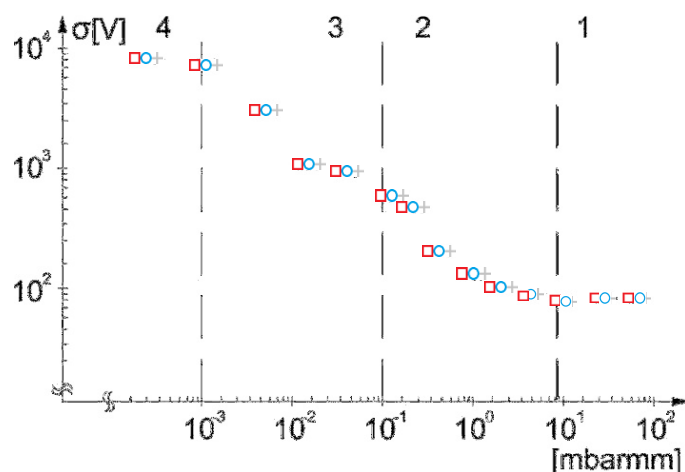
Slika 5.5a. Zavisnost srednje vrednosti dc probojnog napona sa materijalom elektroda kao parametrom (\square - volfram, \circ - aluminijum, $+$ - elektron); međuelektrodno rastojanje 0.1mm; peskarene bakarne elektrode; gas N_2



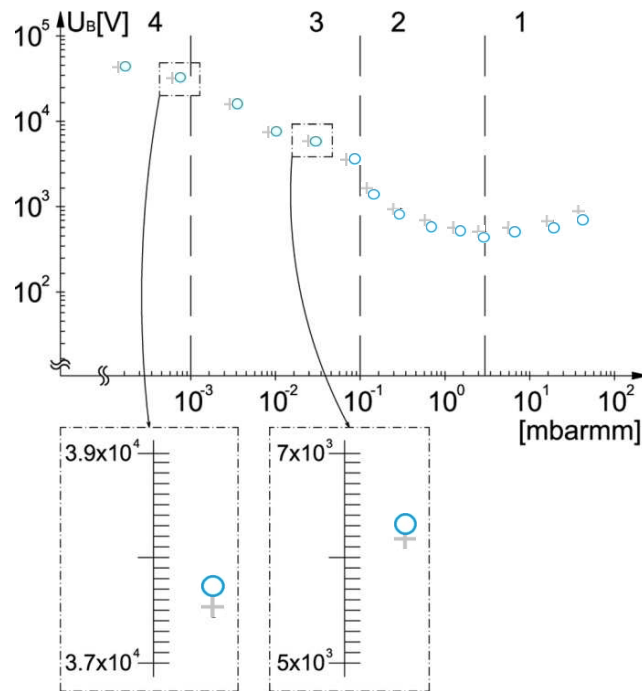
Slika 5.5b. Zavisnost odgovarajućeg standardnog odstupanja dc probojnog napona sa materijalom elektroda kao parametrom (\square - volfram, \circ - aluminijum, $+$ - elektron); međuelektrodno rastojanje 0.1mm; peskarene bakarne elektrode; gas N_2



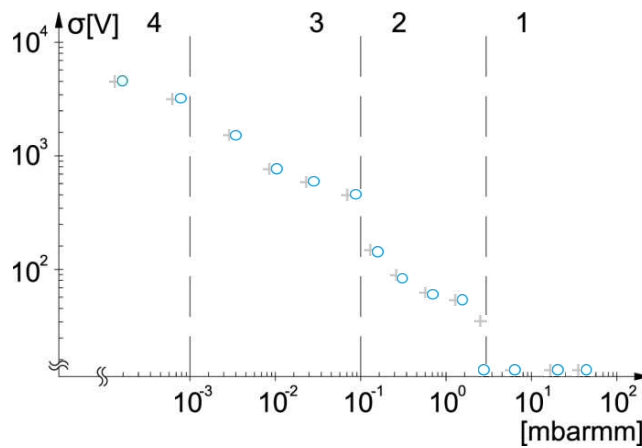
Slika 5.6a. Zavisnost srednje vrednosti impulsnog probojnog napona sa materijalom elektroda kao parametrom (\square - volfram, \circ - aluminijum, $+$ - elektron); međuelektrodno rastojanje 0.1mm; peskarene bakarne elektrode; gas N_2



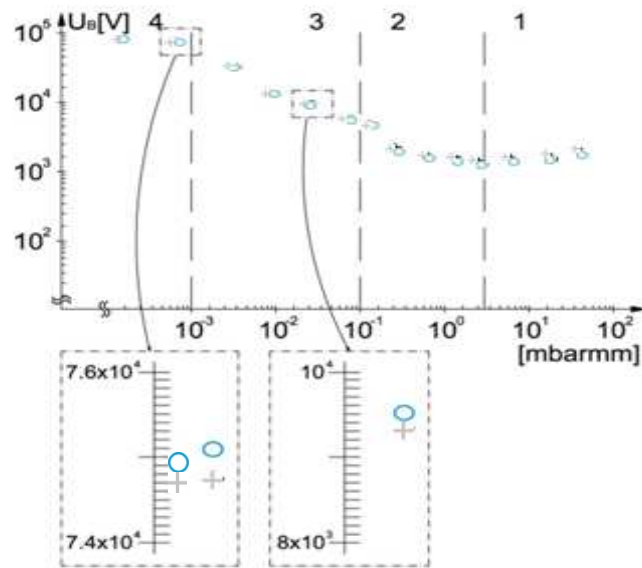
Slika 5.6b. Zavisnost odgovarajućeg standardnog odstupanja impulsnog probojnog napona sa materijalom elektroda kao parametrom (\square - volfram, \circ - aluminijum, $+$ - elektron); međuelektrodno rastojanje 0.1mm; peskarene bakarne elektrode; gas N_2



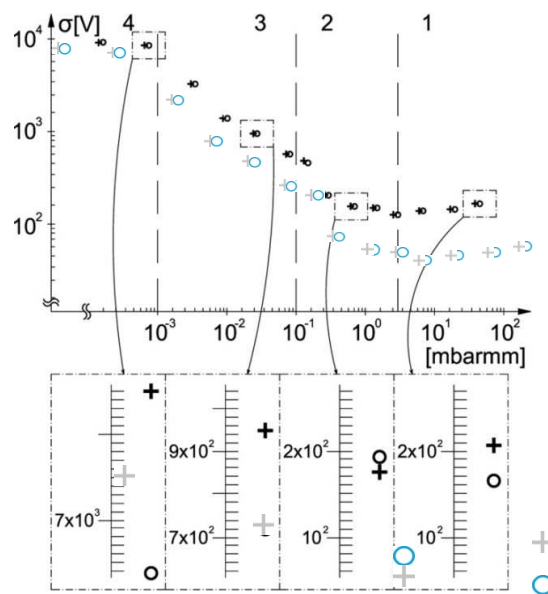
Slika 5.7a. Zavisnost srednje vrednosti dc probojnog napona sa topografijom elektrodnih površina kao parametrom (○ – peskarene elektrode, + – polirane elektrode); međuelektrodno rastojanje 0.1mm; bakarne elektrode; gas SF₆



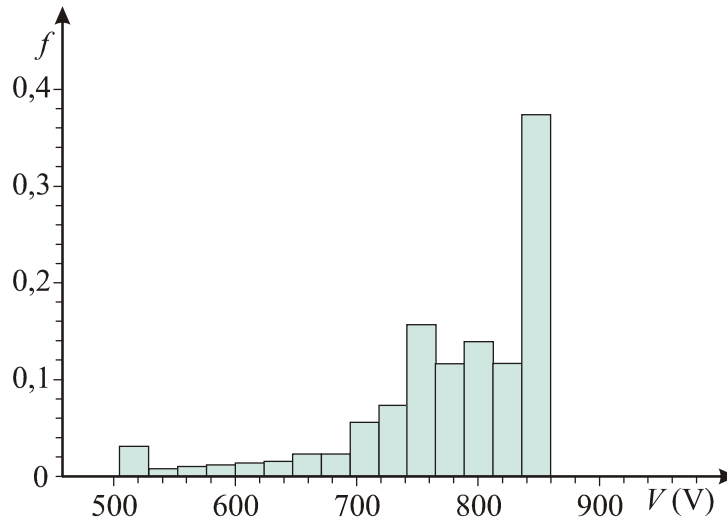
Slika 5.7b. Zavisnost odgovarajućeg standardnog odstupanja dc probojnog napona sa topografijom elektrodnih površina kao parametrom (○ – peskarene elektrode, + – polirane elektrode); međuelektrodno rastojanje 0.1mm; bakarne elektrode; gas SF₆



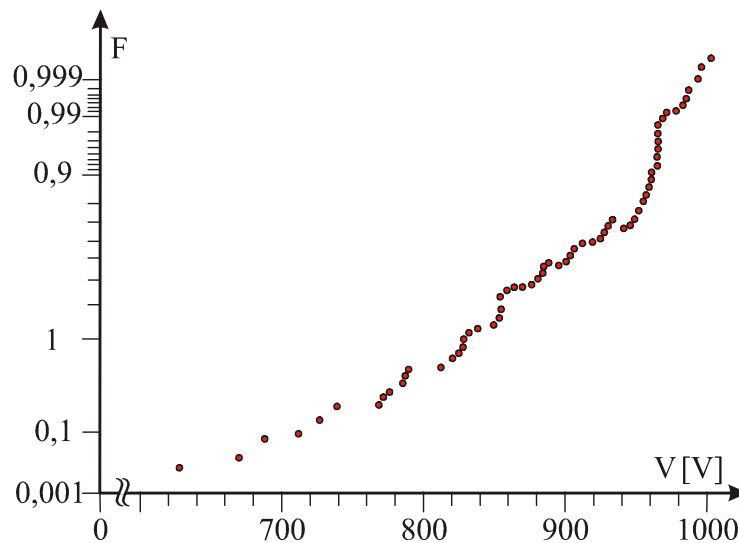
Slika 5.8a. Zavisnost srednje vrednosti impulsnog probojnog napona sa topografijom elektrodnih površina kao parametrom (\circ – peskarene elektrode, $+$ – polirane elektrode); međuelektrodno rastojanje 0.1mm; bakarne elektrode; gas SF_6



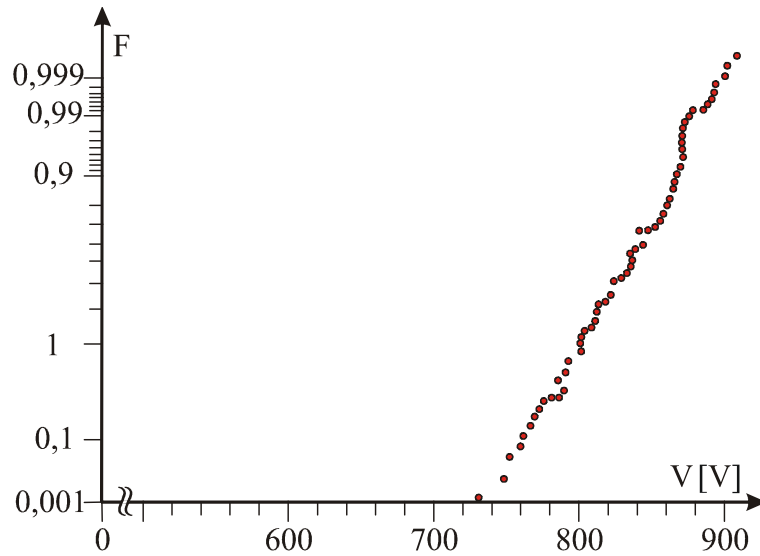
Slika 5.8b. Zavisnosti odgovarajućeg standardnog odstupanja impulsnog probojnog napona sa topografijom elektrodnih površina kao parametrom (\circ – peskarene elektrode, $+$ – polirane elektrode); međuelektrodno rastojanje 0.1mm; bakarne elektrode; gas SF_6



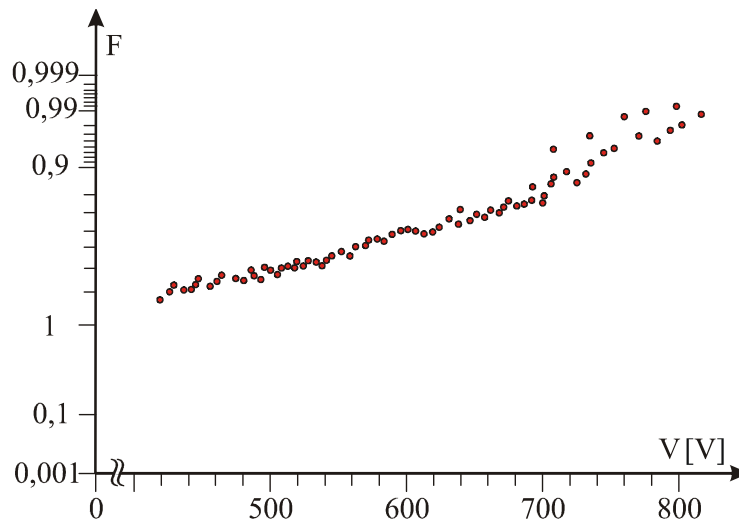
Slika 5.9a. Histogram slučajne promenjive dc probajni napon; pritisak 1mbar; međuelektrodno rastojanje 0.35mm; peskarene bakarne elektrode; gas SF₆



Slika 5.9b. Raspodela slučajne promenjive dc probajni napon; pritisak 1mbar; međuelektrodno rastojanje 0.35mm; peskarene bakarne elektrode; gas SF₆



Slika 5.10. Raspodela slučajne promenjive dc probojni napon prilikom lociranja Bragovog maksimuma u međuelektrodni prostor; pritisak 1mbar; međuelektrodno rastojanje 0.35mm; peskarene bakarne elektrode; gas SF_6



Slika 5.11. Raspodela slučajne promenjive dc probojni napon prilikom lociranja Bragovog maksimuma u međuelektrodni prostor na liniju polja koja ispunjava uslov ivičnog proboja anomalnog Pašenovog tipa; pritisak 1mbar; međuelektrodno rastojanje 0.35mm; peskarene bakarne elektrode; gas SF_6

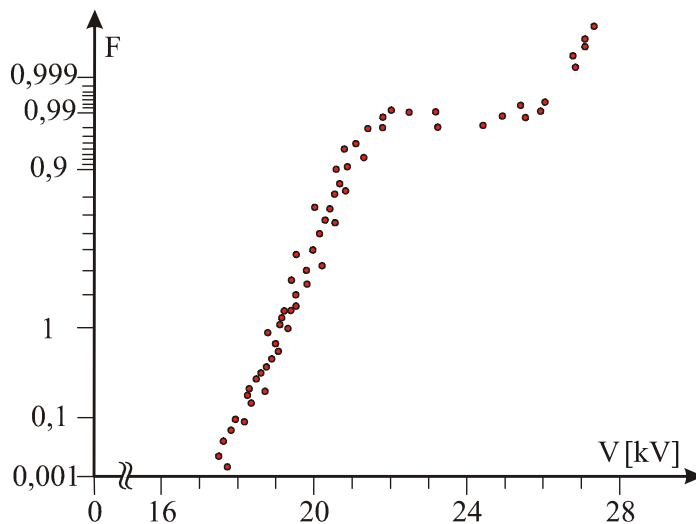
Sa prethodnih slika se vidi da se eksperimentalno razmatrana oblast proizvoda pd , tačnije proizvoda pritiska i međuelektrodnog rastojanja, može sa aspekta mehanizma proboja podeliti na četiri podoblasti. U podoblasti 1, lociranoj desno od Pašenovog minimuma pd je, uslovno rečeno, dobra promenljiva, što znači da u ovoj podoblasti važi zakon sličnosti i da se proboj odvija Tausendovim mehanizmom. U podoblasti 1 se uočava da su vrednosti dc probojnog napona determinističke veličine (sa mernom sigurnosti tipa A nula) za razliku od vrednosti impulsnog probojnog napona koje su stohastičke veličine (sa mernom nesigurnosti tip A većom od nule). Ova razlika je posledica razlike u mehanizmu gasnog proboja dc naponom i impulsnim naponom. Na osnovu ovih rezultata može se, nesumnjivo, tvrditi da se u podoblasti 1 proboj odvija gasnim mehanizmom Tausendovog tipa. Da se radi o gasnom probaju Tausendovog tipa u podoblasti 1 dokazuje zavisnost vrednosti dc i impulsnog proboja napona od materijala elektroda, uočljiva u podoblasti 1, Slika 5.5a i 5.6a, koja se ne bi javila da se proboj odvija strimerskim mehanizmom.

U podoblasti 2 se situacija menja u tom smislu da unutar nje i dc i impulsni probojni napon imaju stohastičku prirodu. Do ovoga dolazi usled efekta poznatog pod imenom anomalni Pašenov efekat. Anomalni Pašenov efekat je efekat pri kome, ako se za to steknu uslovi, varnica bira duži put nekom od ivičnih linija pola, takav da njegova dužina pomnožena sa pritiskom u komori odgovara pd vrednosti u minimumu. Verovatnoća nastupanja ovog efekta određena je brojem slobodnih elektrona, potencijalno inicijalnih, u kritičnoj zapremini oko ivične linije polja koja zadovoljava prethodno navedeni uslov. Kako je ta kritična zapremina, tj prostor na kojem slobodni elektron može da preuzme od električnog polja, na jednoj srednjoj slobodnoj dužini puta, energiju veću od energije veze elektrona u gasu, relativno mala i znatno manja od zapremine međuelektrodnog prostora, dešava se da jedan deo proboja bude iniciran u međuelektrodnom prostoru pri višim vrednostima napona. Na taj način slučajna promenljiva probojni napon ne pripada jedinstvenoj statističkoj raspodeli već složenoj raspodeli aditivnog tipa. Ova složena raspodela aditivnog tipa se sastoji, po pravilu, od dve Vejbulove raspodele, Slike 5.9a i 5.9b. Ovo objašnjenje potvrđuju odgovarajuće raspodele koje se dobiju kada se Bragov maksimum locira u međuelektrodni prostor, Slika 5.10, odnosno na liniju polja za koju je prethodnim proračunom ustanovljeno da ispunjava uslov ivičnog proboja anomalnog

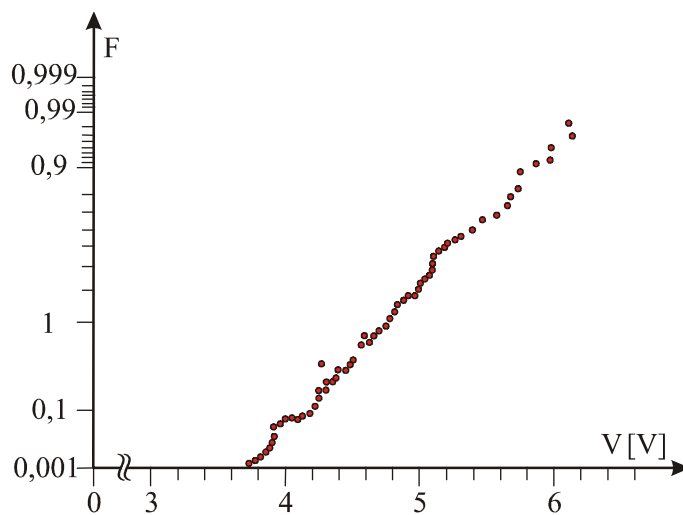
Pašenovog tipa, Slika 5.11. Postojanje statističkog rasipanja jednosmernog probojnog napona u podoblasti 2 posledica je nepripadanja slučajnih promenljivih dc probojni napon jedinstvenom statističkom uzorku. Promena pritiska i međuelektrodnog rastojanja uz održanje konstantnosti njihovog proizvoda nije menjala statistiku i vrednost odgovarajućih parametara statističkih uzoraka jednosmernih i impulsnih probojnih napona.

U podoblasti 3 se dobija slična statistika. Naime u ovoj podoblasti slučajna promenjiva jednosmerni i impulsni probojni dalje pripadaju mešovitoj raspodeli aditivnog tipa koja se sastoji od dve Vejbulove raspodele, Slika 5.12. Da se ne radi o istim efektima kao u podoblasti 2 može se zaključiti na osnovu efekta zračenja. Naime lociranjem Bragovog maksimuma u okolini linije polja koja ispunjava, na osnovu prethodnog proračuna, uslov ivičnog proboja anomalnog Pašenovog tipa, znatno povećava broj jednosmernih i impulsnih proboja vrednosti bliskoj odgovarajućoj vrednosti u minimumu. Međutim lociranje Bragovog maksimuma u međuelektrodni prostor neznatno povećava broj proboja u toj oblasti. Takođe pri promeni međuelektrodnog rastojanja i pritiska gasa, uz zadržavanje njihovog proizvoda konstantnim, dolazi do promene statističkog uzorka slučajne promenjive jednosmerni i impulsni probojni napon. Ona se i dalje ponaša prema složenoj raspodeli aditivnog tipa sastavljenoj od dve Vejbulove raspodele. Deo slučajnih promenljivih jednosmerni i impulsni probojni napon, koji pripadaju ivičnim probojima, zadržava približno iste parametre podraspodele bliske odgovarajućim parametrima u Pašenovom minimumu, što nije slučaj sa delom podraspodele slučajnih promenljivih dc i impulsnih probojni napon koji pripadaju probojima u međuelektrodnoj oblasti. Pri povećanju međuelektrodnog rastojanja, uz srazmerno sniženje pritiska, vrednost dc i impulsnih probojnih napona raste približno linearno sa međuelektrodnim rastojanjem. Pri smanjenju međuelektrodnog rastojanja, uz proporcionalno povećanje pritiska, vrednost dc i impulsnih probojnih napona opada približno linearno sa međuelektrodnim rastojanjem. To znači da u podoblasti 3 za proboje koji se odvijaju u centralnim oblastima međuelektrodnog prostora ne važi Pašenov zakon, odnosno zakon sličnosti. Kako isti zakon pod istim uslovima važi za ivične proboje i kako na broj ivičnih proboja utiče α -zračenje, a na proboje iz međuelektrodnog prostora ne utiče, može se zaključiti da se u podoblasti 3 istovremeno

javljaju mehanizam gasnog proboja duž ivičnih linija polja i mehanizam vakuumskog proboja u međuelektrodnom prostoru.



Slika 5.12. Raspodela slučajne promenjive dc probajni napon na Weibulovom papiru verovatnoće u podoblasti 3; pritisak $3 \cdot 10^{-1}$ mbar; međuelektrodno rastojanje 0.1mm; peskarene bakarne elektrode; gas SF₆



Slika 5.13. Raspodela slučajne promenjive dc probajni napon na Weibulovom papiru verovatnoće u podoblasti 4; pritisak $2 \cdot 10^{-3}$ mbar; međuelektrodno rastojanje 0.1mm; peskarene bakarne elektrode; gas SF₆

Vakuumski mehanizam proboja koji se delom javlja u podoblasti 3 je lavinskog tipa. Ovo dokazuju sledeći eksperimentalno uočeni efekti:

1. Impulsni i jednosmerni proboj je znatno češći ukoliko se primenjuju peskarene elektrode nego u slučaju kada se primenjuju elektrode polirane do visokog sjaja, što se objašnjava većom adsorpcijom zaostalih gasova i nečistoća u slučaju peskarenih elektroda.
2. Na jednosmerni i impulsni proboj utiču materijal elektroda i tip rezidualnog gasa prema istoj logici kao i u slučaju gasnih mehanizama proboja, što potvrđuje pretpostavku da se proboj inicira lavinskim mehanizmom.
3. Na jednosmerni i impulsni probojni napon utiče, u manjoj meri, i α -zračenje što se može protumačiti pojačanim jonizacionim efektima absorbovanim slojevima gasa na elektrodama.
4. Promenom polariteta jednosmernog i impulsnog probojnog napona je ustanovljeno da se prilikom proboja u podoblasti 3 katoda potpuno dekondicionira, pa ju je potrebno za dalja merenja ponovo kondicionirati primenom 100 proboja difuznim lukom, što je u uslovima eksperimenta takođe karakteristika lavinskog mehanizma proboja.

U podoblasti 4 jonizujuće zračenje u oblasti ivičnih linija gubi svaki efekat, a zadržava prethodno uočeni, manji efekat u međuelektrodnoj oblasti. Takođe se zadržavaju efekti uočeni u podoblasti 3 koji su se odnosili na vakuumske proboje lavinskim mehanizmom u međuelektrodnom prostoru. Pri svemu tome statistička raspodela uzoraka slučajne promenjive dc i impulsni probojni napon, u podoblasti 4 nije više složena raspodela aditivnog tipa već sve slučajne promenjive pripadaju jedinstvenoj raspodeli, slika 5.16. Na osnovu ovih podataka se može tvrditi da se u podoblasti 4 proboj odvija isključivo vakuumskim emisionim mehanizmom.

5.2. REZULTATI I DISKUSIJA ZA EKSPERIMENT II

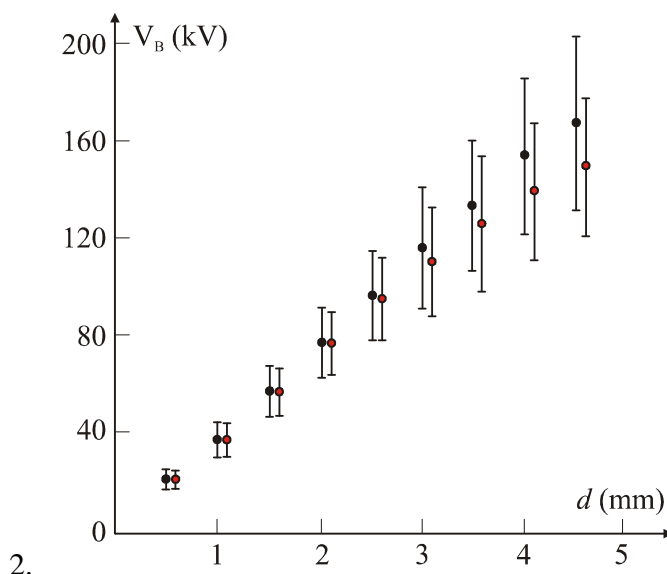
Rezultati eksperimenta II su podeljeni na dva dela. U prvom delu, Eksperiment IIa, su razmatrani rezultati dobijeni određivanjem statističkog uzorka po sto slučajnih promenljivih naizmenični i impulsni probojni napon nakon vršenja samo jedne od posmatranih sklopnih operacija (tačnije u toku prvog dela Eksperimenta II posmatrani su probojni naponi vakuumskih sklopnih elemenata sa kondicioniranim kontaktima i kontaktima nakon sklopnih operacija). Takav način posmatranja uticaja sklopnih operacija na vrednost naizmeničnog i impulsnog probojnog napona je praktikovan i u nekim prethodnim radovima [50], [53], [68] ali oni u sebi sadrže nedostatak (koji je jasan upravo na osnovu rezultata prikazanih u ovom radu) da se na taj način dolazi do statističkih uzoraka koji nisu reprezentativni pošto svaki prethodni proboj utiče na sledeće proboje. Iz tog razloga je u ovom radu, Eksperiment IIb, izvršen drugačiji pristup problemu i merenja su vršena pojedinačno nakon svake od posmatranih operacija. Na taj način, koji je bez sumnje opsežniji, dobijaju se realniji statistički uzorci unutar kojih prethodne slučajne veličine ne utiču na potonje slučajne veličine. Motiv za vršenje, istovremeno, Eksperimenta IIa i Eksperimenta IIb, iako je deo Eksperimenta IIa već obrađivan od drugih autora, je da se jasnije, na istim uzorcima, vidi suštinska razlika između rezultata Eksperimenta IIa i Eksperimenta IIb.

5.2.1. KONDICIONIRANI KONTAKTI

Eksperimentalni rezultati za slučaj kondicioniranih kontakata za sve tipove sklopnih elemenata pokazali su sledeće:

1. Za međukontaktno rastojanje d manje od 2 mm ne postoji razlika između srednje vrednosti naizmeničnog i impulsnog probojnog napona. Za međukontaktno rastojanje veće od 2 mm srednje vrednosti impulsnog probojnog napona su nešto veće od odgovarajućih vrednosti impulsnog probojnog napona, Slika 5.14. Ovaj fenomen se može objasniti poređenjem

vremena potrebnog da elektrodni materijal ispari i ispuni međukontaktno rastojanje i vremena porasta impulsa.

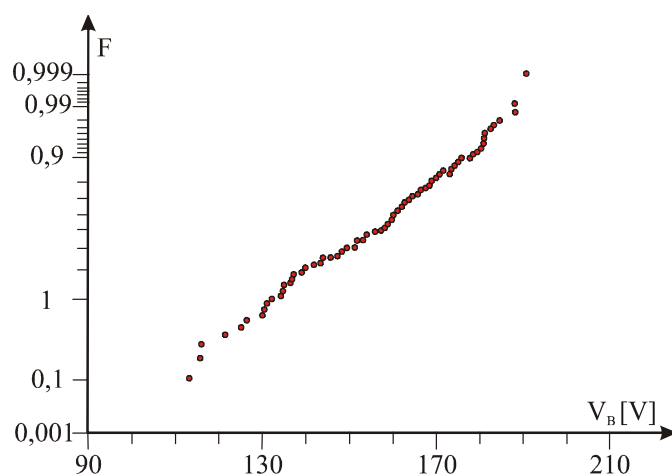


2. **Slika 5.14.** Zavisnost probojnog napona (●-impulsni napon i ●-naizmjenični napon) od međuelektrodnog rastojanja, sklopni element tip A, kondicionirani kontakti

3. Takođe je ustanovljeno da srednja vrednost impulsnog i naizmjeničnog probojnog napona raste relativno linearno sa povećanjem međukontaktnog rastojanja. Takav rezultat je prethodno publikovan i diskutovan [68].
4. Slučajne promenljive naizmjenični i impulsni probojni napon pripadaju Vejbulovoj raspodeli što je prikazano na Slici 5.15 i Tabelom 5.1. Veće vrednosti parametara nagiba Vejbulove raspodele za sklopne elemente tip C i tip D ukazuju na veću promenu topografije kontaktnih površina tokom proboja nego i u slučaju sklopnih elemenata tip A i tip B.
5. Ako se probojno polje uzme kao slučajna promenljiva, umesto probojnog napona, tada su statistički uzorci takvih slučajnih promenljivih, nezavisno od međuelektrodnog rastojanja d , mogu biti opisani jedinstvenom Vejbulovom raspodelom. Prema teoriji slabih mesta to znači da postoji samo jedan tip slabih

mesta koji je aktivan tokom iniciranja proboja i koji se može opisati makroskopskim električnim poljem.

6. Rezultati U-testa su pokazali da slučajne veličine naizmienični i impulsni probojni napon pripadaju jedinstvenoj statističkoj raspodeli sa manje od 5% statističke nepouzdanosti.
7. Značajniji uticaj tipa vakuumske sklopne komore na odgovarajuće vrednosti naizmieničnog i impulsnog probojnog napona nije uočen, Slika 5.16.



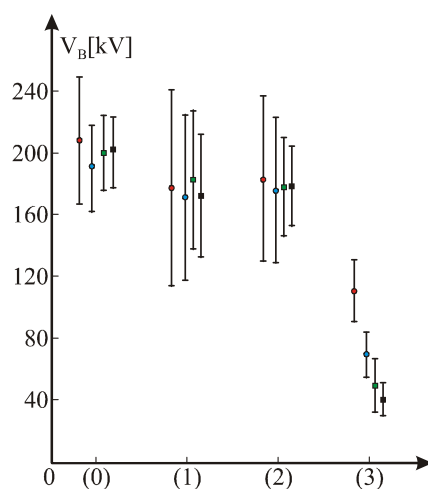
Slika 5.15. Izmerene vrednosti za impulsni probojni napon na Vejbulovom papiru verovatnoće za sklopni element tip A, $d = 4$ mm, kondicionirani kontakti

Tabela 5.1. Parametri nagiba δ Vejbulove raspodele eksperimentalno dobijenih statističkih uzoraka slučajnih promenljivih naizmienični probojni napon i impulsni probojni napon za sklopne elemente sa kondicioniranim kontaktima uz tip sklopnog elementa kao parametra

	Prekidački elementi							
	A		B		C		D	
	napon		napon		napon		napon	
d [mm]	naizmienični	impulsni	naizmienični	impulsni	naizmienični	impulsni	naizmienični	impulsni
0.5	6.92	7.07	6.78	6.53	8.05	7.91	8.14	8.21
1	6.74	7.12	6.62	6.61	8.03	7.95	8.30	8.20
2	6.69	6.87	6.51	6.44	7.95	7.83	8.05	8.10
3	7.02	6.96	6.72	6.71	7.80	8.21	7.96	8.03
4	6.98	7.15	6.68	6.98	8.20	8.02	8.21	7.97

Posle operacije uklop bez struje-rasklop bez struje eksperimentalni rezultati se ponašaju slično, u kvalitativnom smislu, kao i rezultati dobijeni sa kondicioniranim kontaktima, Slika 5.16. Uočljivo niže vrednosti probojnih napona mogu se objasniti dekondicioniranjem kontakata tokom sklopne operacije uklop bez struje-rasklop bez struje, do kojeg dolazi usled zavarivanja kontakata prilikom uklopa (pošto je vakuum izuzetno čist medijum) i kidanja tako nastalih varova prilikom rasklopa. Na taj način nastaju mikrošiljci na površini kontakata koji, u velikoj meri, povećavaju lokalno električno polje (koje kvantnomehantičkim efektom hladne emisije povećava struju pražnjenja što dovodi do porasta verovatnoće proboja). Značajniji uticaj tipa prekidačkog elementa na statističke uzorke slučajnih promenljivih naizmjenični i impulsni probojni napon nije uočen.

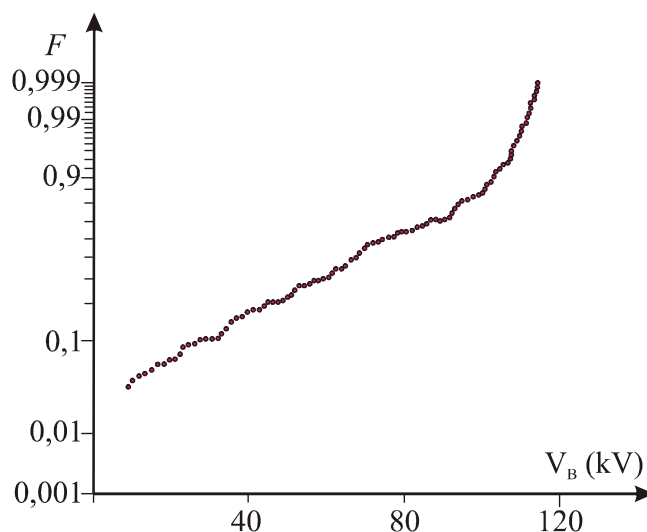
Posle sklopne operacije uklop bez struje-rasklop sa nominalnom strujom dobijeni eksperimentalni rezultati su gotovo identični odgovarajućim rezultatima dobijenim kondicioniranim kontaktima. To se može objasniti pojavom difuznog električnog luka prilikom sklopne operacije rasklop sa nominalnom strujom koji kondicionira kontaktne površine.



Slika 5.16. Vrednosti impulsnog probojnog napona nakon sklopne operacije: 0-kondicionirani kontakti; 1-nakon sklopne operacije uklop bez struje-rasklop bez struje, 2-nakon sklopne operacije uklop bez struje-rasklop sa nominalnom strujom, 3- nakon sklopne operacije uklop bez struje-rasklop sa nominalnom strujom kratkog spoja; ●-tip A, ●-tip B, ■-tip C, ■-tip D, međuelektrodno rastojanje 4,5 mm

Dobijeni rezultati nakon sklopne operacije uklop bez struje-rasklop sa nominalnom strujom kratkog spoja su pokazali:

1. Nema razlike između rezultata dobijenih naizmjeničnim i impulsnim naponom
2. Srednja vrednost slučajnih promenljivih naizmjenični i impulsni probojni napon raste sa povećanjem međuelektrodnog rastojanja d kao $d^{0,6}$
3. Slučajne promenljive naizmjenični i impulsni probojni napon pripadaju složenoj statističkoj raspodeli aditivnog tipa koja se sastoji od dve raspodele Vejbulovog tipa, Slika 5.17. Srednje vrednosti slučajnih promenljivih naizmjenični i impulsni probojni napon su znatno manje od odgovarajućih vrednosti dobijenih kontaminiranim kontaktima nakon sklopnih operacija rasklop bez struje-uklop bez struje i rasklop bez struje-uklop sa nominalnom strujom.
4. Uočena je značajna razlika između srednjih vrednosti slučajnih promenljivih naizmjenični probojni napon i impulsni probojni napon zavisno da li su rezultati dobijeni sa komorama koje imaju CuCr kontakte ili sa komorama koje imaju CuBi kontakte. Dodatno je srednja vrednost slučajnih promenljivih naizmjenični i impulsni probojni napon veća u slučaju rezultata dobijenih sa vakuumskom komorom tip A nego u slučaju rezultata dobijenih sa vakuumskom komorom tip B, U istom smislu su srednje vrednosti slučajnih promenljivih naizmjenični i impulsni probojni napon dobijene sa vakuumskom komorom tip C veće od odgovarajućih vrednosti dobijenih sa vakumskom komorom tip D, Slika 5.16.



Slika 5.17. Slučajna promenljiva impulsni probojni napon prikazana na Vejbulovom papiru verovatnoće; sklopni element tip A; međukontaktno rastojanje 4 mm; kontakti nakon sklopne operacije uklop bez struje-rasklop sa nominalnom strujom kratkog spoja

5. 3. REZULTATI I DISKUSIJA ZA EKSPERIMENT IIB

Glavni rezultati koji su ujedno i osnovni cilj ovog rada postignuti su u okviru ovog eksperimenta. Oni omogućavaju predviđanje ponašanja vakuumskog prekidača nakon izvršena sklopne operacija što omogućava da se, u pomenutim merenjima predvidi njihova pouzdanost.

5.3.1. KONDICIONIRANI KONTAKTI

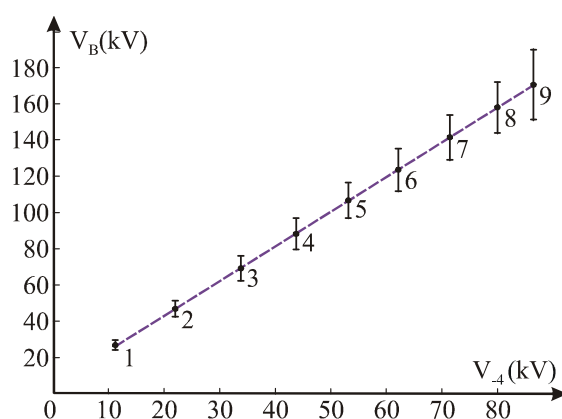
Eksperimentalno dobijeni statistički uzorci slučajnih promenljivih naizmjenični i impulsni probojni napon pripadaju širokoj normalnoj raspodeli, a pretprobojni parametri V_{-4} , V_{-5} , V_{-6} , uskoj normalnoj raspodeli.

Slika 5.18 prikazuje zavisnost nizmeničnog probojnog napona za tip A sklopni element od pretprobojnog parametra V_{-4} . Dobijene vrednosti koeficijenta korelacije između

slučajnih promenljivih naizmjenični i impulsni probojni napon i srednje vrednosti pretprobojnih parametara V_{-4} , V_{-5} , V_{-6} u zavisnosti od tipa prekidačke komore date su u Tabeli 5.2.

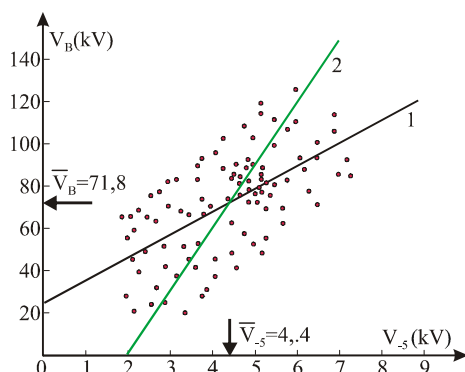
Tabela 5.2. Koeficijent korelacije između prekida napona (naizmjeničnog i impulsnog) i pretprobojnih parametara V_{-4} , V_{-5} , V_{-6} u zavisnosti od tipa prekidačke komore; međuelektrodno rastojanje 3 mm

Tip	Napon	Kondicionirani kontakti			Prekidačka operacija 1			Prekidačka operacija 2			Prekidačka operacija 3		
		V_{-4}	V_{-5}	V_{-6}	V_{-4}	V_{-5}	V_{-6}	V_{-4}	V_{-5}	V_{-6}	V_{-4}	V_{-5}	V_{-6}
A	naizmjenični	0.97	0.21	0.012	0.99	0.25	0.012	0.98	0.22	0.014	/	0.21	0.009
	impulsni	0.95	0.18	0.008	0.97	0.28	0.009	0.99	0.23	0.012	/	0.19	0.008
B	naizmjenični	0.94	0.22	0.014	0.95	0.29	0.010	0.95	0.21	0.011	/	0.18	0.010
	impulsni	0.98	0.23	0.018	0.93	0.26	0.011	0.96	0.25	0.017	/	0.18	0.005
C	naizmjenični	0.95	0.19	0.015	0.93	0.27	0.012	0.97	0.24	0.016	/	0.16	0.007
	impulsni	0.93	0.20	0.016	0.89	0.28	0.014	0.96	0.19	0.014	/	0.20	0.012
D	naizmjenični	0.98	0.28	0.012	0.95	0.31	0.010	0.92	0.25	0.015	/	0.16	0.007
	impulsni	0.97	0.24	0.015	0.92	0.29	0.012	0.93	0.23	0.010	/	1.17	0.005



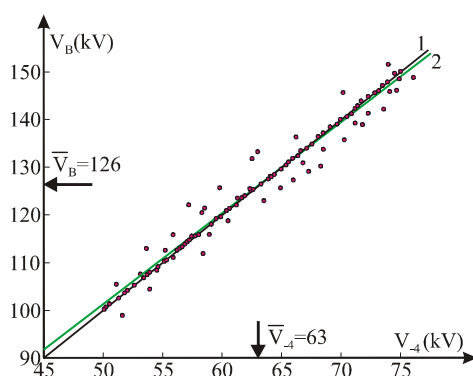
Slika 5.18. Zavisnost vrednosti naizmjeničnog probojnog napona od probojnog parametra V_{-4} ; sklopni element tip A; međuelektrodna rastojanja 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5 (tačke 1-9 respektivno); kondicionirani kontakti

Slika 5.19. pokazuje regresione prave između naizmjeničnog probojnog napona i odgovarajuće vrednosti pretprobojnog parametra V_{-5} za prekidačku komoru tip B.



Slika 5.19. Regresione prave: naizmenični probojni napon od pretprobojnog parametra $V_{.5}$ (prava 1); pretprobojni parametar $V_{.5}$ od naizmeničnog probojnog napona (prava 2) sklopni element tip B, kondicionirani kontakti, međuelektrodno rastojanje 2,5 mm; korelacioni koeficijent 0,6, regresioni koeficijent $b_{yx}=10,7$, slobodno odstupanje slučajne promenljive naizmenični probojni napon 23,8 kV, ugao između regresionih pravih $27,8^\circ$

Slika 5.20 prikazuje regresione prave impulsnog probojnog napona u zavisnosti od pretprobojnog parametra $V_{.4}$ u zavisnosti od impulsnog probojnog napona.

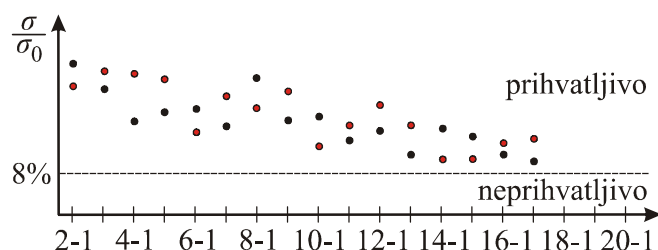


Slika 5.20. Regresione prave: impulsnog probojni napon od pretprobojnog parametra $V_{.4}$ (prava 1); pretprobojni parametar $V_{.4}$ od impulsnog probojnog napona (prava 2) sklopni element tip B, kontakti nakon sklopne operacije uklop bez struje-rasklop bez struje, međuelektrodno rastojanje 3 mm; korelacioni koeficijent 0,98, regresioni koeficijent $b_{yx}=1,92$, standardno odstupanje slučajne promenljive impulsnog probojni napon 14,2 kV, ugao između regresionih pravih $0,95^\circ$.

Nakon sklopne operacije uklop bez struje-isklop bez struje ustanovljeno je:

1. Srednja vrednost naizmeničnog probojnog napona je za oko 20% viša od odgovarajuće vrednosti impulsnog probojnog napona. Taj rezultat se može objasniti delimičnim kondicioniranjem kontakata.
2. Za sve sklopne elemente vrednosti naizmeničnog i impulsnog probojnog napona su uočljivo manje nego u slučaju kondicioniranih kontakata. Taj rezultat se može objasniti dekonicioniranjem kontakata sklopnom operacijom. Naime, tokom sklopne operacije uklop bez struje-rasklop bez struje dolazi do zavarivanja kontakata (što je već objašnjeno) i kidanja varova. Time se povećava broj mikrošiljaka koji vode već objašnjenom efektu.
3. Vrednost naizmeničnog i impulsnog probojnog napona raste, linearno, sa povećavanjem međukontaktne rastojanja do vrednosti $d = 3,5$ mm, nakon čega se rast usporava i javlja trend ka saturaciji. Takav trend je ustanovljen za sve tipove prekidačkih komora uz manju razliku između komora sa CuCr i CuBi kontaktima. U slučaju vakuumskih komora sa CuBi kontaktima linearni porast srednje vrednosti probojnog napona i impulsnog probojnog napona prestaje nešto ranije.
4. Ispitivanjem pretprobojnih parametara V_{-4} , V_{-5} , V_{-6} utvrđena je njihova vrednost za 10% veća ako su merene nakon naizmeničnog proboja. Taj rezultat se može objasniti parcijalnim dekonicioniranjem kontakata tokom porasta ac napona.
5. Vrednosti pretprobojnih parametara su niže nego u slučaju kondicioniranih kontakata. Taj rezultat se može objasniti većim vrednostima pretprobojne struje usled većeg broja mikrošiljaka generisanih sklopnom operacijom za iste vrednosti jednosmernog napona.
6. Zavisnosti pretprobojnih parametara od međuelektrodne rastojanja daju slične vrednosti kao i u slučaju kondicioniranih kontakata. Na osnovu testiranja statističkih raspodela nađeno je da statistički uzorci slučajne promenljive naizmenični impulsni probojni napon pripadaju širokoj normalnoj raspodeli, a

pretprobajni parametri V_{-4} , V_{-5} , V_{-6} pripadaju uskoj normalnoj raspodeli. Na osnovu toga se može zaključiti da i u slučaju kontakata nakon sklopne operacije uklop bez struje-rasklop bez struje mogu da se uspostave odnosi korelacije i regresije (pošto su oni primenljivi, kao što je rečeno, samo u slučaju da su sve posmatrane slučajne veličine normalno raspoređene).



Slika 5.21. Rezultati U-testa za statističke uzorke slučajne promenljive naizmenični (•) i impulsni (•) probojni napon; sklopni element tip A; međukontaktno rastojanje je 1 mm; kontakti nakon sklopne operacije uklop bez struje-rasklop sa nominalnom strujom

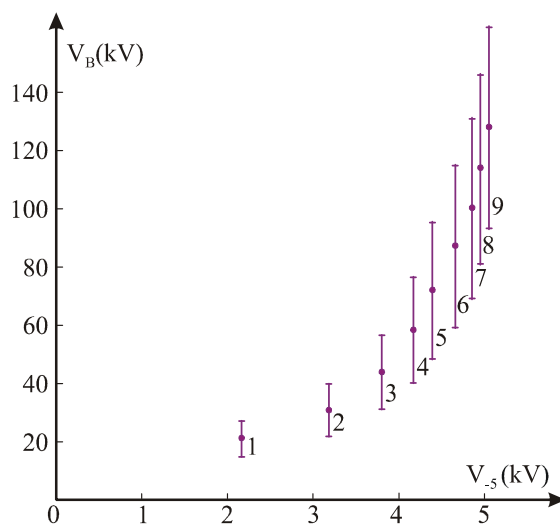
Dobijeni eksperimentalni rezultati nakon sklopne operacije uklop bez struje-rasklop sa nominalnom strujom su pokazali:

1. Slika 5.21 prikazuje rezultate U-testa za statističke uzorke naizmenični i impulsni probojni napon nakon sklopne operacije uklop bez struje-rasklop sa nominalnom strujom. Sa slike se vidi da reprezentativni uzorci pripadaju jedinstvenoj statističkoj raspodeli sa statističkom nesigurnosti manjom od 8%.
2. Nije ustanovljena bitna razlika između vrednosti naizmeničnog i impulsnog probojnog napona.
3. Vrednosti naizmeničnih i impulsnih probojnih napona su slične u slučaju vakuumskih komora sa CuCr kontaktima i nešto niži u slučaju vakuumskih komora sa CuBi kontaktima.
4. Zavisnost naizmeničnog i impulsnog probojnog napona od međuelektrodnog rastojanja je slična kao u slučaju kondicioniranih kontakata.

5. Tokom merenja pretprobojnih parametara V_{-4} , V_{-5} , V_{-6} nije ustanovljena razlika između njih u zavisnosti da li su merene nakon naizmjeničnog ili nakon impulsnog proboja.
6. Vrednosti pretprobojnih parametara su bile slične odgovarajućim vrednostima dobijenim sa kondicioniranim kontaktima.
7. Zavisnost pretprobojnih parametara od međukontaktne rastojanja bila je slična odgovarajućoj zavisnosti dobijenoj sa kondicioniranim kontaktima.

Na osnovu testiranja teoretskih raspodela ustanovljeno je da statistički uzorci slučajnih veličina naizmjenični probojni napon i impulsní probojni naponi nakon sklopne operacije rasklop bez struje-uklop sa nominalnom strujom kratkog spoja pripadaju širokoj normalnoj raspodeli, a statistički uzorci slučajnih veličina pretprobojnih parametara V_{-4} , V_{-5} , V_{-6} pripadaju uskoj normalnoj raspodeli.

Kao i u prethodnom slučaju na osnovu te činjenice bilo je moguće primeniti proračun korelacija i regresija na sve eksperimentalno dobijene statističke uzorke slučajnih promenljivih pošto sve podležu normalnoj raspodeli.



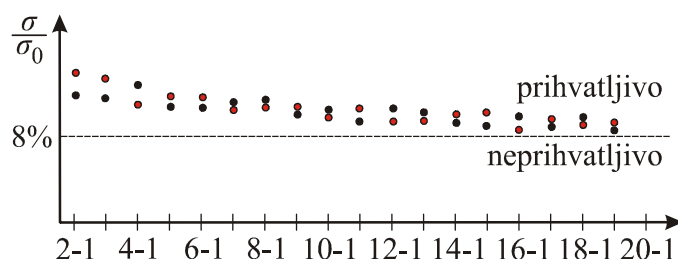
Slika 5.22. Zavisnost vrednosti naizmjeničnog probojnog napona od probojnog parametra V_5 ; tip B sklopni element; međukontaktne rastojanja 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5 mm (tačke 1-9 respektivno); kontakti nakon sklopne operacije uklop bez struje-rasklop sa nominalnom strujom

Slika 5.22 pokazuje zavisnost vrednosti naizmjeničnog probojnog naona od probojnog parametra V_{-5} za vakuumsku komoru tip B. Dobijene vrednosti koeficijenata korelacije između slučajnih promenljivih naizmjenični ili impulsni probojni napon i pretprobojnih parametara V_{-4} , V_{-5} , V_{-6} nakon sklopne operacije uklop bez struje-rasklop sa nominalnom srujom sa tipom vakuumske komore kao parametrom date su u Tabeli 5.2.

Eksperimentalno dobijeni rezultati nakon sklopne operacije uklop bez struje-rasklop sa nominalnom strujom kratkog spoja pokazali su sledeće:

1. Slika 5.23 prikazuje rezultate U-testa za slučajne promenljive naizmjenični i impulsni probojni napon nakon sklopne operacije uklop bez struje-rasklop sa nominalnom srujom kratkog spoja. Sa slike se vidi da reprezentativni statistički uzorci predstavljaju jedinstvenu statističku raspodelu sa statističkom nesigurnosti manjom od 8%.
2. Za sve tipove ispitivanih sklopnih elemenata srednja vrednost naizmjeničnog probojnog napona je oko 20% veća od odgovarajuće vrednosti za impulsni probojni napon. I ovaj efekat se može objasniti delimičnim kondicioniranjem kontakata tokom porasta naizmjeničnog napona.
3. Takođe je ustanovljeno da vrednost naizmjeničnog i impulsnog probojnog napona zavisi od tipa ispitivane vakuumske komore. Vakuumska komora tip A je imala najveće srednje vrednosti naizmjeničnog i impulsnog probojnog napona, odgovarajuća vrednost za vakuumsku komoru tip B je bila niža za oko 15%, odgovarajuća vrednost za vakuumsku komoru tip C je bila niža za oko 20%, a odgovarajuća vrednost za vakuumsku komoru tip D za oko 15%. Pošto se pokazalo da je kontaktna geometrija bila ista za sve ispitivane vakuumske komore ovakva razlika nije mogla biti posledica različitog prečnika električnog luka kratkog spoja tokom rasklopa pa se uočena pojava može jedino objasniti različitom promenom topografije kontaktnih površina tokom sklopne operacije. Na osnovu toga se može zaključiti da različiti sastavi materijala kontakata dovode do različitih promena na kontaktnim materijalima tokom sklopne operacije uklop bez struje-rasklop sa nominalnom srujom kratkog spoja.

4. Zavisnost srednje vrednosti naizmjeničnog i impulsnog probojnog napona od međuelektrodnog rastojanja pokazuje blagi rast i trend ka saturaciji pri međukontaktним rastojanjima 3 mm za nominalne sklopne komore tip A i tip B, a pri međukontaktним rastojanjima 2,5 mm za vakuumske komore tip C i tip D.
5. Nije bilo moguće odrediti parametar V_{-4} pošto je dolazilo do jednosmernog proboja tokom rasta jednosmernog napona.
6. Tokom merenja pretprobojnih parametara V_{-5} , V_{-6} ustanovljeno je da postoji razlika posle naizmjeničnog ili impulsnog proboja. Ustanovljeno je, takođe, da su njihove vrednosti za oko 15% veće posle naizmjeničnog proboja nego u slučaju da se mere posle impulsnog proboja. I taj efekat se može objasniti delimičnim kondicioniranjem kontakata tokom porasta neizmjeničnog napona. Vrednosti pretprobojnih parametara V_{-5} , V_{-6} su bile znatno veće od odgovarajućih vrednosti dobijenih nakon kondicioniranih kontakata, kao i sklopnim operacijama uklop bez struje-rasklop bez struje i uklop bez struje-rasklop sa nominalnom strujom kratkog spoja.
7. Promena vrednosti pretprobojnih parametara V_{-5} , V_{-6} sa porastom međukontaktного rastojanja je bila zanemarljiva.

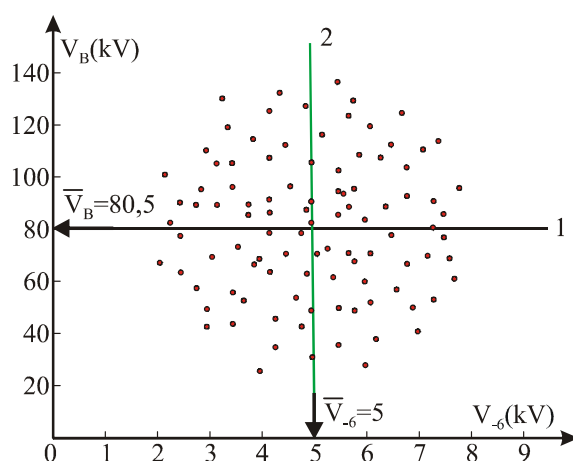


Slika 5.23. Rezultati U-testa za statističke uzorke slučajne promenljive naizmjenični (°) i impulsni (•) probojni napon; sklopni element tip C; međukontaktno rastojanje je 2 mm; kontakti nakon sklopne operacije uklop bez struje-rasklop sa nominalnom strujom kratkog spoja

I u ovom slučaju je ustanovljeno da slučajne promenljive naizmjenični probojni napon, impulsni probojni napon i pretprobojni parametri V_{-5} , V_{-6} pripadaju vrlo širokoj normalnoj raspodeli sa statističkom nesigurnosti 8%.

Kao i u prethodnim slučajevima ispitivane su relacije korelacije i regresije između slučajnih promenljivih naizmenični probojni napon, odnosno impulsni probojni napon, i pretprobojnih veličina V_{-5} , V_{-6} . Dobijene vrednosti korelacionog koeficijenta između probojnih napona i pretprobojnih parametara V_{-5} odnosno V_{-6} za različite tipove vakuumskih komora nakon sklopne operacije uklop bez struje-rasklop sa nominalnom strujom kratkog spoja date su u Tabeli 5.2.

Slika 5.24 prikazuje regresione krive između impulsnog probojnog napona i odgovarajuće vrednosti pretprobojnog parametra V_{-6} za tip B za vakuumski sklopni element.



Slika 5.24. Regresione prave: impulsni probojni napon od pretprobojnog parametra V_{-6} (prava 1) i pretprobojni parameter V_{-6} od impulsnog probojnog napona (prava 2); tip B sklopni element; međukontaktno rastojanje 2 mm; kontakti nakon sklopne operacije uklop bez struje-rasklop sa nominalnom strujom kratkog spoja; korelacioni koeficijent 0,005; regresioni koeficijent $b_{xy}=0,09$; standardno odstupajne slučajne promenljive impulsni probojni napon 27,1 kV; ugao između pravih $89,2^\circ$

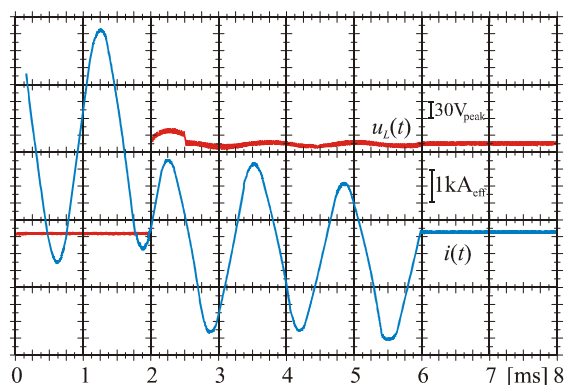
Svi dobijeni rezultati mogu se objasniti mehanizmom vakuumskog proboja, odnosno uticajem sklopnih operacija na te mehanizme. Naime, idealna čistoća vakuuma dovodi do zavarivanja prilikom sklopne operacije uklopa i kidanja tako nastalih varova tokom sklopne operacije isklop. Pojava mikrošiljaka (usled kidanja varova) i dejstvo

električnog luka prilikom operacije rasklopa drastično menjaju topografiju kontaktnih površina što bitno utiče na vrednost probojnog napona. To je najnepovoljniji događaj tokom sklopnih operacija.

Posle sklopne operacije uklop bez struje-rasklop bez struje nastaje veliki broj mikrošiljaka koji se generišu opisanim mehanizmom. Ti mikrošiljci izazivaju višestruko povećanje lokalnog električnog polja (mikroskopskog električnog polja) i usled toga dolazi do porasta pretprobojne struje, čime rastu i uslovi za proboj vakuuma emisionim mehanizmima.

Tokom sklopne operacije uklop bez struje-rasklop sa nominalnom strujom razvija se difuzni električni luk, što potvrđuje oscilogram struje i napona luka tokom te operacije, Slika 5.25. U tom slučaju, promene na površini kontakata koje nastaju prilikom operacije rasklopa su:

1. Erozija kontakata usled kretanja katodne mrlje.
2. Eksplozija provodnih metalnih mostova tokom širenja luka.
3. Kondenzacija neutralnih metalnih para na kontaktima.

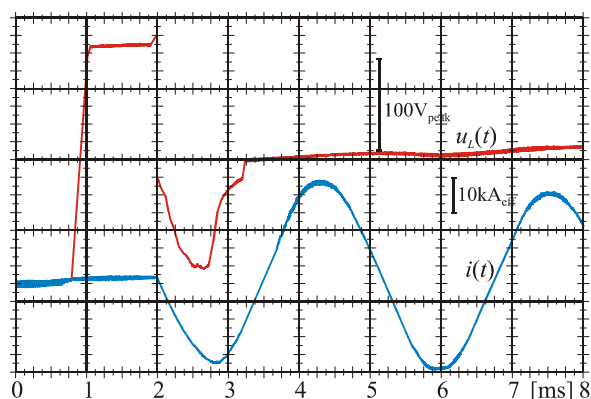


Slika 5.25. Oscilogram struje i napona luka tokom sklopne operacije uklop bez struje-rasklop sa nominalnom strujom; sklopni element tip A

Katodna mrlja se u slučaju difuznog luka stohastički kreće po površini kontakta, međutim, to kretanje katodne mrlje ne proizvodi kratere već topi mikrošiljke i poravnava kontaktnu površinu. U stvari kretanje katodne mrlje dovodi do kondicioniranja kontakata i iz tog razloga poboljšava izolacione karakteristike (povećava vrednost probojnog napona). U slučaju pojave difuznog luka dolazi do povećanja vrednosti probojnog napona i

eksplozija provodnog mosta. Naime, tokom operacije isklopa, u jednom trenutku (pri rastavljanju kontakata), kontakti se dodiruju samo u jednoj tački u kojoj dolazi do topljenja kontaktnog materijala usled velikog Džulovog efekta. Tako istopljeni material isparava zajedno sa eksplozijom pri formiranju provodnog mosta. Krateri i mikrošiljci na kontaktnim površinama nastali tim putem iniciraju proboj vakuuma emisionim mehanizmom. Uticaj nataloženih metalnih para na kontaktnim površinama nije veliki ali i on dovodi do povećanja probajnog napona jer se zarobljavanjem rezidualnih molekula gasa podiže kvalitet vakuuma (smanjenje pritiska vakuuma gejtovanjem molekula gasa).

Tokom sklopne operacije uklop bez struje-rasklop sa nominalnom strujom kratkog spoja javlja se uski električni luk koji je koncentrisan u samo jednu katodnu tačku. To ima za posledicu emisiju iz mikrošiljaka ka katodi i anodi, pošto ih luk ne topi, tj. ne kondicionira kontaktne površine. Pojava uskog luka tokom sklopne operacije uklop bez struje-rasklop sa nominalnom strujom kratkog spoja potvrđuje oscilogram struje i napona luka, Slika 5.26, koji je karakterističan za uski luk (ima karakterističan skok napona luka). Postojanje jedne anodne mrlje vodi do intenzivnog topljenja anodnog kontakta i delovi anodnog materijala se intenzivno emituju u međukontaktni prostor kao metalna para, komadi anodnog materijala i kondenzovane kapljice anodnog materijala. Tako nastali mikrodelići učestvuju u probaju vakuuma mehanizmom mikrodelića koji se superponira sa emisionim mehanizmom mikrošiljaka nastalih operacijom rasklopa.



Slika 5.26. Oscilogram struje i napona luka tokom sklopne operacije uklop bez struje-rasklop sa nominalnom strujom kratkog spoja; sklopni element tip A

To je razlog što se nakon sklopne operacije uklop bez struje-rasklop sa nominalnom strujom kratkog spoja proboj međukontaktog rastojanja odvija složenim mehanizmom koji je kombinacija emisionog mehanizma proboja mikrodelićima. Pošto je pretprobojna struja određena električnim poljem logično je da nakon sklopne operacije uklop bez struje-rasklop bez struje i uklop bez struje-rasklop sa nominalnom strujom postoji korelacija između probojnih napona i pretprobojnih parametara. Međutim, pošto se nakon operacije uklop bez struje-rasklop sa nominalnom strujom kratkog spoja proboj međukontaktog prostora inicira kombinovanim mehanizmom takve korelacije su slabe. Može se konstatovati i da su korelacije između probojnih napona i pretprobojnih mehanizama utoliko slabije ukoliko je veći uticaj mehanizma iniciranja proboja vakuuma mehanizmom mikrodelića u kombinovanom mehanizmu [91-92].

6. ZAKLJUČAK

6. ZAKLJUČAK

U prvom poglavlju razmatrani su mehanizmi iniciranja proboja i proboja gasa u okolini Pašenovog minimuma kao i mehanizmi iniciranja proboja i proboja vakuuma. Pri tome je posebna pažnja posvećena tumačenju mehanizama iniciranja proboja i proboja u tačkama levo od Pašenovog minimuma u kojima dolazi do prelaza gasnog mehanizma proboja u vakuumski mehanizam proboja. Najviše je razmatrano tumačenje hipoteze o anomalnom Pašenovom efektu i lavinskom mehanizmu vakuumskog proboja. Tom prilikom su izneti argumenti za dva različita tumačenja anomalnog Pašenovog efekta kao i teoretske osnove, eksperimentalno nepotvrđenog, lavinskog mehanizma proboja vakuuma.

U drugom poglavlju je dat prikaz primene vakuuma kao dielektrika u elektrotehnici. Nakon opšteg razmatranja komutacione tehnike, u ovom poglavlju dati su pregled i istorija razvoja vakuumskih prekidača. Sa tim povezano, u drugom poglavlju je ukazano na specifične probleme u radu sa vakuumskim sklopnim elementima do kojih dolazi usred ireverzibilnih promena njihove dielektrike (u stanju otvorenih prekidača) kao posledice istorije rada prekidača. Kako je ispitivanje toga efekta i bio glavni cilj ovoga rada u okviru ovog poglavlja je dat detaljan pregled do sada postignutih, i objavljenih, rezultata vezanih za uticaj sklopnih operacija na dielektričnu čvrstoću međukontaktnog prostora.

Treće poglavlje rada je posvećeno matematičkim metodama koje je bilo nužno primeniti da bi se uspostavila veza između merenih statističkih uzoraka slučajnih promenljivih pretprobojni parametri i probojni naponi. Pored napomena o standardnim metodama statističke organizacije eksperimenata u trećem poglavlju su date praktične osnove metoda korelacije i regresije. U trećem poglavlju su, takođe, ukratko opisani postupci U – testa i F – testa potrebnih za testiranje verodostojnosti eksperimentalno određenih statističkih uzoraka.

Četvrto poglavlje u radu je posvećeno eksperimentalnom postupku. U poglavlju je detaljno opisana eksperimentalna oprema i eksperimentalni postupak koji su bili odabrani prema najstrožim principima statističke organizacije eksperimenata opisanim u poglavlju

tri. Eksperimenti opisani u ovom poglavlju su bili vrlo sofisticirani i omogućavali su dobijanje visoko reproduktivnih rezultata. Tokom prikaza eksperimentalne opreme i eksperimentalnog postupka opisani su detalji eksperimenata rađenih u cilju ispitivanja mehanizama inicijacije i razvoja proboja u gasovima pri niskom pritisku i vakuumu kao i u cilju ispitivanja korelacije i regresije između pretprobojnih parametara i vrednosti probojnog napona. U četvrtom poglavlju je i izražena odgovarajuća merna nesigurnost svih primenjenih eksperimentalnih postupaka.

Peto poglavlje je osnovno poglavlje ovoga rada. U njemu su dati i diskutovani eksperimentalno dobijeni rezultati. Eksperimentalno dobijeni rezultati su diskutovani sa aspekta teoretskih osnova posmatranih fenomena izlaganih u prvom poglavlju. Tokom diskusije dobijenih rezultata težilo se uspostavljanju makroskopskih veza između vrednosti pretprobojnih fenomena i odgovarajućih vrednosti probojnih napona. Tako uspostavljeni makroskopski efekti tumačeni su na mikroskopskom nivou elementarnim procesima vezanim za mehanizam inicijacije i mehanizam proboja međukontaktne rastojanja prekidača sa otvorenim kontaktima. Rezultati do kojih se došlo ovim putem su poređeni sa rezultatima drugih autora na koje je ukazano u drugom poglavlju.

Zaključci dobijeni tokom ovog rada mogu se sažeti tvrdnjom da je: 1) Prelaz iz Tausendovog mehanizma proboja (koji je osnovni mehanizam proboja u Pašenovom minimumu i u tačkama neposredno uz minimum sa desne strane) u anomalni Pašenov mehanizam proboja odvija u jednoj relativno širokoj oblasti vrednosti pritiska i međuelektrodnog rastojanja sa leve strane od minimuma; 2) Pri većim vrednostima pritiska i međuelektrodnog rastojanja, dominira gasni Tausendov mehanizam proboja, a pri manjim vrednostima dominira gasni anomalni Pašenov mehanizam proboja; 3) Prelaz iz gasnog anomalnog Pašenovog mehanizma proboja u vakuumski mehanizam lavinskog tipa, takođe, odvija u jednoj relativno širokoj oblasti vrednosti pritiska i međuelektrodnog rastojanja; 4) Pri višim vrednostima pritiska i međuelektrodnog rastojanja dominira gasni anomalni Pašenov mehanizam proboja, a pri manjim vrednostima vakuumski lavinski mehanizam proboja; 5) Potvrđeno je postojanje lavinskog mehanizma proboja vakuuma za koji tek, od nedavno, postoje naznake eksperimentalne potvrde teoretske hipoteze; 6) Primenom pozicioniranja Bragovog mehanizma α -zračenja, potvrđena prava priroda

anomalnog Pašenovog mehanizma proboja kao vrste ivičnog praženjenja dužom, energetski povoljnijom putanjom; 7) Moguće je odrediti vrednost probojnog napona međukontaktnog rastojanja sa $\pm 8\%$ merne nesigurnosti merenjem pretprobojnog parametra V_{-4} u slučaju da se proboj vakuuma inicira emisionim mehanizmom; 8) Vrednost naizmeničnog i impulsnog probojnog napona može biti određena sa kombinovanom mernom nesigurnosti od $\pm 20\%$ merenjem pretprobojnog parametra V_{-5} u slučaju da se proboj vakuuma inicira emisionim mehanizmom; 9) Nije moguće odrediti vrednost naizmeničnog i impulsnog probojnog napona vakuuma merenjem pretprobojnog parametra V_{-6} ; 10) Vrednost naizmeničnog i impulsnog probojnog napona ne može se odrediti merenjem pretprobojnih parametara u slučaju da u mehanizmu iniciranja vakuumskog proboja učestvuje i mehanizam mikrodelića; 11) Kontakti material i njegov sastav utiču na korelaciju između probojnih napona i pretprobojnih parametara.

Dobijeni rezultati omogućavaju da, u budućoj upotrebi vakuumskih prekidača kao elemenata pametnih mreža, veštačka inteligencija donese odluku o potrebi njegove zamene. Na taj način će biti moguće optimizirati upotrebu vakuumskih prekidača i minimizirati opasnost od neželjenih međukontaktnih proboja u stanju rasklopa, a samim tim postignuti vremensku i ekonomsku racionalizaciju. Takođe bi bilo moguće razviti sistem koji bi kontinualno vršio merenje pretprobojnih parametara vakuumskih prekidača i na osnovu toga vršiti prognozu njihove pouzdanosti.

Da bi to bilo moguće potrebno je nastaviti ispitivanja korelacije i regresije između vrednosti pretprobojnih parametara i odgovarajuće vrednosti probojnih napona. Kao prvo potrebno je izvršiti slična ispitivanja, kao što su ona prikazana u ovom radu, sa prekidačima sa aksijalnim poljem i uporediti ih sa predhodno prikazanih rezultatima, a onda nastaviti sa ispitivanjima toga tipa na ostalim vakuumskim komponentama u elektroenergetskom sistemu.

7. LITERATURA

7. LITERATURA

- [1] P. Osmokrović, Elektrotehnički materijali, Akademski misao Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2003.
- [2] M. Pejović, A. Jakšić, K. Stanković, S. Marković, Successive gamma-ray irradiation and corresponding post-irradiation annealing of pMOS dosimeters, Nuclear Technology and Radiation Protection, Volume 27, Issue 4, December 2012, Pages 341-345.
- [3] Č. Dolićanin, K. Stanković, D. Dolićanin, B. Lončar, Statistical treatment of nuclear counting results, Nuclear Technology and Radiation Protection, Volume 26, Issue 2, September 2011, Pages 164-170.
- [4] P. Osmokrović, Električni probaj sumporheksfluorida u intervalu vrednosti proizvoda pd od 10^{-4} do 10^3 barmm, doktorska disertacija ETF, Beograd.
- [5] P. Osmokrović - Electrical Breakdown of SF₆ at Small Values of Product pd , IEEE Transactions on Power Delivery 1989, Vol. 4, No. 4, pp. 2095 - 2100.
- [6] P. Osmokrović - Mechanism of Electrical Breakdown of Gases at Very Low Pressure and Inter-electrode Gap Values, IEEE Transactions on Plasma Science 1993, Vol. 21, No. 6, pp. 645-654.
- [7] S. C. Brown, Introduction to Electrical Discharges in Gases, Wiley, New York, 1966.
- [8] J. Meek, J. Craggs, Electrical breakdown of gases, John Wiley & Sons Inc, New York, 1978.
- [9] S. C. Brown, Basic Data of Plasma Physics, MIT Press, Cambridge MA, 1959.
- [10] P. Osmokrović, Mechanism of electrical breakdown of gases at very low pressure and interelectrode gap values, IEEE Transactions on Plasma Science Volume 21, Issue 6, December 1993, Pages 645-653.
- [11] P. Osmokrović, M. Vujisić, K. Stanković, A. Vasić i B. Lončar, 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, Volume 16, Issue 6, August 2007, Article number 025, Pages 643-655.

[12] P. Osmokrović, Electrical breakdown of SF₆ at small values of the product pd, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 4, Issue 4, October 1989. Pages 2095-2099.

[13] P. Osmokrović i A. Vasić, Anomalous Paschen effect, Transactions on Plasma Science, Volume 33, Issue 51, October 2005. Pages 1672-1676.

[14] P. Osmokrović, T. Živić, B. Lončar i A. Vasić, The validity of the general similarity law for electrical breakdown of gases, Plasma Sources Science and Technology, Volume 15, Issue 4, 1 June 2006, Article number 015, Pages 703-713.

[15] W.W. Dolan, Dyke, W.P., Trolan, J.K., The field emission initiated vacuum arc. II. The resistively heated emitter, Phys.Rev., vol.91, No.9, pp.1043-1057, 1953.

[16] S.P. Bugaev, E.A. Litvinov, G.A. Mesyats, D.I. Proskurovski, Explosive emission of electrons, Uspekhi Fis. Nauk, v.115, No.1, p.101, 1975.

[17] A. Litvinov, G.A. Mesyats, D.I. Proskurovski, Field emission and explosive electron emission processes in vacuum discharges, Fiz. Nauk, v.139, No.2, p.265, 1983

[18] G.E. Vibrans, Vacuum voltage breakdown as a thermal instability of the emitting protrusion, J.Appl.Phys, v.35, pp.2855-2857, 1964.

[19] P.A. Chatterton, A theoretical study of field emission initiated vacuum breakdown, Proc.Phys.Soc.Lond., v.88, p.231, 1966.

[20] D.K. Davies, M. A. Biondi, Mechanism of dc electrical breakdown between extended electrodes in vacuum, J.Appl.Phys, v.42, No.8, pp.3089-3107, 1971.

[21] V.A. Nevrovski, Zhurn.Tekh.Fiz., Thermal anode instability in the prebreakdown stage of vacuum breakdown, Soviet physics. Technical physics, 23 (11), pp. 1317-1322, 1978.

[22] P. A. Chatterton, Electrical Breakdown in Gases edited by J.M.Meek and J.D.Craggs, pp. 129-205 Wiley, New York, 1978.

[23] R. V. Latham, High Voltage Vacuum Insulation the Physical Basis Academic Press, London, 1981.

- [24] R. V. Latham, Microparticle charge acquisition and reversal at impact, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol.5, pp. 2049-2054, 1972.
- [25] D. Ilić, Lavinski mehanizam proboja vakuuma, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet 2011.
- [26] P. Osmokrovic, M. Vujisic, K. Stankovic, A. Vasic, B. Loncar, 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 (3), pp. 643-655, 2007.
- [27] D. Ilic, K. Stankovic, M. Vujisic, P. Osmokrovic, Avalanche mechanism of vacuum breakdown, *Radiation Effects and Defects in Solids*, 166 (2), pp. 137-149, 2011.
- [28] R. Milošević, Ž. Bago, O nekim osobitostima vakuumskih sklopnih aparata, Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije, pp. 1-17, 2010.
- [29] A. N. Greenwood, H. N. Schneider, T. H. Lee, Vacuum type circuit interrupter, US Patent 2 892 912, 1959.
- [30] T. H. Lee, A. N. Greenwood, D. W. Crouch, C. H. Titus, Development of power vacuum interrupters, *Trans. AIEE*, 81, pp. 629-639, 1962.
- [31] M. P. Reece, Vacuum switching I, review of literature and scope of ERA research on the subject, E. R. A. Report G/XT166, 1959.
- [32] M. P. Reece, Vacuum switching II, extinction of an AC vacuum arc at current zero, E. R. A. Report G/XT167, 1959.
- [33] M. P. Reece, Vacuum switching III, experimental results, application to contactors, conclusions and bibliography, E. R. A. Report G/XT168, 1959.
- [34] M. P. Reece, The vacuum switch, part 1-properties of vacuum arc, *Proc. IEE*, 110, pp.793-802, 1963.
- [35] M. P. Reece, The vacuum switch, part 2-extinction of an AC vacuum arc, *Ibid. IEE*, pp.803-811, 1963.
- [36] M. P. Reece, Improvements related to vacuum electric switches, British Patent 835 253, 1960.
- [37] A. A. Robinson, Vacuum type electric circuit interrupter devices, British Patent 1 194 674, 1970.

- [38] M. P. Reece, A. A. Lake, Improvements relating to vacuum switch contact assemblies, British Patent 1 098 862, 1968.
- [39] A. G. Knapton, M. P. Reece, Improvements relating to vacuum switch contacts, British Patent 1 100 259, 1968.
- [40] D. R. Kurtz, J. C. Sofianek, D. W. Crouch, Vacuum interrupters for high voltage transmission circuit breakers, IEEE Conference Paper C75 054-2, 1975.
- [41] R. B. Shores, V. E. Phillips, High voltage vacuum circuit breakers, Trans. IEEE, PAS-94, pp. 1821-1830, 1975.
- [42] O. Morimiya, S. Sohma, T. Sugawara, H. Mizutani, High Current vacuum arcs stabilized by axial magnetic field, Trans. IEEE, PAS-92, pp. 1723-1732, 1963.
- [43] S. Yanabu, S. Sohma, T. Tamagawa, S. Yamashita, T. Tsutsumi, Vacuum arc under axial magnetic field and its interrupting ability, Proc. IEE, 125, pp. 313-320, 1979.
- [44] E. Dullni, E. Shade, B. Gellert, Dielectric recovery of vacuum after strong anode spot activity, Proceedings of 12th international symposium of Discharges and electrical insulation in vacuum, 1986.
- [45] A. N. Greenwood, Vacuum switchgear, Published by The Institution of Engineering and Technology, London, UK, IET Power Series 18, 1994
- [46] A. N. Greenwood, Electrical transients in power systems, Wiley 2nd edn. Pp. 50-57, 1991.
- [47] M. Glinkowski, A. Greenwood, Computer simulation of post-arc plasma behavior at short contact separation in vacuum, IEEE Trans., PS-17, pp. 45-50, 1989.
- [48] M. Glinkowski, A. Greenwood, Some interruption criteria for short high-frequency vacuum arcs, IEEE Trans., PS-17, pp. 741-743, 1989.
- [49] T. H. Lee, A. Greenwood, Theory of the cathode mechanism in metal vapor arcs, J. App. Phys., 32, pp. 916-923, 1961.
- [50] P. Osmokrović, Influence of switching operations on the vacuum interrupter dielectric 3rd edn., 1986.
- [51] M. Glinkowski, A. Greenwood, J. Hill, R. Mauro, V. Varneckas, Comparative switching with vacuum circuit breakers-a comparative evaluation, IEEE Trans., PWRD-6, pp. 1088-1095.

- [52] H. N. Schneider, Vacuum type circuit interrupter, US Patent 2 949 520, 1960.
- [53] P. Osmokrović, Z. Lazarević, Irreversibility of dielectric strength of vacuum interrupters after switching operations, European Transactions on Electrical Power, vol. 7, pp. 129-135, 1997.
- [54] D. Mostić, P. Osmokrović, K. Stanković, R. Radosavljević, Dielectric characteristics of vacuum circuit breakers with CuCr and CuBi contacts before and after short-circuit breaking operations, Vacuum, vol. 86, pp. 156-164, 2011.
- [55] P. G. Slade, Contact materials for vacuum interrupters, IEEE Trans Parts Hybrids Packag, PHP-10 (1), pp. 43-47, 1974.
- [56] K. Froehlich, W. Widl, Breakdown and field-emission behaviour of differently prestressed vacuum interrupter copper contacts, IEE Proceedings C: Generation Transmission and Distribution, 128 (4), pp. 243-249, 1981.
- [57] G. A. Farral, Electrical Breakdown in Vacuum, IEEE, Volume:EI-20, Issue: 5, pp. 815-841, 1985.
- [58] W. Widl, Contact Welding and Field Emission Initiated Breakdown in Vacuum, Etz Archiv Bd, vol. 4, 1982.
- [59] W. Widl, Dissertattion der Technischen Universitat Wien, 1980
- [60] W. Widl, Voltage Resistance of Vacuum Switchgear, Bulletin de l'Association suisse des electriciens, 72 (3), pp. 115-120, 1981.
- [61] P. A. Chatterton, Electrical Breakdown in Gases edited by J.M.Meek and J.D.Craggs, pp. 129-205 Wiley, New York, 1978.
- [62] H. Schmidt, Dissertattion der techn. Universitat Darmstadt, 1980.
- [63] Liu Shao-chun, Statistical Properties of Steady State Impulse Breakdown Voltage for Commercial Vacuum Interrupters, Electrical Insulation, IEEE Transactions on , vol.EI-18, no.3, pp. 325 – 331, 1983
- [64] O. Lloyd, R. Hackam, Effect of Mechanical Contact Force on withstand voltage of Copper-Bismuth and CLR vacuum interrupters, Proc IEEE, vol. 122, No. 11, pp. 1275-1278, 1975.
- [65] G. A. Farral, Voltage effects of low and high current arcing on vacuum interrupter contacts, IEEE Trans Parts Hybrids Packag, PHP-11 (2), pp. 134-138, 1975.

- [66] O. Lloyd, The impulse voltage performance of a vacuum switch, Proc. 6th ISDEIV, pp.230-235,1974.
- [67] P. Osmokrović, Influence of switching operations on the vacuum interrupter dielectric strength, IEEE Transactions on Power Delivery, 8 (1), pp. 175-181, 1993.
- [68] R. Marić, Važenje zakona porasta za električni proboj vakuuma, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2010.
- [69] P. Osmokrović, Statističke metode u elektroenergetici, Akademska misao Državni univerzitet u Novom Pazaru, Beograd,2009.
- [70] P.H.Müller, Wahrscheinlichkeitsrechnung und mathematische Statistik – Lexikon der Stochastik. Berlin: Akademie-Verlag 1975.
- [71] R. Storm, Wahrscheinlichkeitsrechnung - mathematische Statistik – statische Qualitätskontrolle 6. Aufl. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1976.
- [72] N.W. Smirnow, I.W. Dunin-Barkowskij, Mathematische Statistik in der Technik. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften 1963.
- [73] M. Boutteau, Anleitung zur statistischen Behandlung von Versuchsergebnissen, die im Konstantspannungsversuch erhalten wurden EdF Bull. Serie B (1971) 3, pp.57-72.
- [74] H. Ebersberger, W. Hauschild, Förster, K.-H.: Statische Verfahren für die Bestimmung der Durchschlagwahrscheinlichkeit von Isoli-erstrecken. Wiss. Z. Elektrotechn. 17 (1971) 2/3, pp. 117 - 132.
- [75] H.P. Müller, P. Neumann, R. Storm, Tafeln der mathematischen Statistik. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1973.
- [76] L. Sachs, Statistische Auswertungsmethoden. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1968.
- [77] W. E. Burcham, Nuclear Physics-An Introduction, Longman Group Limited, London 1973.
- [78] P. Osmokrović, Osnovi nuklearne fizike, Akademska misao, 2008.
- [79] I. Kaplan, Nuclear physics, Addison-Wresley publishing company, INC, U.S.A, 1958.
- [80] К. Мухин, Экспериментальная ядерная физика, Атомиздат, Москва, 1974.
- [81] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, International Organization for Standardization, Geneva,1995.

- [82] K. D. Stanković, M. I. Vujisić, L. D. Delić: Influence of tube volume on measurement uncertainty of GM counters, *Nuclear Technology and Radiation Protection*, 2010, 25 (1), pp. 46-50.
- [83] K. Stanković, Influence of the plain-parallel electrode surface dimensions on the type a measurement uncertainty of gm counter, *Nuclear Technology and Radiation Protection*, 2011, 26 (1), pp. 39-44.
- [84] K. Stanković, M. Vujisić, D. Kovačević, P. Osmokrović. Statistical analysis of the characteristics of some basic mass-produced passive electrical circuits used in measurements. *Measurement* 2011;44:1713-22.
- [85] M. Vujisić, K. Stanković, P. Osmokrović, A statistical analysis of measurement results obtained from nonlinear physical laws. *Appl Math Model* 2011;35:3128-35.
- [86] U. Jakšić, N. Arsić, I. Fetahović, K. Stanković, Analysis of correlation and regression between particle ionizing radiation parameters and the stability characteristics of irradiated monocrystalline Si film, *Nuclear Technology and Radiation Protection*, 2014,
- [87] Burcham WE, *Nuclear Physics-An Introduction*, London: Longman Group Limited; 1973.
- [88] M. Vujisić, K. Stanković, N. Marjanović, P. Osmokrović, Simulated effects of proton and ion beam irradiation on titanium dioxide memristors, *IEEE Trans Nucl Sci* 2010;57:1798-1804.
- [89] M. Vujisić, K. Stanković, E. Dolićanin, P. Osmokrović, Radiation hardness of COTS EPROMs and EEPROMs. *Radiat Eff Defect S* 2010;165:362-9.
- [90] N. Marjanović, M. Vujisić, K. Stanković, D. Despotović, P. Osmokrović, Simulated exposure of titanium dioxide memristors to ion beams. *Nucl Technol Radiat Prot* 2010;25:120-25.
- [91] R. Todorović, D. Škatarić, Z. Bajramović, K. Stanković, Correlation and regression between the breakdown voltage and pre-breakdown parameters of vacuum switching elements, *Vacuum*, Vol. 123, pp. 111-120, 2016.
- [92] R. Todorović, D. Škatarić, Z. Bajramović, K. Stanković, The influence of magnetic field shape on dielectric characteristics of vacuum switches, *FME Transaction* (submitted for publication).

BIOGRAFIJA AUTORA

Radomir Todorović je rođen 06. avgusta 1970. godine u Kosovskoj Mitrovici. Osnovnu školu „Veselin Masleša” i Prvu beogradsku gimnaziju „Moše Pijade“ završio je u Beogradu (1985 i 1989. godine). Na energetsom odseku smer Elektroenergetski sistemi i mreže Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu diplomirao je 1997. godine. Zvanje magistra tehničkih nauka stekao je 2003. godine na smeru Elektroenergetska postojenja i oprema Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, a magistarski rad je nosio naziv „Slabljenje tonfrekventnog signala pri njegovom prolasku kroz energetska mrežu“. Stručni ispit propisan za diplomiranog inženjera elektrotehnike, energetskog odseka, položio je 2000. godine. Posедуje licence: 1. Odgovorni projektant elektroenergetskih instalacija niskog i srednjeg napona; 2. Odgovorni izvođač radova elektroenergetskih instalacija niskog i srednjeg napona; 3. Odgovorni projektant telekomunikacionih mreža i sistema; i 4. Odgovorni izvođač radova telekomunikacionih mreža i sistema. Položio je i stručni ispit za poslove zaštite od požara, 2010. godine.

Od 1998. godine zaposlen je u „Elektrodistribuciji Beograd” na mesto inženjera energetičara u Službi za MTK. Od 2003. godine je rukovodeći inženjer u „Elektrodistribuciji Beograd”.

Tokom svog dosadašnjeg naučno-stručnog rada Radomir Todorović je objavio, u svojstvu autora i koautora, 2 rada u časopisima međunarodnog značaja (sa *SCI* liste), 2 rada na međunarodnim konferencijama, 2 rada u domaćim časopisima i 6 radova na domaćim konferencijama.

U Beogradu,

25.12.2015. godine

Prilog 1.

Izjava o autorstvu

Potpisani Radomir Todorović

broj indeksa

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

Predikcija karakteristika dielektrike vakuumskih prekidača na osnovu ispitivanja pretprobojnih fenomena

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio/la autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

Potpis doktoranda

U Beogradu, 25.12.2015. godine

Prilog 2.

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora Radomir Todorović

Broj indeksa

Studijski program

Naslov rada **Predikcija karakteristika dielektrike vakuumskih prekidača na osnovu ispitivanja pretprobojnih fenomena**

Mentor dr Dobrila Škatarić, redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu

Potpisani/a Radomir Todorović

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao/la za objavljivanje na portalu **Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

Potpis doktoranda

U Beogradu, 25.12.2015. godine

Prilog 3.

Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

Predikcija karakteristika dielektrike vakuumskih prekidača na osnovu ispitivanja pretprobojnih fenomena

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim prilozima predao/la sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio/la.

1. Autorstvo

2. Autorstvo - nekomercijalno

3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade

4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima

5. Autorstvo – bez prerade

6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima

Potpis doktoranda

U Beogradu, 25.12.2015. godine
