

Deo I

Dielektrici

Poglavlje 1

Mehanizam pražnjenja u gasovitim dielektricima

1.1 Uvod

Izučavanje električnih svojstava gasova je od velikog praktičnog značaja, jer u visokonaponskim postrojenjima i kod nadzemnih vodova vazduh predstavlja osnovno izolaciono sredstvo. Osim vazduha, za izolaciju visokonaponskih uređaja koristi se gas sumporheksafluorid (SF_6) koji ima odlična izolaciona svojstva. Kako bi omogućio normalno funkcionisanje različitih električnih instalacija, gas kao dielektrik treba da ispuni sledeće zahteve:

- mala provodnost,
- mali dielektrički gubici,
- velika dielektrična čvrstoća.

Osim ovih karakteristika, gasovi koji se koriste u elektrotehnici moraju da ispunjavaju i dopunske uslove:

- nisku temperaturu kondenzacije,
- nezapaljivost,
- da nije štetan po okolinu ili toksičan,

- poseduje hemijsku i toplotnu stabilnost,
- jednostavnu i jeftinu proceduru dobijanja.

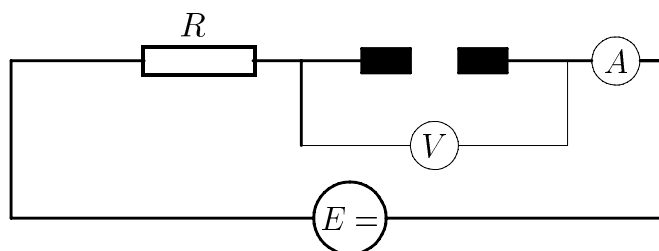
Vazduh se najčešće koristi kao gasoviti dielektrik, ali se ponekad koristi i azot kao sredstvo za izolaciju unutar zatvorenih uređaja kao što su na primer odvodnici prenapona u porculanskim kućištima ili kondenzatori. Azot ima praktično istu dielektričku čvrstoću kao vazduh. Prednost u odnosu na vazduh mu je što ne sadrži kiseonik koji ima oksidaciono dejstvo na materijale koji su u dodiru sa njim.

Gas SF₆ se koristi za izolaciju oklopljenih visokonaponskih postrojenja, čime se njihove dimenzije značajno smanjuju, ali i u prekidačima kao sredstvo za gašenje luka. Pri atmosferskom pritisku dielektrička čvrstoća mu je oko 2,5 puta veća od vazduha pri istim uslovima. Poslednjih godina se vodi računa da ispuštanje gasa SF₆ u atmosferu utiče na efekat staklene bašte i globalno zagrevanje, pa se moraju primenjivati stroga ekološka pravila korišćenja.

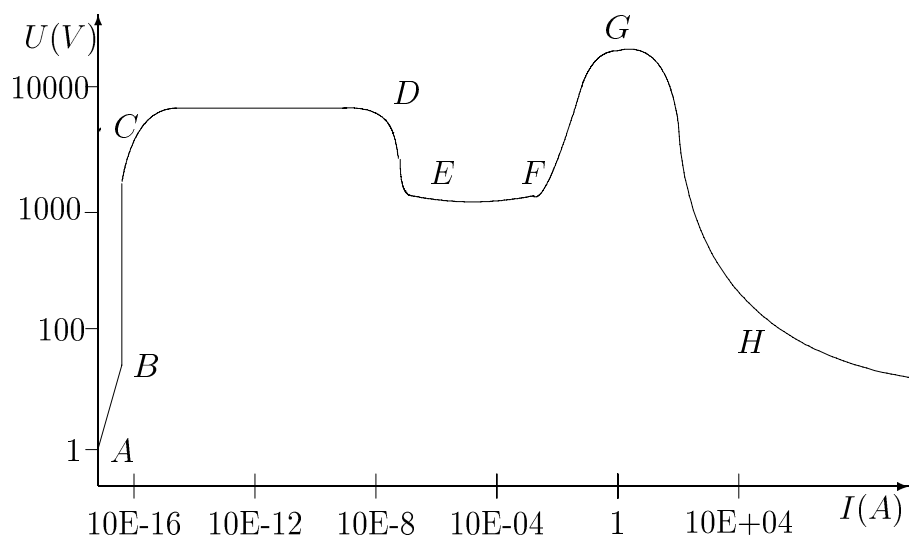
1.2 Jonizacija u gasovima

Pri normalnim pritiscima i temperaturama gasovi su dobri dielektrici. Međutim, u vazduhu se ipak može naći određeni broj slobodnih elektrona i pozitivnih jona. Na primer, za temperaturu od 20⁰C i atmosferski pritisak od 1,013 miliBara koji vlada na nivou morske površine pri lepom vremenu, u 1 cm³ nalazi se 650 slobodnih elektrona i oko 750 pozitivnih jona. Gornji atmosferski uslovi nazivaju se normalnim atmosferskim uslovima i važni su da bi se prilikom ispitivanja svojstava izolacionih struktura uvek ispitivanja radila pri istim uslovima, ili postupkom koji će kasnije biti objašnjen rezultati svodili na normalne atmosferske uslove. Pojava jonizovanih čestica u gasu se objašnjava uticajem jonizujućeg zračenja kao što su kosmički zraci i zračenje radioaktivnih elemenata iz zemlje ili okoline.

Procesi pražnjenja u gasovima mogu imati različite oblike. Da bi izvršili klasifikaciju, biće prikazan zamišljeni eksperiment u kome se prati ponašanje vazduha prilikom proticanja struje pražnjenja u vrlo širokom opsegu. Realno se mogu istraživati samo pojedini opsezi iz posmatranog intervala. Na slici 1.1 prikazana je šema koja se sastoji iz izvora jednosmernog napona koji može da se menja u širokim granicama, otpornika pomoću koga se može regulisati struja u širokom opsegu i dve elektrode izmedju kojih se nalazi vazduh. U kolu se meri struja pomoću ampermetra A i napon izmedju elektroda pomoću voltmetra V .



Slika 1.1: Šema za merenja napona i struja pražnjenja u gasovima



Slika 1.2: Električna pražnjenja u gasovima za širok dijapazon struja

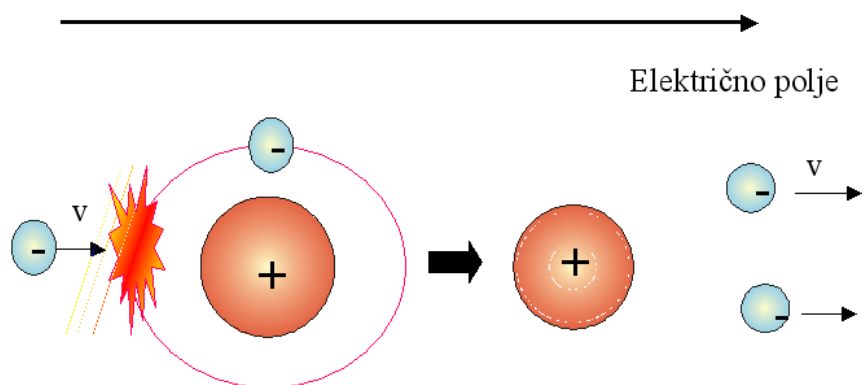
Kada se priključi jednosmerni napon, već pri vrednosti napona reda veličine jednog volta zapaža se proticanje veoma male struje kroz kolo, reda $10^{-16}A$, što je označeno tačkom *A* na dijagramu na slici 1.2.

Ukoliko se napon povećava, dolazi do blagog porasta struje, do tačke *B*. Ova pojava nastaje zato što u spoljašnjoj atmosferi postoje slobodni elektroni i pozitivna naelektrisanja, koji nastaju u vazduhu usled dejstva kosmičkih zraka, radioaktivnog zračenja iz zemlje, ultraljubičastog zračenja ili drugih uzroka koji izazivaju jonizaciju vazduha. Kada svi slobodni elektroni doputuju sa jedne elektrode na drugu, dolazi do pojave struje zasićenja (tačka *B* na dijagramu). Ukoliko se napon dalje povećava, struja zadržava konstantnu vrednost (jer nema više slobodnih elektrona koji bi svojim kretanjem omogućili proticanje struje) sve do tačke *C* kada je napon dovoljno visok da može da izazove udarnu jonizaciju u medjuelektrodnom prostoru. Zatim nastaje naglo povećavanje struje usled

udarne jonizacije, koje se mora ograničiti otpornikom R . Postepenim smanjivanjem otpora u kolu struja raste do tačke D kada dolazi do naglog pada napona na medjuelektrodnom razmaku zbog prelaska iz procesa nesamostalnog pražnjenja, za koje je potreban inicijalni elektron koji će započeti udarnu jonizaciju, u proces samostalnog pražnjenja. Pri samostalnom pražnjenju bi uklanjanjem spoljašnjeg jonizatora, odnosno inicijalnih elektrona, proces pražnjenja bio nastavljen usled dovoljne energije koju su elektroni stekli na svom putu u medjuelektrodnom razmaku. Pri samostalnom pražnjenju elektroni i pozitivni joni nastaju usled sekundarnih jonizacija koje će u daljem tekstu biti objašnjene. Kod samostalnog pražnjenja počinju da se javljaju svetlosni efekti (tačka E). Na katodi se javlja površina sa koje se emituju elektroni koja emituje svetlost svetlo plave boje. Ova površina se naziva katodnom mrljom. Sa povećanjem struje površina katodne mrlje se povećava, a gustina struje u katodnoj mrlji ostaje konstantna. Kada cela katoda postane prekrivena katodnom mrljom, dalje povećanje struje izaziva povećanje gustine struje u katodnoj mrlji, pa počinje da se javlja povećanje napona na medjuelektrodnom razmaku (tačka F). Sa daljim povećanjem struje napon između elektroda raste sve do tačke G , kada gas u prostoru u kome se pražnjenje razvija postaje toliko zagrejan, da proces termičke jonizacije postaje dominantan za održavanje procesa jonizacije. Oblast pražnjenja u gasovima od tačke G ka tački H naziva se električnim lukom.

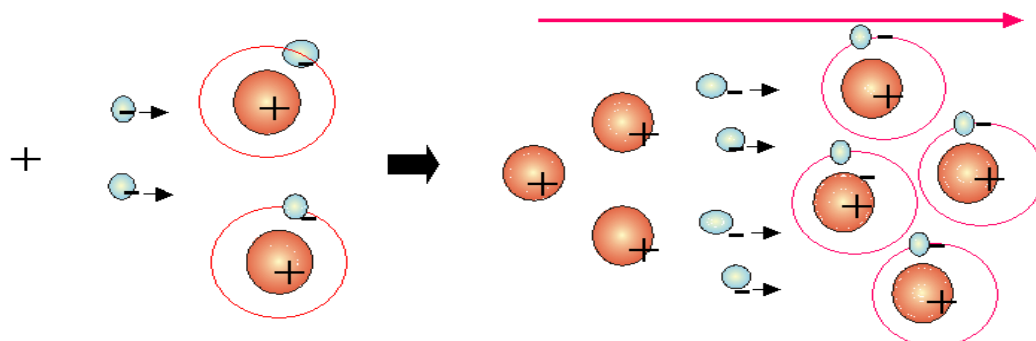
1.2.1 Udarne jonizacija u prostoru sa gasom

Kada elektron dobije dovoljnu kinetičku energiju, on može u sudaru sa neutralnim molekulom da izazove udarnu jonizaciju, prikazanu na slici 1.3.



Slika 1.3: Proces udarne jonizacije

Na slici 1.3 oznaka v je brzina elektrona. Posle jonizacije molekula nastaju dva slobodna elektrona koja se ubrzavaju. Ukoliko postignu dovoljnu kinetičku energiju oni mogu da jonizuju još dva neutralna molekula i time nastaje ukupno 4 slobodnih elektrona, čime se proces jonizacije nastavlja, kao na slici 1.4.

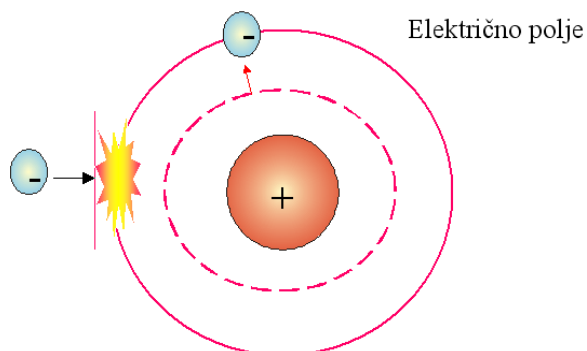


Slika 1.4: Višestruki proces udarne jonizacije koji se naziva lavina

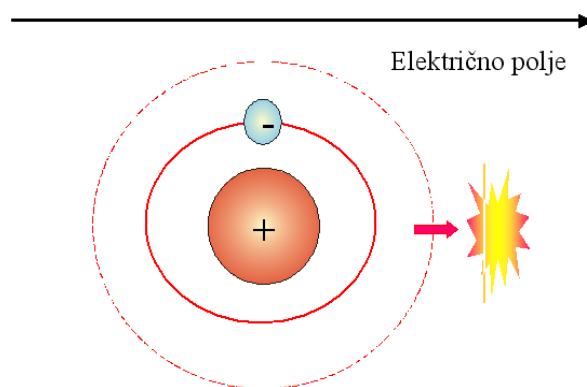
Proces uzastopnih sudara novonastalih elektrona sa neutralnim molekulima, pri čemu se broj jonizovanih čestica stalno povećava, naziva se lavinom. Ukoliko je električno polje dovoljno jako, lavina se širi od elektrode na kojoj je lavina nastala do druge elektrode. Ukoliko lavina dostigne drugu elektrodu, tada tu pojavu nazivamo razornim pražnjenjem, odnosno preskokom u gasu. Pri preskoku se između elektroda javlja naglo smanjivanje otpornosti međuelektrodnog prostora. Ukoliko je ukupan otpor kola veliki, kroz kanal razornog pražnjenja se zatvara mala struja i tada pojavu nazivamo iskrom, koja ima plavičastu boju. Ako je napon koji je izazvao iskra naizmeničan, tada će se iskra paliti i gasiti u svakoj poluperiodi napona. Svako paljenje iskre praćeno je karakterističnim pucketanjem usled ponovnog obrazovanja kanala pražnjenja, koji može da menja svoju putanju. Ukoliko je ukupna otpornost kola mala, kroz kanal pražnjenja se zatvara velika struja, koja zagreva prostor do visoke temperature i tu pojavu nazivamo električnim lukom. Električni luk ima narandžastu boju i ravnomernije gori pri delovanju naizmeničnog napona, tako da ne dolazi u svakoj poluperiodi do paljenja i gašenja luka.

Pri sudaru elektrona sa neutralnim molekulom može se desiti da umesto izbijanja elektrona iz molekula dodje do pomeranja elektrona na višu nestabilnu orbitu, odnosno viši energetski nivo. Ovaj proces naziva se pobudjivanjem (eksitacijom) molekula. Srednje vreme "života" pobudjenih molekula je oko 10^{-10} sekunda, a potom nastaje obrnut proces, kada se elektron vraća na nižu stabilnu orbitu i oslobadja se kvant energije u vidu jednog fotona, što nazivamo relaksacijom. Proces eksitacije je šematski je prikazan na slici 1.5. Na slici 1.6 šematski je prikazan proces relaksacije.

Energija jonizacije pojedinih gasova izražena u elektron-voltima (eV) data je u tabeli 1.1. Energija od 1eV odgovara povećanju kinetičke energije elektrona pri slobodnom kretanju između dve tačke sa potencijalnom razlikom od 1V.



Slika 1.5: Skica pobudjivanja pomoću ubrzanog elektrona



Slika 1.6: Skica relaksacije

1.2.2 Fotojonizacija u prostoru gasa

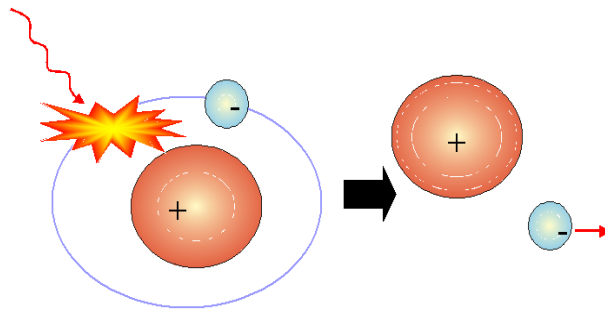
Prilikom relaksacije se oslobadja kvant energije u obliku svetlosnog zračenja. Ukoliko neutralan molekul dodje pod uticaj tog kvanta energije, može da izazove njegovo pobudjivanje ili jonizaciju, koja se naziva fotojonizacijom. Proces fotojonizacije je simbolički prikazan na slici 1.7. Posle fotojonizacije nastaje pozitivan jon i slobodan elektron, koji može da nastavi proces udarne jonizacije. Na slici 1.8 prikazan je proces relaksacije kojim se oslobadja foton, koji zatim vrši fotojonizaciju u prostoru gasa.

1.2.3 Termicka jonizacija u zapremini gasa

Termicka jonizacija nastaje pri vrlo visokim temperaturama gasa, usled čega dolazi do haotičnog kretanja molekula u gasu, koje je utoliko brže, koliko je temperatura viša. Usled velike kinetičke energije elektrona dolazi do sudara sa neutralnim molekulima i do

Gas	Energija jonizacije (eV)	Energija pobudjivanja (eV)
Vodonik H_2	15,4	11,5
Kiseonik O_2	12,5	7,9
Azot N_2	15,5	8,2-14,8
Ugljen dioksid CO_2	12,6	10

Tabela 1.1: Energija jonizacije i pobudjivanja za pojedine gasove



Slika 1.7: Skica fotojonizacije u zapremini gasa

termičke jonizacije.

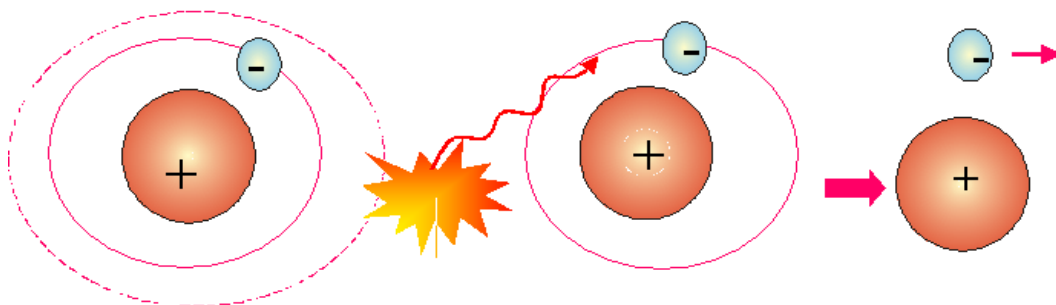
Stepen jonizacije se definiše kao broj jonizovanih čestica prema ukupnom broju čestica, odnosno:

$$m = \frac{n_j}{n} \quad (1.1)$$

gdje je:

m - stepen jonizacije,

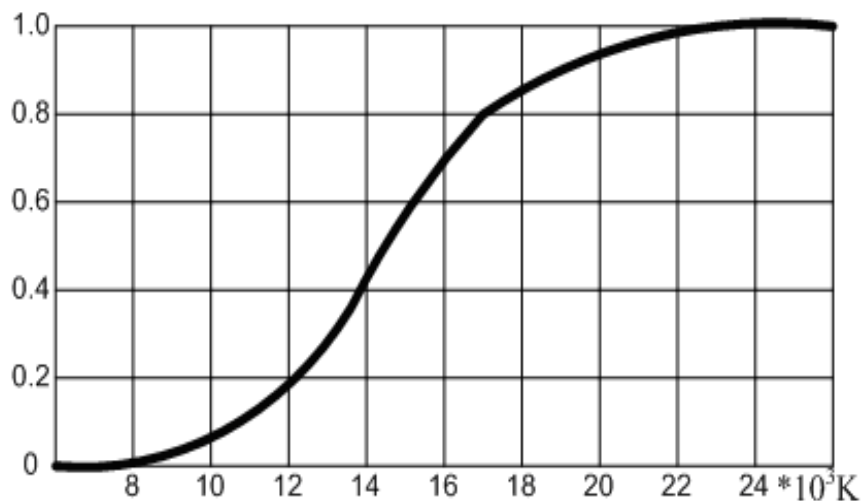
n_j - broj jonizovanih čestica,



Slika 1.8: Skica fotojonizacije u zapremini gasa koja vrši dalju udarnu jonizaciju

n - ukupan broj čestica.

Na slici 1.9 prikazan je dijagram stepena jonizacije vazduha u zavisnosti od temperature.



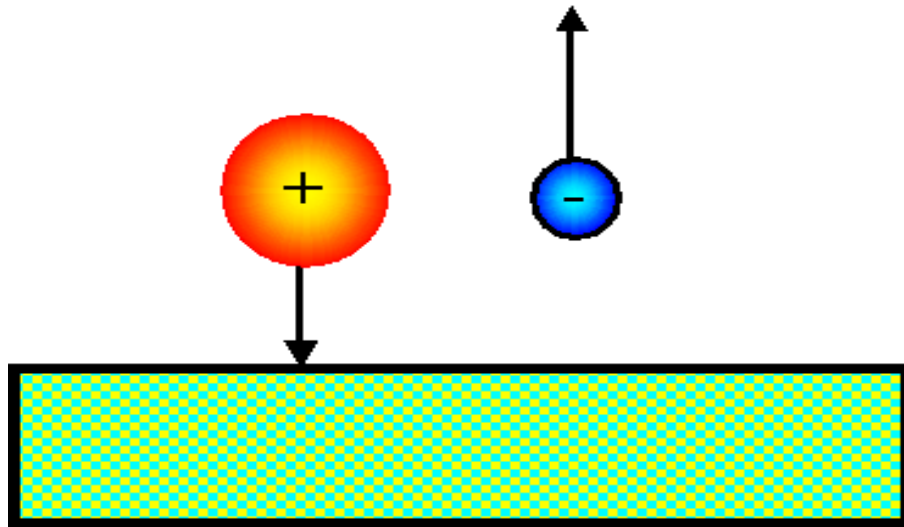
Slika 1.9: Dijagram stepena jonizacije u zavisnosti od temperature

1.2.4 Površinska jonizacija

Površinska jonizacija nastaje kada zbog različitih razloga elektroni napuštaju katodu i ubrzavaju se usled električnog polja ka anodi. Postoji nekoliko mehanizama površinske jonizacije:

Površinska udarna jonizacija

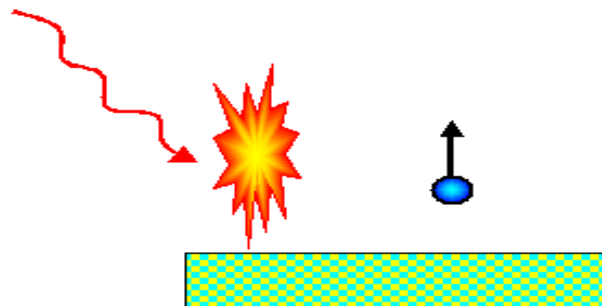
Površinska udarna jonizacija nastaje kada je katoda pogodjena pozitivnim jonima ubrzanim u električnom polju. Ukoliko ubrzani joni imaju dovoljnu kinetičku energiju, iz katode se oslobadja slobodan elektron, koji se udaljava od katode usled delovanja spoljašnjeg električnog polja i odbojnih električnih sila kao na slici 1.10.



Slika 1.10: Šematski prikaz površinske udarne jonizacije

Površinska fotojonizacija

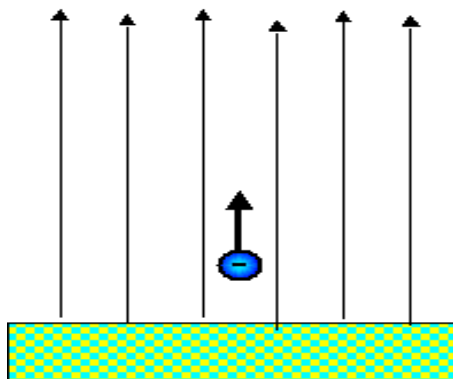
Površinska fotojonizacija nastaje kada je katoda osvetljena (izložena mlazu fotona), koji predaju svoju energiju metalnoj površini i izbijaju slobodne elektrone koji napuštaju metalnu elektrodu. Ukoliko je mlaz svetlosti jači, utoliko je veći broj elektrona koji se usled električnog polja udaljava od katode i ubrzava ka anodi. Na slici 1.11 šematski je prikazan proces površinske fotojonizacije.



Slika 1.11: Šematski prikaz površinske fotojonizacije

Autoelektronska emisija

Autoelektronska emisija nastaje kada je jačina polja u blizini katode vrlo velika, tako da usled spoljašnjeg električnog polja elektroni mogu da savladaju sile koje ih zadržavaju u katodi. Izlazni rad je minimalna energija koju zahteva elektron samo da napusti površinu katode. Izlazni rad čistih metala varira od oko 2eV do 6eV. Njegova vrednost zavisi od prirode metala, njegove čistoće i uslova površine. Na slici 1.12 šematski je prikazan proces autoelektronske emisije. Autoelektronska emisija je važna za nastanak pražnjenja u



Slika 1.12: Šematski prikaz procesa autoelektronske emisije

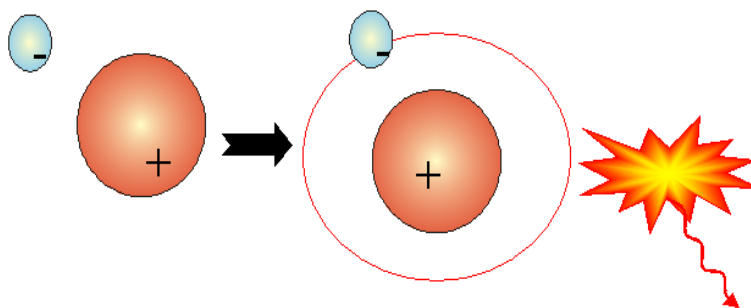
vakuumu ili u prostoru sa jako razredjenim vazduhom. Na primer, u komori vakuumskog prekidača kod koga je kvalitet vakuuma veliki (pritisak je ispod 10^{-6} Bara, jedan od mogućih načina nastanka preskoka između elektroda je autoelektronska emisija, koja može nastati jedino pri delovanju izuzetno jakih električnih polja.

Površinska termojonizacija

Površinska termojonizacija nastaje kada se metalna elektroda zagreje na dovoljnu temperaturu da elektroni u katodi steknu dovoljnu kinetičku energiju da mogu da napuste površinu katode. Na sobnoj temperaturi elektroni nemaju dovoljnu kinetičku energiju da napuste površinu katode. Ako je metalna katoda zagrejana na temperaturu od oko 1500 do 2500 K elektroni dobijaju dovoljnu energije iz veoma jakih termičkih oscilacija kristalne rešetke. Energija je dovoljno velika da elektroni mogu da savladaju potencijalnu barijeru i napuste površinu metala. Intenzitet emisija se povećava sa temperaturom katode. Ovaj tip emisije se koristio kod katodnih i elektronskih cevi.

1.2.5 Rekombinacija

Rekombinacija predstavlja proces dejonizacije u zapremini jonizovanog gasa usled sudaranja jonizovanih čestica koje dovodi do njihove neutralizacije, pri čemu se oslobadja kvant energije u vidu fotona, kao na slici 1.13. Pri tome pozitivni joni zahvataju slobodne elektrone gradeći neutralne molekule.



Slika 1.13: Šematski prikaz rekombinacije

Ukoliko slobodni elektroni imaju previše veliku energiju, tada se može znatno olakšati rekombinacija, ako se elektroni prethodno sudare sa nekom neutralnom česticom predajući joj deo svoje energije.

U slučaju kada je jonizovani prostor u uzanom procepu, slobodni elektroni velike kinetičke energije mogu deo svoje energije da predaju molekulima zida komore koji obrazuje procep, tako da u narednim sudarima sa pozitivnim jonima imaju dovoljno malu kinetičku energiju da mogu da budu zahvaćeni pozitivnim jonima i mogu formirati neutralne molekule. Brzina rekombinacije jonizovanih čestica srazmjerna je kvadratu gustine jona. Princip sabijanja jonizovanog gasa u uzane procepe koristi se kod električnih prekidača.

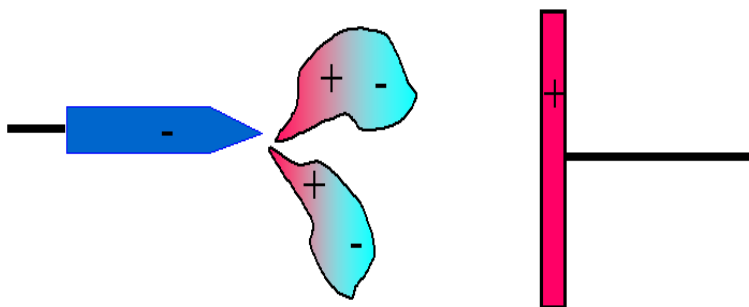
1.2.6 Sekundarne jonizacije

U slučaju kada postoji jako električno polje i javi se jaka struja kroz kanal pražnjenja, pored inicijalne udarne jonizacije događaju se udarne jonizacije nastale rekombinacijama pri kojima nastaju fotoni u zapremini gasa koji vrše fotojonizaciju. Pozitivni joni nastali udarnom jonizacijom koji bombarduju katodu izazivaju površinsku udarnu jonizaciju. Ukoliko se prostor zagreje zbog velike struje, nastaje i termička jonizacija. U svim ovim vidovima jonizacije nije potreban inicijalni elektron, pa se zato ovakve jonizacije nazivaju **sekundarnim jonizacijama**.

1.2.7 Pražnjenje u neravnomernom polju

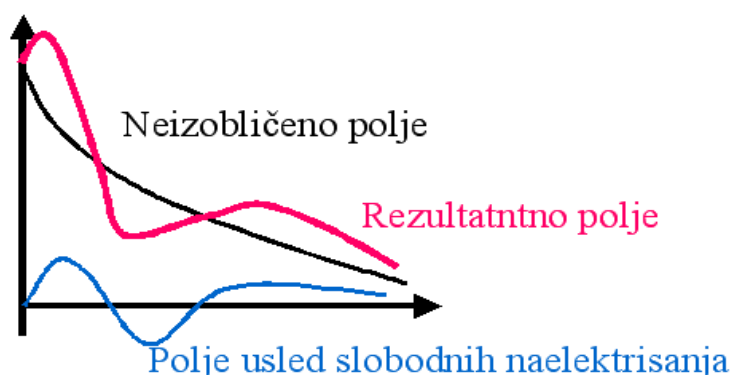
U slučaju složenih elektrodnih oblika kao što su na primer oštri šiljci, mogu se pojaviti vrlo neravnomerna polja sa izraženim lokalnim pojačanjem. U ovom slučaju radi se o električnim pražnjenjima u nehomogenom polju.

Slučaj elektrodnog sistema negativan šiljak - ploča prikazan je na slici 1.14. Između negativnog šiljka i pozitivne ploče vlada visoki napon, koji nije dovoljan da prouzrokuje preskok, ali može da izazove lokalnu jonizaciju u okolini šiljka.



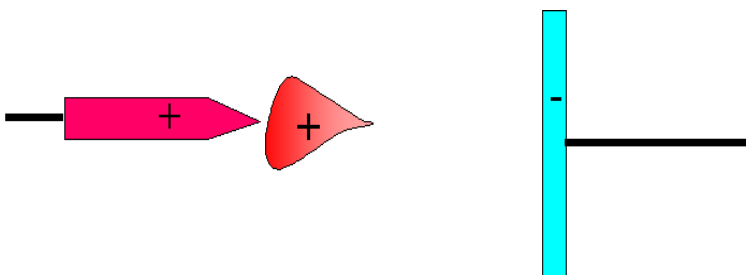
Slika 1.14: Elektrodni sistem sa negativnim šiljkom

U prostoru između elektroda javlja se neravnomerno električno polje, sa orijentacijom od katode ka anodi. Ukoliko je polje u blizini katode ispod kritičnog polja za vazduh, ono postepeno slabi od katode ka anodi i naziva se neizobličnim poljem. Usled obrazovanja lavine, stvaraju se prostorna naelektrisanja između elektroda. Pozitivni joni nastali udarnom jonizacijom, koji su zbog velike mase inertni nagomilavaju se u blizini katode u težnji da padnu na katodu i neutrališu se. Elektroni odlaze u prostor između elektroda ka anodi do granice dok je polje jače od kritičnog za jonizaciju i zadržavaju se na granici tog prostora, obrazujući elektronski oblak. Na slici 1.15 prikazana je raspodela neizobličnog polja, polja koje nastaje samo zbog prostornih oblaka naelektrisanja unutar lavina i resultantno polje. Električno polje je izuzetno nehomogeno, zbog čega je samo na jednom delu međuelektrodnog razmaka jače od kritičnog. U tom prostoru se javljaju lavine, u obliku svetlećih kanala koje nazivamo strimerima od engleske reči stream - potok. Pojava svetlućanja oko zašiljene elektrode naziva se koronom. Korona predstavlja lokalnu jonizaciju vazduha oko zašiljene elektrode zbog jakog električnog polja. Kada je šiljak negativan, korona se lakše razvija, jer ona pojačava električno polje uz šiljak zbog superpozicije polja prostornih naelektrisanja sa neizobličnim poljem. Unutar jonizovanog prostora do granice jonizacije resultantno polje je slabije od neizobličnog polja. U razmaku između granice gde prestaje jonizacija i anode resultantno polje se ponovo pojačava.



Slika 1.15: Raspodela polja u slučaju negativnog šiljka

Slučaj elektrodnog sistema je pozitivan šiljak - ploča prikazan je na slici 1.16. I u ovom slučaju između pozitivnog šiljka i negativne ploče vlada visoki napon, koji nije dovoljan da prouzrokuje preskok, ali može da izazove lokalnu jonizaciju u okolini šiljka.

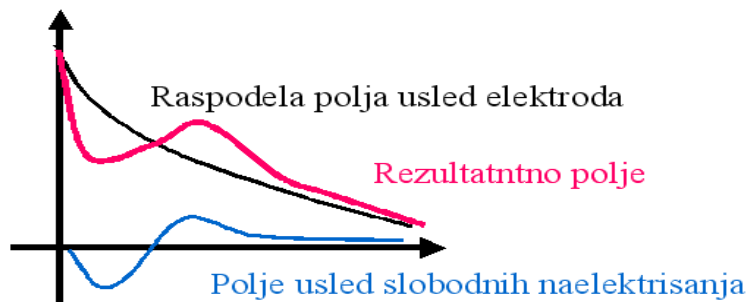


Slika 1.16: Elektrodni sistem sa pozitivnim šiljkom

U ovom slučaju se oko pozitivnog šiljka formira jonizovan oblak usled razvoja lavina. Međutim, elektroni, koji su veoma laki i pokretni, ubrzavaju se ka pozitivnom šiljku i neutrališu, a u jonizovanom prostoru ostaju samo pozitivni joni koji se pomeraju ka negativnoj ploči do granice jonizovanog prostora, kao na slici 1.16. Zbog oblaka pozitivnog naelektrisanja u medjuelektrodnom prostoru, pored neizobličenog polja pojavljuje se polje usled oblaka pozitivnih jona. Na slici 1.17 prikazana je raspodela neizobličenog polja, polja usled prostornog naelektrisanja i rezultatno polje.

Sa slike 1.17 se vidi da je uticaj pozitivnog prostornog naelektrisanja takav da smanjuje električno polje uz elektrodu, ali pojačava u medjuelektrodnom prostoru.

Upoređujući slučajeve negativnog i pozitivnog šiljka se može zaključiti da negativan šiljak olakšava pojavu korone, pa do nje dolazi pri nižem naponu, ali otežava razvoj pražnjenja u prostoru. U slučaju pozitivnog šiljka korona nastaje pri višem naponu, ali



Slika 1.17: Raspodela polja u slučaju pozitivnog šiljka

se polje u potpunom prostoru, kako jonizovanog, tako i nejonizovanog dela razmaka povećava olakšavajući preskok.

1.2.8 Uticaj pritiska na razvoj pražnjenja

Sposobnost gasa da se jonizuje je složena funkcija pritiska. Pri visokim pritiscima potreban je mnogo veći intenzitet polja da dovede do pojave udarne jonizacije. Pri veoma niskim pritiscima takodje dolazi po povećanja polja potrebnog za jonizaciju. To znači da postoji pritisak pri kome je jonizaciono polje minimalno. Ova pojava se može objasniti preko srednje dužine slobodnog puta. Na slici 1.18 prikazan je slučaj kada se povećava pritisak koji dovodi do povećanja preskočnog napona. Mora se voditi računa da na dužinu slobodnog puta utiče pored pritiska i temperatura gasa, pa se zbog toga uvodi pojam relativne gustine gasa koja je data izrazom:

$$\delta = \frac{pT_0}{p_0T} \quad (1.2)$$

gde su:

p - pritisak gasa u Barima,

p_0 - pritisak na morskoj površini 1,033 Bara,

T - apsolutna temperatura gasa u stepenima K,

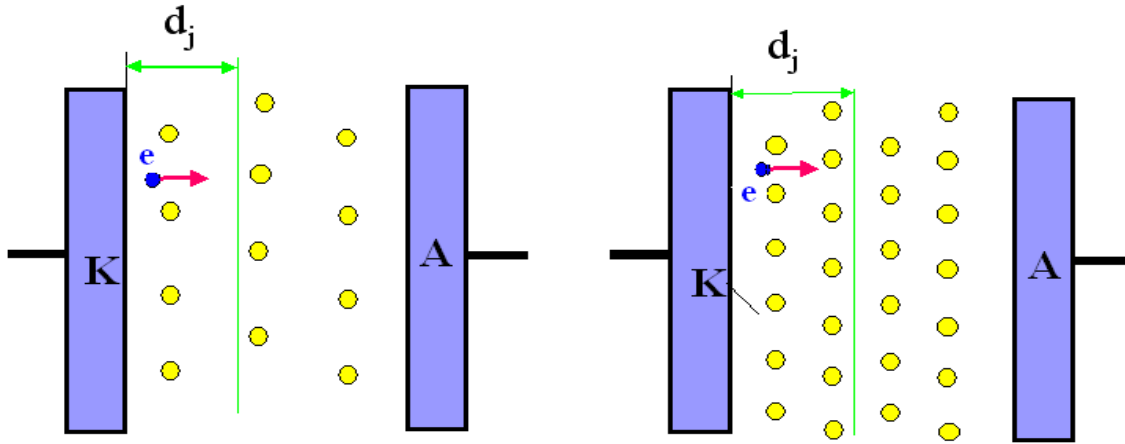
T_0 - apsolutna temperatura gasa u laboratorijskim uslovima 293 K odnosno 20°C.

Srednja dužina slobodnog puta se može izračunati za vazduh kao:

$$\bar{\lambda} = \frac{90.09}{\delta} \quad (1.3)$$

Za druge gasove numerički koeficijent u brojiocu ima druge vrednosti.

Povećanje pritiska ima obrnuto srazmerno dejstvo na visinu preskočnog napona od povećanja temperature ga



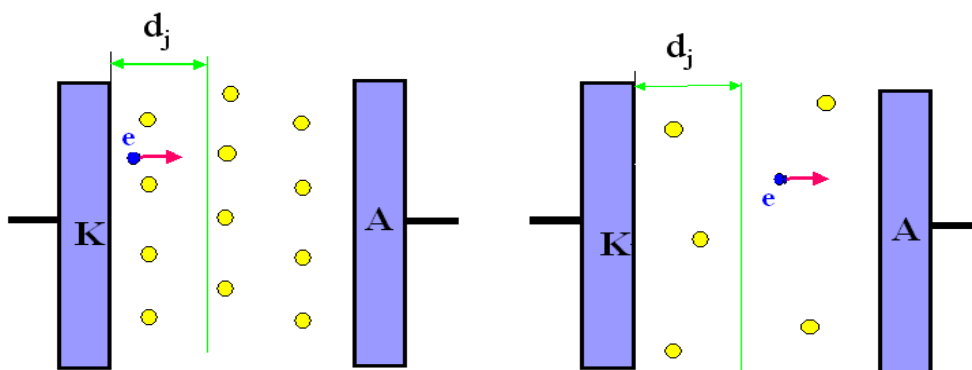
Slika 1.18: Šematski prikaz prostornog rasporeda čestica pri umerenom pritisku (levo) i visokom pritisku (desno)

Na slici 1.18 levo prikazan je slučaj kada je srednja dužina slobodnog puta elektrona $\bar{\lambda}$ kraća od rastojanja d_j potrebnog da bi pri određenom električnom polju E elektron postigao jonizacioni napon $U_j = E \times d_j$ pod pretpostavkom da je polje homogeno. To znači da će se pri delovanju električnog polja E elektron koji je bez sudara prešao rastojanje d_j postigao dovoljnu kinetičku energiju:

$$E_k = \frac{1}{2}mV^2 \quad (1.4)$$

kojom može da izvrši jonizaciju. Ako je $\bar{\lambda} > d_j$, to znači da će doći do sudara slobodnih elektrona sa molekulima koji će dovesti do jonizacije. Na slici desno prikazan je slučaj kada je pritisak gasa veći, pa je dužina slobodnog puta manja. U ovom slučaju važi odnos $\bar{\lambda} < d_j$.

U slučaju kada se između elektroda nalazi gas veoma niskog pritiska kada je dužina slobodnog puta elektrona veća od rastojanja između elektroda, elektron iako je prešao razdaljinu d_j i postigao dovoljnu energiju za jonizaciju, ako na svom putu ne nađe na neutralan molekul koga bi jonizovao, tada će on udariti u anodu, a da do udarne jonizacije u prostoru gasa ne dolazi. Ovaj slučaj prikazan je na slici 1.19.



Slika 1.19: Šematski prikaz prostornog rasporeda čestica pri umerenom pritisku (levo) i niskom pritisku (desno)

1.3 Preskočni napon u vazduhu

1.3.1 Slučajna priroda preskoka

Preskok u vazduhu između dve elektrode predstavlja slučajan proces koji zavisi od pojave inicijalnih elektrona, sudara sa neutralnim molekulima i rekombinacije u toku razvoja strimera. Od toga da li će se inicijalni elektron pojaviti zavisi da li će doći do preskoka ili ne. Sudar inicijalnog elektrona sa neutralnim molekulom može izazvati udarnu jonizaciju ako se neutralni molekul našao na dovoljno velikom rastojanju da je elektron postigao dovoljnu kinetičku energiju, u suprotnom neće doći do jonizacije. Takođe proces rekombinacije je slučajna pojava koja zavisi od kinetičke energije elektrona koji može da bude zahvaćen pozitivnim jonom i neutrališe se. Kako su svi sudari slučajni procesi, sam proces preskoka je takođe slučajan proces. Zbog toga uvodimo pojam verovatnoće nastanka preskoka. Verovatnoću preskoka je najlakše definisati u slučaju delovanja udarnog napona. Ako se primeni N naponskih udara istog oblika i amplitude U između dve elektrode na određenom rastojanju, a od toga m puta dodje do preskoka, tada je verovatnoća preskoka definisana kao:

$$P(U) = \frac{m}{N} \quad (1.5)$$

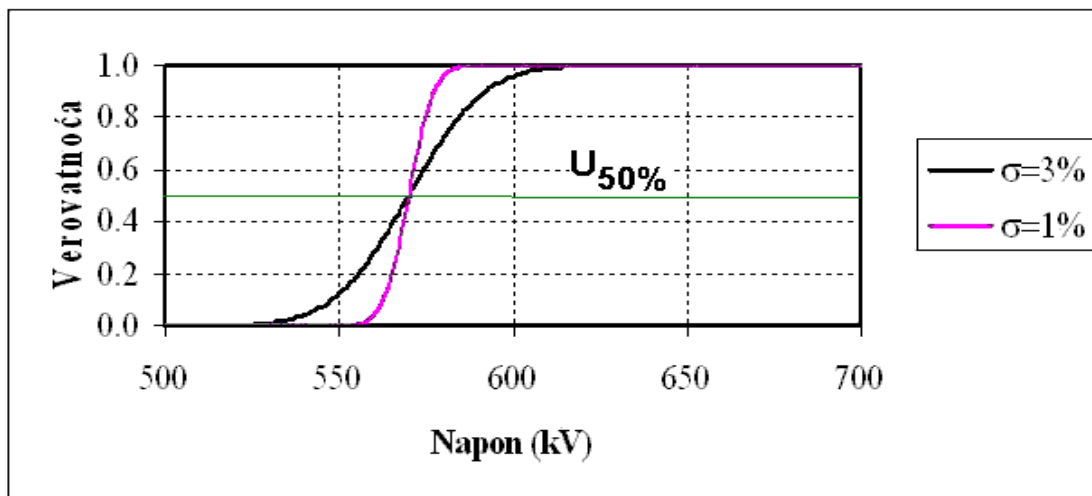
Ukoliko počnemo da vršimo eksperimenat od nekog minimalnog napona U_{min} , tada se pri tom naponu uopšte neće pojaviti preskok. Ako povećavamo amplitudu udarnog napona sa određenim korakom ΔU , tada će sa povećanjem amplitude napona U rasti i verovatnoća preskoka. Što je broj eksperimenata N pri određenom naponu U veći, kriva zavisnosti $P(U)$ od amplitude napona U će postajati sve pravilnija.

Jedna od mogućih funkcija koja opisuje zakon raspodele verovatnoće preskoka od amplitude napona je **Normalna** raspodela ili **Gausova** raspodela. Ona se može pret-

staviti funkcijom:

$$P(U) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{(u-u_{sr})^2}{2 \cdot \sigma^2}} du \quad (1.6)$$

Na slici 1.20 prikazan je grafik funkcije normalne raspodele. Oznake na slici 1.20 imaju



Slika 1.20: Grafik normalne raspodele verovatnoće preskoka kod udarnog napona

sledeće značenje:

U -temena vrednost razmatranog udarnog napona,

U_{sr} -srednja vrednost preskočnog napona,

$U_{50\%}$ -napon koji dovodi do preskoka u 50% slučajeva,

σ -srednje kvadratno odstupanje.

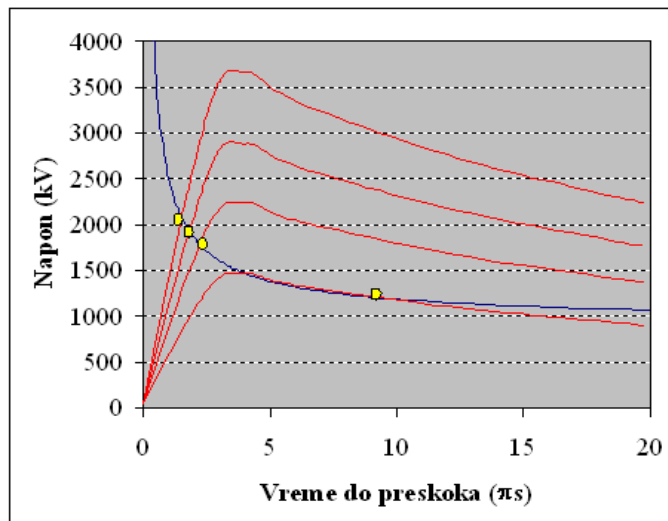
Srednje kvadratno odstupanje predstavlja meru rasipanja slučajne veličine oko očekivane vrednosti, odnosno oko U_{sr} . Kod normalne raspodele srednja vrednost preskočnog napona je jednaka 50% preskočnom naponu.

1.3.2 Volt-sekundna karakteristika preskočnog napona

Ukoliko više puta delujemo udarnim naponskim talasom identičnog oblika na određeni medjuelektrodni razmak, pri tome povećavajući amplitudu talasa, dolazi do povećanja

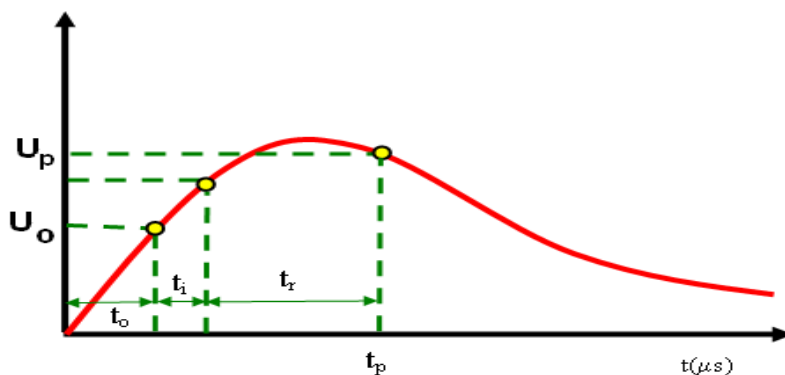
preskočnog napona. Zavisnost preskočnog napona od vremena do preskoka naziva se **Volt-sekundna** karakteristika ili **V-t** karakteristika izolacije.

Na slici 1.21 prikazana je zavisnost preskočnog napona od strmine talasa, odnosno od vremena do preskoka.



Slika 1.21: Zavisnost preskočnog napona od vremena do preskoka

Nastanak volt sekundne karakteristike preskočnog napona se može objasniti prema slici 1.22.



Slika 1.22: Zavisnost preskočnog napona od vremena do preskoka

Na slici 1.22 oznake imaju sledeće značenje:

t_o - vreme dok talas ne postigne minimalni napon U_o pri kome je preskok uopšte moguć.

Tehnički gledano, to je jednosmerni napon, odnosno konstantan napon pri kome bi u jednom trenutku nastupio preskok,

t_i -vreme potrebno da se stvori inicijalni elektron. Ukoliko se između elektroda ili na neku od elektroda postavi izvor jonizujućeg zračenja, ovo se vreme može skratiti,

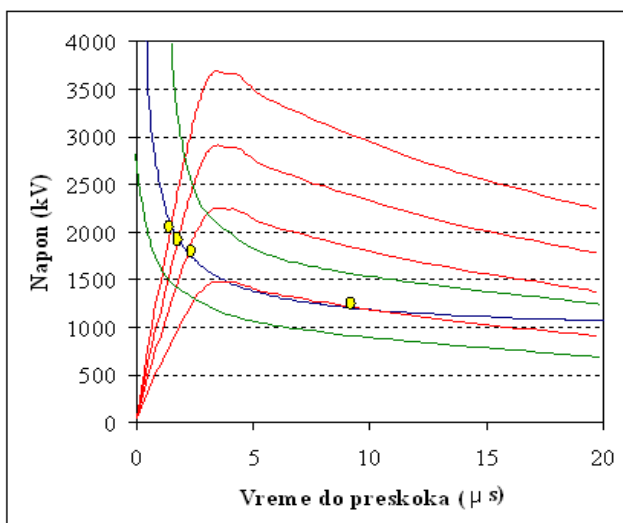
t_r -vreme razvoja pražnjenja, za koje se stvaraju lavine i strimeri u medjuelektrodnom razmaku, dok se pražnjenje ne proširi do druge elektrode,

t_p - ukupno vreme do preskoka.

Ukupno vreme do preskoka je:

$$t_p = t_o + t_i + t_r \quad (1.7)$$

Najčešće se daje volt-sekundna kriva 50% preskočnog napona. Na slici 1.23 prikazana je volt sekundna karakteristika 50% preskočnog napona, kao i gornja i donja granična kriva. Ispod donje granične krive se nalazi oblast u kojoj nikada neće doći do preskoka. Iznad gornje granične krive svaki talas izaziva preskok. U opsegu između krivih preskok nastupa sa određenom verovatnoćom.

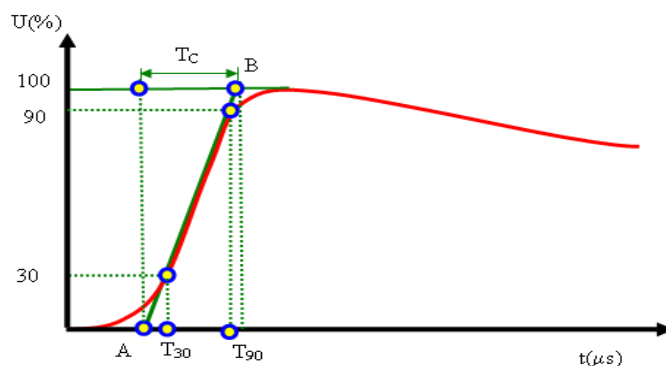


Slika 1.23: Volt sekundna karakteristika 50% preskočnog napona i gornja i donja kriva koje prikazuju granice oblasti u kojoj je preskok moguć

Kriva koja je na grafiku obeležena plavom bojom, predstavlja 50% preskočni napon. Opseg napona u kome se sa određenom verovatnoćom može pojaviti preskok ograničen je zelenim krivim linijama koje su paralelne sa krivom 50% napona. Iznad gornje zelene krive pri svakom udaru dolazi do preskoka, a ispod donje krive nikad ne dolazi do preskoka. Volt-sekundne karakteristike su od značaja samo kod udarnih napona.

1.3.3 Definicija udarnih napona

Udarni naponi koji se proizvode u laboratorijskim uslovima služe za simulaciju pojava iz prakse, kao što je pojava atmosferskih prenapona i pojava sklopnih prenapona. Da bi se izolacija ispitivala uvek pod istim uslovima, talasni oblici napona se standardizuju. U evropskim zemljama i u zemljama u kojima dominira evropski uticaj (primenjuju se evropski standardi), za ispitivanje visokonaponske izolacije se koristi atmosferski udarni napon veoma kratkog čela i dugog trajanja. Čelo i začelje se definišu prema slici 1.24



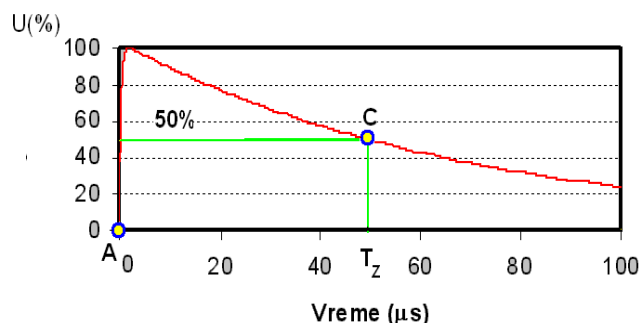
Slika 1.24: Definicija čela atmosferskog udarnog talasa

Čelo atmosferskog udarnog talasa se određuje na taj način što se provlači prava kroz tačku kada talas dostiže 30% vrednosti i 90% vrednosti amplitude. Prava seče apscisnu osu u tački *A*, a horizontalnu pravu koja prolazi kroz maksimum napona u tački *B*. Vreme od tačke *A* do projekcije tačke *B* na apscisnu osu naziva se **vreme čela**. Vreme potrebno da talas dostigne 30% od pune vrednosti obeležava se sa T_{30} , a vreme potrebno da talas dostigne 90% od pune vrednosti obeležava se sa T_{90} . Vreme čela se izračunava kao:

$$T_c = \frac{T_{90} - T_{30}}{0,6} \quad (1.8)$$

Vreme potrebno da talas na začelju opadne na polovinu vrednosti naziva se začeljem talasa. Začelje talasa se određuje postupkom prikazanim na slici 1.25.

Vreme začelje se definiše kao vreme mereno od tačke *A* u kojoj prava koja definiše čelo talasa preseca apscisnu osu i projekcije tačke *C* u kojoj talas opadne na polovinu maksimalne vrednosti. U praksi se meri vreme od koordinatnog početka do projekcije tačke *C* na apscisnu osu, jer je položaj tačke *A* neznatno pomeren u odnosu na koordinatni početak u odnosu na trajanje talasa. Tačka *A* se naziva konvencionalni koordinatni početak jer predstavlja početak talasa linearizovanog čela.



Slika 1.25: Definicija začelja atmosferskog udarnog talasa

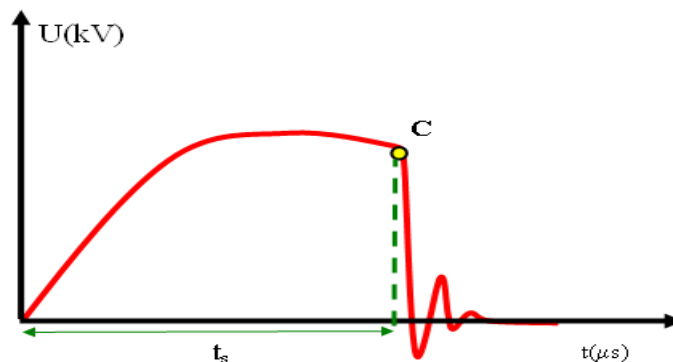
Standardni oblik udarnog talasa za ispitivanje visokonaponske izolacije na atmosferske prenapone naziva se **standardni atmosferski udarni napon** i prema evropskim standardima ima vreme čela $T_c = 1.2\mu s \pm 30\%$. Vreme začelja istog talasa je $T_z = 50\mu s \pm 20\%$. Tolerancija za čelo talasa od 30% i začelje od 20% se usvaja zbog teškoća oko realizacije talasa određenih parametara u laboratorijskim uslovima. Tolerancija za maksimum napona je 3%. Ovi talasni oblici nisu izabrani zato što najbolje reprezentuju stvarni talasi oblik atmosferskog pražnjenja, već su to dogovoreni talasni oblici unutar međunarodnih tehničkih udruženja u cilju usaglašavanja načina laboratorijskog ispitivanja u različitim zemljama. Gornji talasni oblik atmosferskog udarnog napona se obeležava kao talas 1.2/50. Američki standard definiše atmosferski udarni napon sa trajanjem čela $1\mu s$, a trajanje začelja je $50\mu s$, pa se ovakav talas obeležava sa 1/50.

Kada se vrši ispitivanje opreme u niskonaponskim instalacijama u objektima, smatra se da dolazi do izobličenja talasa zbog prostiranja, uticaja korone i kapacitivnosti različitih elemenata, pa se koristi talas čije je čelo $10\mu s$ i začelje $700\mu s$. Ovakvim talasima se ispituju zaštni uredjaji za niskonaponske energetske ili telekomunikacione instalacije.

Za ispitivanje izolacije visokonaponske opreme pored punih talasa koriste se **sečeni talasi**, koji su posledica preskoka na vazdušnoj izolaciji pre nailaska talasa na objekat koji se ispituje. Tipičan oblik standardnog talasa 1.2/50 koji je sečen na začelju prikazan je na slici 1.26.

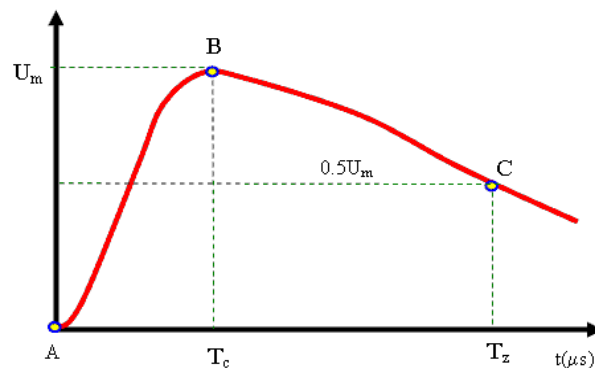
Vreme sečenja talasa definisano je standardima da se kreće od $2\mu s$ do $6\mu s$. Današnji udarni generatori omogućavaju precizno određivanje trenutka sečenja talasa.

Pored atmosferskih udarnih napona za ispitivanje visokonaponske opreme se koriste i sklopni udarni naponi. Oni su znatno sporiji i duži. Jedan od standardnih sklopnih napona je sa vremenom čela od $T_c = 250\mu s$ i vremenom začelja $T_z = 2500\mu s$. Parametri čela i začelja se određuju jednostavnije nego kod atmosferskih talasa, jer se kao vreme



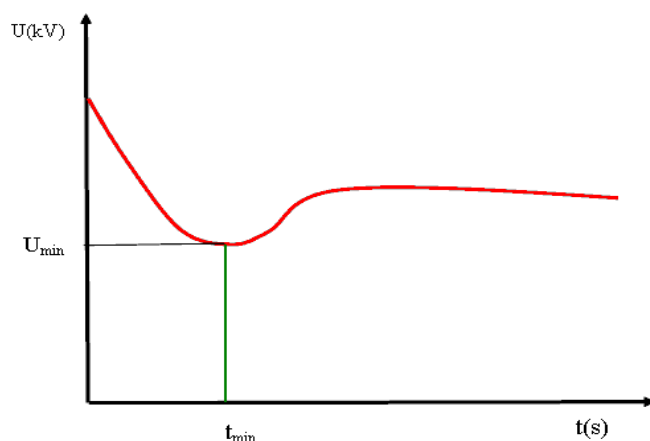
Slika 1.26: Definicija oblika sečenog atmosferskog udarnog talasa

čela definiše vreme od stvarnog početka talasa u koordinatnom početku (tačka *A* na slici 1.27) do tačke *B* kada talas dostiže temenu vrednost. Vreme začelje se definiše kao vreme od početka talasa do trenutka kada talas opadne na polovinu vrednosti na začelju (tačka *C*). Na slici 1.27 prikazan je tipičan oblik sklopnog talasa i način određivanja vremena čela i začelja.



Slika 1.27: Definicija oblika sklopnog udarnog talasa

Kada se vrši ispitivanje dugačkih međuelektrodnih razmaka u vazduhu na delovanje sklopnih prenapona (najčešće se radi o određivanju preskočnog napona između faza pri delovanju sklopnih prenapona pri nazivnim naponima vodova 400 kV ili više), pojavljuju se složene pojave koje dovode do specifičnog oblika volt-sekundnih krivih. Pri delovanju strmijih napona potreban je proces inicijalizacije i razvoja strimera kao kod atmosferskih udarnih napona. Sa smanjivanjem strmine talasa uticaj strmine talasa na razvoj preskoka se smanjuje. Međutim, još uvek postoji značajna kapacitivna struja između vrha strimera i druge elektrode, koja greje strimer koji se ponaša kao provodan kanal i olakšava njegov razvoj i prerastanje u dobro provodan kanal lidera. Sa daljim smanjivanjem strmine talasa kapacitivna struja između vrha lidera i druge elektrode opada, što otežava razvoj lidera, i dovodi do povećanja preskočnog napona, kao na slici 1.28.



Slika 1.28: Oblik volt-sekundne karakteristike pri delovanju sklopnih udarnih napona kod dugih medjuelektrodnih razmaka

Sa grafika se vidi da postoji minimalna vrednost preskočnog napona pri određenoj strmini talasa kada je vreme do preskoka t_{min} , nakon čega preskočni napon počinje ponovo da raste sa smanjivanjem strmine.

1.3.4 Uticaj atmosferskih uslova na preskočni napon

Na preskočni napon u vazduhu utiču parametri ambijenta kao što su pritisak, temperatura i vlažnost. Ranije je objašnjeno da pritisak utiče na srednju dužinu slobodog puta elektrona, ali i temperatura ima takodje uticaj. Uticaj pritiska i temperature se definiše preko srednje relativne gustine vazduha, koja je data sledećim izrazom:

$$\delta = \frac{p}{1.013} \frac{273 + 20}{273 + t} \quad (1.9)$$

gde su:

δ -relativna gustina vazduha

p -atmosferski pritisak vazduha izražen u barima

t -temperatura izražena u stepenima $^{\circ}C$

Za normalne atmosferske uslove usvojena je vrednost pritiska od $p_o = 1.013Bar$ koja vlada na nivou morske površine po lepom vremenu, a temperatura u laboratorijskim uslovima

iznosi 20°C . Ukoliko pri ispitivanju uslovi odstupaju od laboratorijskih, tada se može izračunati napon za normalne uslove na osnovu izraza:

$$U_n = \frac{U}{\delta} \quad (1.10)$$

Korekcija preskočnog napona se vrši i u odnosu na vlažnost vazduha, ali u ovom tekstu ta zavisnost neće biti analizirana.

Preskočni napon zavisi od sledećih faktora:

- -oblika primenjenog talasa napona,
- -Oblika elektroda,
- - polariteta talasa,
- -rastojanja između elektroda
- -gasa koji se nalazi između elektroda.

Oblik primenjenog napona može biti:

- -udarni napon,
- -naizmenny napona industrijske frekvencije,
- - oscilatorno prigušeni napon visoke frekvencije,
- -jednosmerni napon.

Pri primeni svakog od ovih napona preskočni napon se razlikuje pri potpuno istim svim ostalim uslovima.

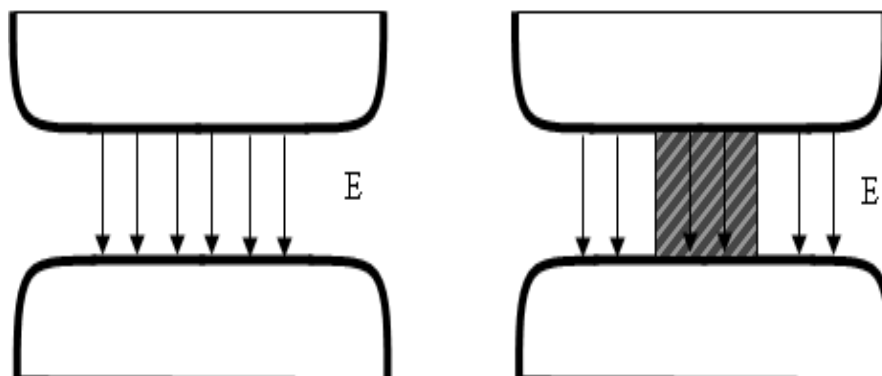
Preskočni napon u slučaju udarnih napona i jednosmernih napona zavisi od polariteta pojedinih elektroda, ako se elektrode razlikuju po obliku. Efekat je objašnjen u poglavlju o pražnjenju u neravnomernom polju.

1.4 Preskočni napon po površini čvrste izolacije

1.4.1 Fizičko tumačenje pojave

U tehnici veoma često imamo kombinaciju gasovitih i čvrstih dielektrika. To su pre svega izolatori na nadzemnim vodovima koji se izrađuju od porculana, stakla ili savremenih polimernih materijala, koji se nazivaju kompozitnim izolatorima, jer se najčešće prave od kombinacije mehanički otpornog dielektrika i dielektrika koji je otporan na atmosferske uticaje.

Posmatrajmo slučaj dve elektrode koje su tako oblikovane da se između njih formira homogeno polje, koje se povoljnim oblikovanjem ivica slabi na njihovoj periferiji, kao na slici 1.29 levo. Na istoj slici desno prikazan je isti elektrodni sistem u kome je u sredini između elektroda ubačen čvrst dielektrik.

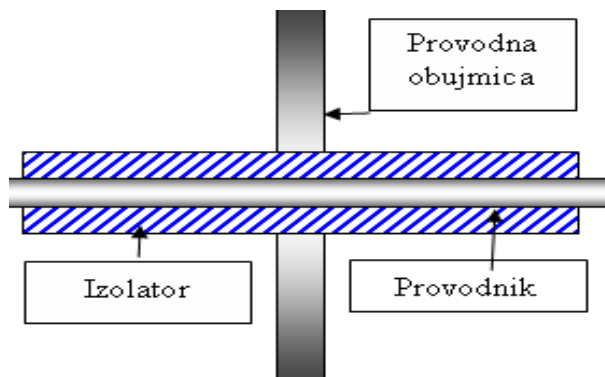


Slika 1.29: Elektrodni sistem u vazduhu (levo) i sa umetnutim čvrstim dielektrikom (desno)

Pošto čvrsti dielektrici imaju mnogo viši probojni napon nego što je preskočni napon u vazduhu, trebalo bi da elektrodni sistem desno ima viši preskočni napon jer je zapremina vazduha u kojoj može da nastupi preskok manja zbog prisustva čvrstog dielektrika boljih karakteristika. Međutim, događa se upravo suprotan efekat. Unošenje čvrstog dielektrika boljih dielektričkih karakteristika dovodi do slabljenja ukupnog dielektričkog sistema. To se objašnjava taloženjem stranih materija u vidu čestica prašine ili vlage, koje izazivaju slabljenje dielektričkih svojstava površine čvrstog dielektrika. Zbog toga jedna od važnih oblasti je proučavanje pražnjenja u gasu po površini čvrstog dielektrika.

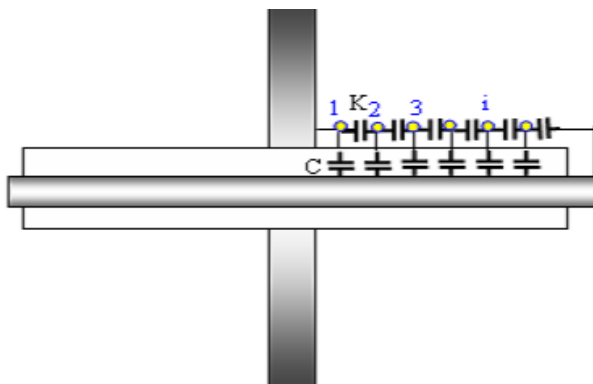
Na slici 1.30 prikazana je skica prolaznog izolatora (engl. bushing) koji se postavlja da sprovede provodnik pod naponom kroz provodni zid (primenjuje se za prolazak provod-

nika kroz metalne pregrade ćelija, zatim za prolazak provodnika unutar kućišta transformatora itd.



Slika 1.30: Skica prolaznog izolatora

Na slici 1.31 prikazana je električna zamenska šema koja se sastoji od parazitnih kapaciteta kojim se provodni izolator modeluje.



Slika 1.31: Zamenska šema prolaznog izolatora

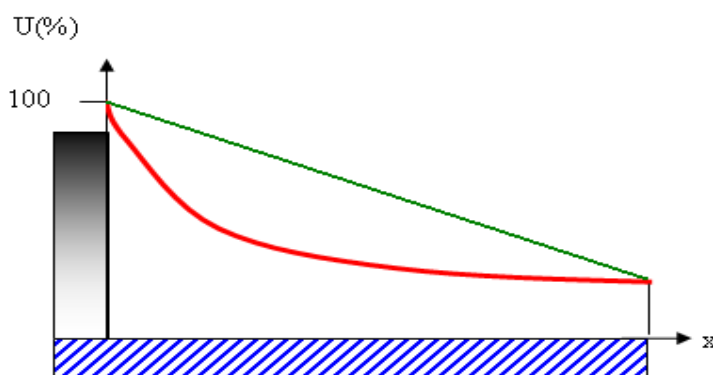
Oznake na slici 1.31 imaju sledeće značenje:

K - redni elementarni kapaciteti koji su raspoređeni po površini izolatora između metalne obujmice koja se fiksira na metalni zid i provodnika pod naponom koji prolazi kroz izolator,

C -otočni kapaciteti između površine izolatora i centralnog provodnika.

Kada bi postojali samo redni elementarni kondenzatori K , tada bi raspodela napona duž izolatora bila linearna. Međutim, otočni kondenzatori svojim uticajem prave ne-

ravnomernu raspodelu napona. Na primer, ako je prolazni izolator podvrgnut naizmeničnom naponu, tada najviši napon vlada na elementarnom kondenzatoru koji je priključen izmedju tačke 1 na slici 1.31 i centralnog provodnika. Nešto niži napon vlada na kondenzatoru priključenom izmedju tačke 2 i centralnog provodnika. Što se udaljavamo više od metalne obujmice, otočni kondenzatori trpe manji napon. Iz tog razloga je i kapacitivna struja kroz kondenzator priključen u tački 1 najveća, u tački 2 manja itd. Dijagram raspodele napona od obujmice do kraja prolaznog izolatora prikazan je na slici 1.32



Slika 1.32: Raspodela napona izmedju površine izolatora i centralnog provodnika (crvena linija) i linearna raspodela napona kada ne bi bilo otočnih kondenzatora C (zeleno linija)

Raspodela napona po dužini prolaznog izolatora usled dejstva parazitnih kapaciteta je nelinearna tako da je maksimalna jačina električnog polja uz obujmicu i postepeno slabi ka kraju izolatora. Jačina električnog polja po površini izolatora koja je u dodiru sa vazduhom srazmerna je nagibu krive napona izmedju površine izolatora i centralnog provodnika. Ako posmatramo napon na koji vlada izmedju površine izolatora i centralnog provodnika, tada se može videti da razlika tog napona u dve susedne tačke na površini izolatora definiše električno polje koje vlada na površini izolatora u vazduhu. Ukoliko jačina električnog polja prevaziđe kritičnu vrednost za vazduh, na tom mestu dolazi do jonizacije po površini izolatora. Ovaj proces naziva se puzajućim pražnjenjem i prikazan je na slici 1.33.

Kroz jonizovani kanal protiče struja konduktivnim putem kroz jonizovani kanal sve do mesta gde električno polje postaje manje od minimalnog za jonizaciju. Struja se zatvara izmedju kanala pražnjenja po površini dielektrika i centralnog provodnika kapacitivnim putem preko kondenzatora koji su prikazani na slici 1.33.

Kod izolatora za spoljašnju montažu primenjuju se rebra koja omogućavaju da se puzajuće pražnjenje udaljava od centralnog provodnika sa napredovanjem od mesta inicijalizacije. Što je više površina izolatora udaljena od unutrašnjeg provodnika, manja

je kapacitivnost izmedju površine izolatora i središnjeg provodnika i sa napredovanjem pužajućeg pražnjenja smanjuje se njegova struja. To je simbolički prikazano na slici 1.34.

U slučaju kada se izolatori koriste na otvorenom prostoru dolazi do atmosferskih uticaja koji dovode do taloženja nečistoća po površini izolatora. U pogledu uzroka zagađjenja vrši se sledeća podela:

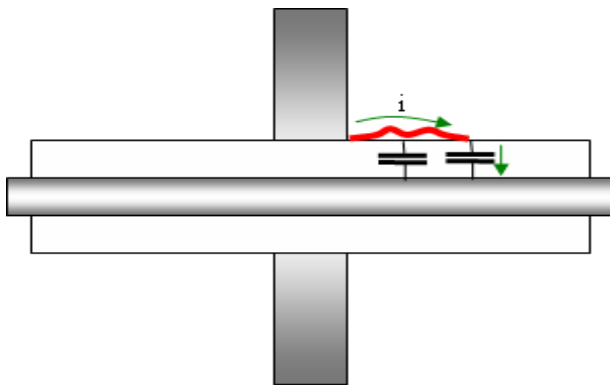
- industrijsko zagađjenje (najčešće elektroliti),
- zagađjenje u poloprivrednim područjima usled hemijskog tretmana biljaka i zemljišta,
- u primorskim krajevima posolica usled jakih vetrova sa mora koji donose mikroskopske kapljice morske vode koje isparavaju, a so se taloži po izolatorima,
- magla, rosa, slana i slaba kiša.

Najopasnija kombinacija je kada postoji zagađjenje na izolatoru u obliku suvog sloja koji se pod dejstvom vlage vlaži i postaje provodan. Na slici 1.35 prikazan je izolator bez rebara sa vlažnim slojem kroz koji protiče mala struja. Pod uticajem struje vlažan sloj se zagreva i na nekom mestu može doći do isparavanja vlažnog sloja i uspostavljanja suve površine. U tom slučaju struja se zatvara kroz vazduh, što se naziva parcijalni preskok.

Ako se obeleži otpornost stranog sloja po jedinici dužine sa R_S , a kanala pražnjenja po jedinici dužine sa R_P , tada je uslov da se pri nastanku parcijalnog preskoka poveća struja:

$$R_S > R_P \quad (1.11)$$

Ako je otpornost kanala parcijalnog preskoka manja od otpornosti vlažnog sloja pre preskoka na istom rastojanju, struja kroz kanal preskoka će se povećati. To dovodi do



Slika 1.33: Pužajuće pražnjenje po površini prolaznog izolatora

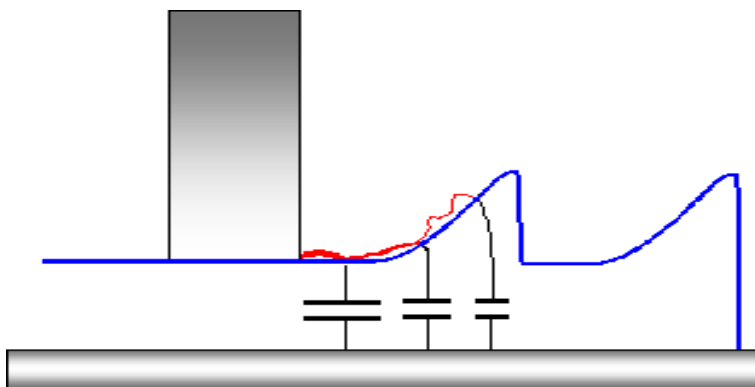
daljeg isušivanja vlažnog sloja, produženju kanala parcijalnog preskoka ili nastanku novih parcijalnih preskoka i daljem povećanju struje. Ukoliko se parcijalni preskok proširi duž cele dužine izolatora, nastaje potpuni preskok na izolatoru, što izaziva kratak spoj sa velikom strujom od nekoliko kA koju isključuje prekidač.

Ukoliko bi otpornost kanala parcijalnog preskoka bila veća od otpornosti vlažnog sloja na tom mestu, struja bi se smanjivala i parcijalni preskok bi se gasio. To znači da su veoma opasni slučajevi kada vlažan sloj ima veliku otpornost. U praksi se ovakvi slučajevi pojavljuju u ranim jutarnjim satima kada dolazi do slabog vlaženja sloja zagađenja usled magle ili rose. Mnogo je manje kritičan slučaj kiše, jer je tada uvlaženje sloja veliko, što izaziva povećanje gubitaka, ali ne postoji opasnost od prekida pogona zbog zagađene izolacije. Osim toga, u nekim slučajevima kiša spira sloj zagađenja.

1.4.2 Izolatori za zagađena područja

Da bi se povećala pouzdanost rada izolacije na otvorenom u zagađenim uslovima, primenjuju se dve vrste mera:

- korektivne mere
- preventivne mere



Slika 1.34: Puzajuće pražnjenje po površini prolaznog izolatora sa rebrima

Korektivne mere

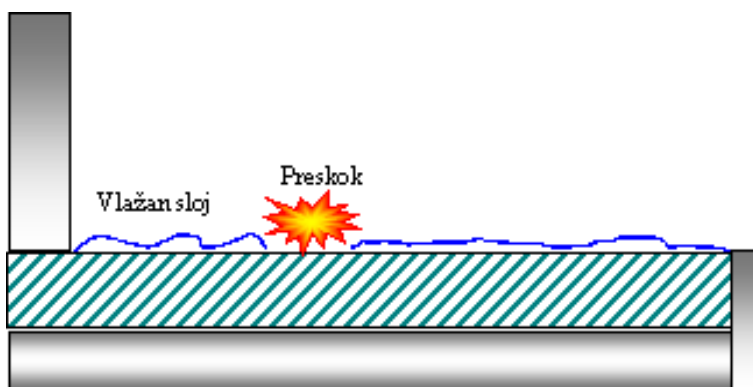
Korektivne mere se primenjuju kod izolatora koji su u pogonu i ne mogu da se promene. U tu svrhu se najčešće primenjuju sledeće metode:

- pranje izolatora u beznaponskom stanju
- pranje izolatora pod naponom
- primena silikonskih pasti

Pranje izolatora u beznaponskom stanju predstavlja metodu sa najtežim posledicama, jer zahteva isključenje nadzemnog voda ili dela postrojenja i dovodjenje u beznaponsko stanje da bi bezbedno izvršili pranje izolatora. Ukoliko je područje sa visokim stepenom zagađivanja, ovakav postupak je ekonomski neprihvatljiv.

Pranje izolatora pod naponom predstavlja složen tehnološki postupak koji se kod nas u visokonaponskim mrežama nije nikada primenjivao. Jedna od mogućnosti je primena vodenih topova sa zemlje sa isprekidanim mlazom koji onemogućava zatvaranje strujnog kola kroz mlaz. Druge mogućnosti su vezane za tehniku rada pod naponom, koja se u svetu primenjuje uz složene bezbednosne procedure i primenu različitih tehnologija.

U našoj zemlji je najviše bila korišćena primena silikonskih pasti, koje imaju osobinu odbijanja vlage (hidrofobnost), što onemogućava nastanak provodnih staza, već se javljaju samo provodna ostrva. Glavna mana ove metode je što se posle nekog vremena sloj silikonske paste toliko zasiti nečistoćama da gubi svojstva. Tada se mora primeniti čišćenje u beznaponskom stanju. Krajnji efekat primene silikonskih pasti u jako zagađenim područjima je produženje intervala između dva čišćenja.

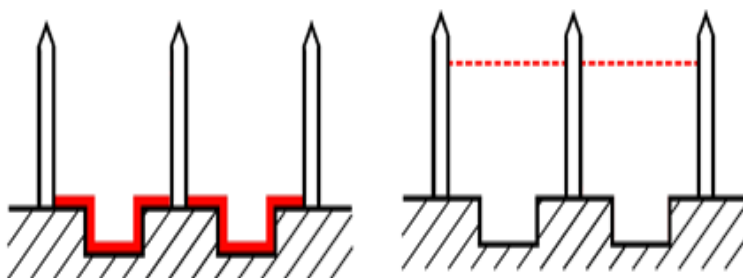


Slika 1.35: Izolator bez rebara sa vlažnim slojem i nastanak parcijalnog preskoka

Preventivne mere

Preventivne mere se svode na konstruisanje izolatora koji su manje osetljivi na površinsko zagadjenje iz atmosfere.

Osnovna konstruktivna mera koja se koristi za smanjenje osetljivosti izolatora na atmosfersko zagadjenje je produženje puzne staze (strujne staze) izolatora. Na slici 1.36 definisan je pojam strujne staze i preskočnog rastojanja.



Slika 1.36: Definicija dužine puzne staze (levo) i preskočnog rastojanja (desno)

Pod strujnom stazom se podrazumeva dužina merena po površini izolatora između metalnih krajeva koji su na različitim potencijalima. Na slici 1.37 prikazan je primer strujne staze kapastog izolatora koji je u lancu od tri članka, kao i primer preskočnog rastojanja.

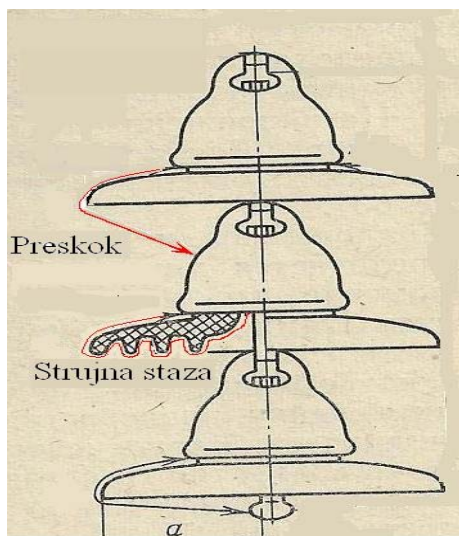
Jedna od najefikasnijih mera za poboljšanje karakteristika izolatora u zagadjenim uslovima je produženje strujne staze. Produženje strujne staze se može postići povećanjem broja rebara, kao na slici 1.38 kod prolaznog izolatora.

Povećanje puzne staze se može postići povećanje dužine rebara, odnosno produbljivanjem žljebova između rebara, kao na slici 1.39

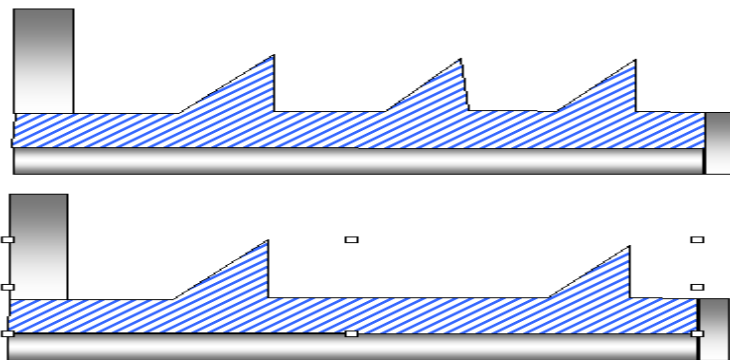
Izolatori sa produženom puznom stazom nazivaju se "antifog" izolatori zbog toga što u uslovima magle otežavaju nastanak preskoka.

Kod štapnih izolatora se može povećati nagib rebara čime se olakšava samočišćenje izolatora usled kiše, kao na slici 1.40.

Najveći tehnološki napredak u izradi izolacije za nadzemne vodove i visokonaponske aparate na otvorenom prostoru je u primeni novih materijala. Danas se koriste takozvani



Slika 1.37: Definicija dužine puzne staze (levo) i preskočnog rastojanja(desno)



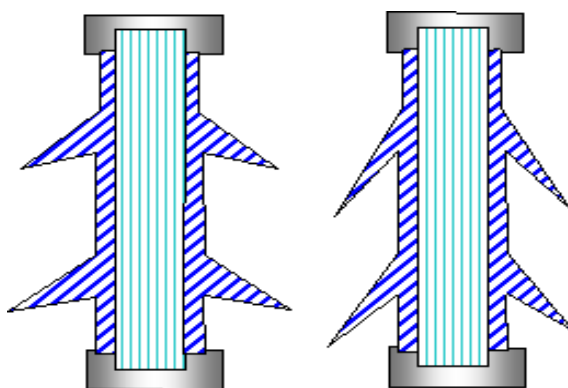
Slika 1.38: Povećanje broja rebara

kompozitni izolatori, čija se unutrašnjost izradjuje od materijala koji su mehanički čvrsti na kidanje i lomljenje, a spoljašna površina se pravi od materijala koje odlikuje hidrofobnost i otpornost na atmosferske uticaje. Najčešće se unutrašnji izolacioni štap pravi od fiberglasa, odnosno staklenih vlakana, sa izuzetno dobrim izolacionim i mehaničkim karakteristikama. Na slici 1.40 prikazan je presek štapnog izolatora sa unutrašnjim delom od mehanički čvrstog materijala, a spoljašnja izolacija sa rebrima je od silikonske gume. Glavne prednosti kompozitnih izolatora u odnosu na klasične porculanske i staklene su sledeće:

- otporniji su na atmosferske uticaje,
- lakši su od klasičnih,



Slika 1.39: Stakleni kapasti izolatori sa različitom dužinom puzne staze



Slika 1.40: Povećanje nagiba rebara radi samočišćenja

- otporni su na mehaničke udarce,
- imaju nižu cenu od klasičnih.

Na slici 1.41 prikazana je fotografija silikonskog izolatora prilikom ispitivanja.

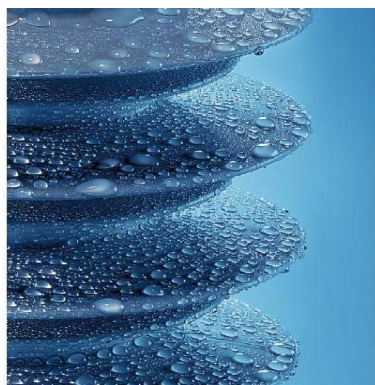
Na slici 1.42 prikazana je površina silikonskog izolatora pri kiši, sa jasno izraženim razdvajanjima kapljica usled hidrofobnosti.

Danas se za nadzemne vodove još uvek koriste i klasični izolatori, a kod primene kućišta odvodnika prenapona, dominantno se primenjuju kućišta od silikonske gume. Kompozitni izolatori za vodove se prave isključivo kao štapni. U početku primene kompozitnih izolatora bilo je određjenih dilema, ali je danas dokazano da kompozitni izolatori sa spoljašnom površinom od silikonske gume zadovoljavaju sve zahteve koji se pred izolatore za spoljašnju montažu postavljaju:



Slika 1.41: Fotografija silikonskog izolatora

- otporni su na ultravioletno zračenje,
- otporni su na električni luk,
- nezapaljivi,
- nisu utvrđeni efekti starenja materijala,
- otporni su na hemijske uticaje iz atmosfere.



Slika 1.42: Fotografija silikonskog izolatora koji je izložen kiši

Poglavlje 2

Tečni dielektrici

Osim što izoluju delove pod naponom, tečni dielektrici imaju ulogu rashladnog sredstva, zbog odvodjenja toplote nastale usled strujnog opterećenja (npr. kod transformatora) ili kao sredstvo za gašenje luka u sklopnim uređajima. Najčešće primjenjivani tečni dielektrici u oblasti tehnike visokog napona mogu se prema prirodo dobijanja podeliti na sledeće grupe:

- mineralni ugljovodonici odnosno mineralna ulja (transformatorsko, kablovsko i kondenzatorsko) koji nastaju kao produkt destilacije nafte ili kamenog uglja,
- hlorovani ugljovodonici (trihlordifenil, pentahlordifenil i dr.),
- biljni ugljovodonici (ricinusovo ulje) koji imaju ograničenu primjenu u visokonaponskim aparatima,
- organska jedinjenja silicijuma i druge tečnosti hemijske sinteze.

Najvažniji tečni dielektrik jeste mineralno ulje. Ono ima visoku probojnu čvrstoću, dobru toplotnu provodljivost, nisku temperaturu prelaska u čvrsto stanje (-50°C) i hemijsku postojanost, što ga čini posebno pogodnim kao izolaciono sredstvo. Nedostatak mineralnog ulja jeste zapaljivost, kao i mogućnost stvaranja eksplozivnih gasova (metan, propan, vodonik koji u dodiru sa kiseonikom pravi praskavi gas).

Zbog nedostataka mineralnih ulja sintetizovani su veštački tečni dielektrici: hlorisani, silikonski i fluorni tečni izolacioni materijali. Hlorisani ugljovodonici dobijaju se od različitih ugljovodonika zamenom atoma vodonika sa atomom hlora. Hlorisani dielektrici imaju različite proizvodjačke nazive: sovol, heksol, piranol, inertin, piralen. Manje

su zapaljivi od mineralnog ulja, ali veoma toksični. Koristili su se za kondenzatore i transformatore. Danas je njihova upotreba zabranjena zbog toksičnosti. Silikonski tečni dielektrici se odlikuju malim dielektričnim gubicima, malom higroskopnošću i visokom dozvoljenom radnom temperaturom (do 200°C). U sastavu njihovih molekula je atom silicijuma. Upotrebljavaju se za impregniranje i zalivanje uređaja koji rade na povišenim temperaturama. Visoka cena ograničava njihovu primenu. Fluorni tečni dielektrici nastaju spajanjem fluora sa organskim jedinjenjima. Imaju male dielektrične gubitke, malu higroskopnost i visoku toplotnu stabilnost (do 300°C). Nezapaljivi su, a termička provodnost im je znatno veća od mineralnih ulja i silikonskih tečnih dielektrika. Upotrebljavaju se za zalivanje uređaja na visokim temperaturama. Široku primenu ograničava visoka cena.

Biljna ulja kao što je ricinusovo ulje koristi se za impregnisanje nekih vrsta papira (dielektrici kondenzatora) i kao sastavni deo nekih izolacionih voskova i lakova. Sušena ulja nakon odredjenog vremena prelaze iz tečnog u čvrsto stanje. Sušena ulja su sastavni deo sintetičkih lakova.

Osnovne električne karakteristike tečnih dielektrika su:

- specifična provodnost,
- dielektrična konstanta,
- dielektrični gubici
- dielektrična čvrstoća.

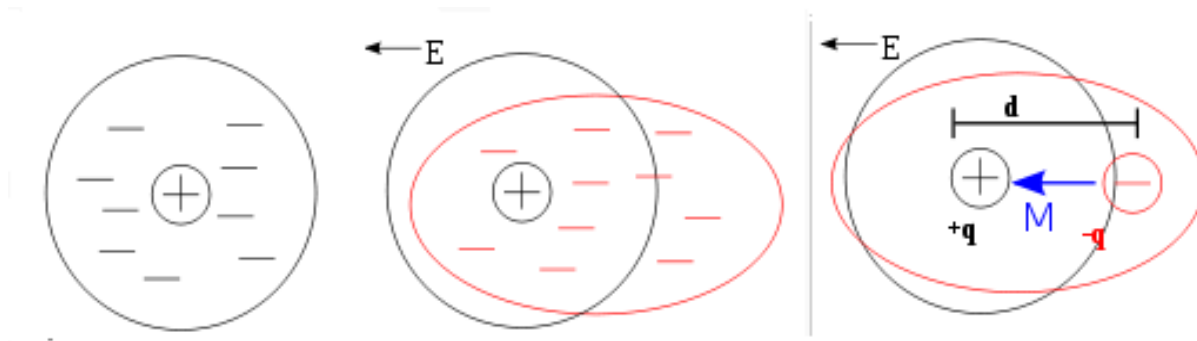
Ove karakteristike u većoj ili manjoj meri zavise od čistoće, odnosno stranih primesa u datom tečnom dielektriku.

2.1 Polarnost dielektrika

Jedna od važnih karakteristika tečnih i čvrstih dielektrika je njegova polarnost. Polarnost molekula se može najjednostavnije definisati kao prostorni pomeraj težišta (centra) pozitivnog i negativnog naelektrisanja u molekulu. Pri uticaju spoljašnjeg električnog polja dolazi do povećanja rastojanja centara naelektrisanja molekula, što se naziva polarizacija. Ova pojava je manje ili više izražena kod različitih materijala. U osnovi do polarizacije molekula pri dejstvu električnog polja dolazi na tri različita načina.

Elektronska polarizacija ili atomska polarizacija

U slučaju elektronske polarizacije posmatramo atom kod koga se pozitivno naelektrisanje jezgro može simulirati pozitivnim naelektrisanjem u jednom centru. Negativno naelektrisan oblač elektrona po svim putanjama može se modelovati tačkastim naelektrisanjem takodje u jednom centru. U slučaju kada je atom neutralan i bez prisustva električnog polja centri pozitivnog i negativnog naelektrisanja se poklapaju. U prisustvu spoljašnjeg električnog polja dolazi do razdvajanja centara naelektrisanja i stvara se električni dipol. Ova pojava naziva se elektronskom ili atomskom polarizacijom i prikazana je na slici 2.1



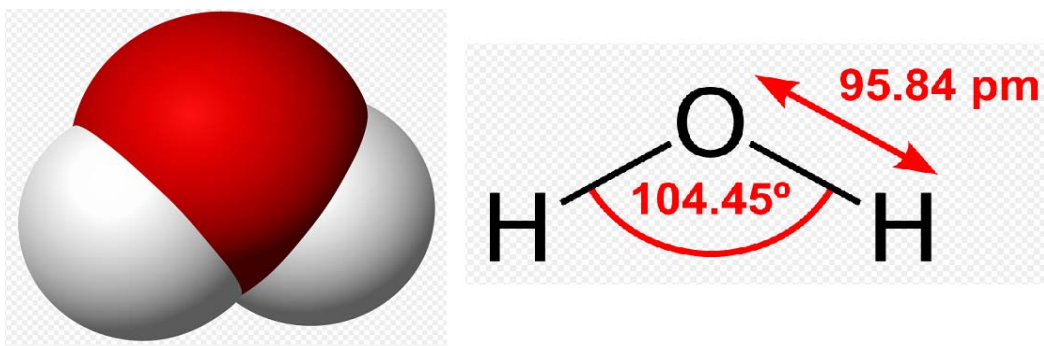
Slika 2.1: Šematski prikaz elektronske polarizacije dielektrika

Nakon nestanka spoljašnjeg električnog polja centri naelektrisanja se vraćaju u početno stanje kada se poklapaju. Zbog toga se ovaj proces naziva elastičnim i rad koji se utroši na razdvajanje centara naelektrisanja se vraća nazad. Vreme povratka u početno stanje je izuzetno kratko, reda $10^{-14}s$. Elektronska polarizacija i relaksacija se događaju bez gubitka energije.

Jonska polarizacija

Jonska polarizacija nastaje kod jona kod kojih već postoji pomeraj centara pozitivnog i negativnog naelektrisanja zbog toga što sami atomi koji grade jon imaju ukupno naelektrisanje različitog znaka, koje se unutar molekula neutrališe. Na slici 2.2 prikazan je model molekula vode i njegova prostorna struktura. Može se uočiti da su atomi vodonika asimetrično postavljeni u odnosu na atom kiseonika, pod uglom od $104,45^\circ$. Razmak između atoma vodonika i kiseonika je $95,84 \times 10^{-12}m$. Pri tome se vodonik ponaša kao negativan, a kiseonik kao pozitivan centar naelektrisanja.

Na slici 2.3 šematski je prikazan proces razmicanja centara naelektrisanja unutar dipola koji čini molekul sa razmaknutim centrima naelektrisanja. Sa slike 2.3 se može

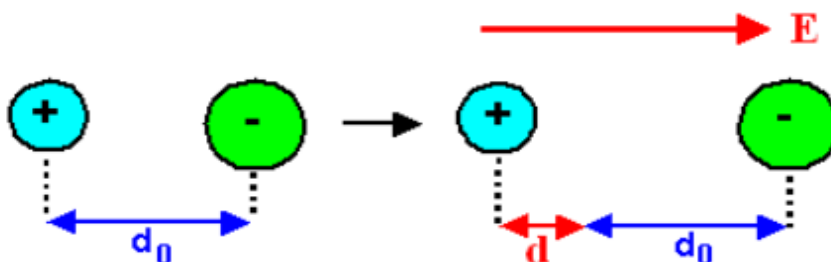


Slika 2.2: Šematski prikaz molekula vode i njegova prostorna struktura

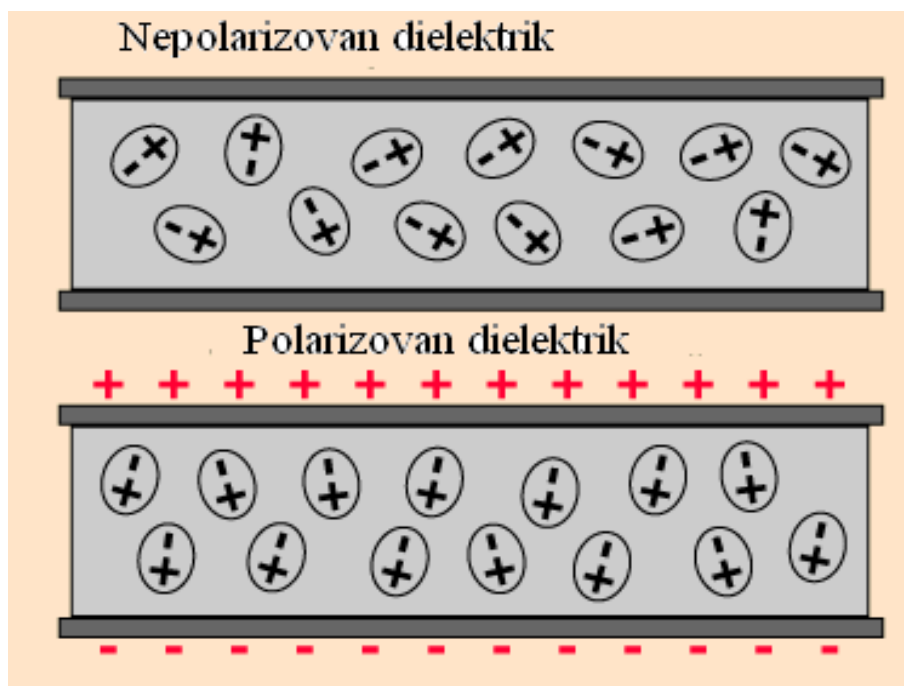
uočiti da pri delovanju električnog polja dolazi do dodatnog pomeranja centara naelektrisanja dipola sa vrednosti d_0 bez prisustva polja na vrednost $d_0 + d$ u prisustvu polja. Jonska polarizacija spada takodje u elastičan proces jer se nakon prestanka dejstva električnog polja centri naelektrisanja vraćaju u početni položaj. Vreme relaksacije kod jonske polarizacije je nešto duže nego kod elektronske. Jonska polarizacija i relaksacija se događaju bez gubitka energije.

Dipolna polarizacija

Posmatrajmo jedan dielektrik od polarnih molekula. Dipoli unutar dielektrika su u normalnom stanju bez spoljašnjeg električnog polja haotično raspoređeni. Pri delovanju električnog polja dolazi do orijentacije molekula, kao na slici 2.4. Posle prestanka dejstva električnog polja dipoli se ne vraćaju u predhodno stanje. Pri svakoj promeni intenziteta ili smera električnog polja vrši se rad koji se bezpovratno troši u toplotu. Zbog toga je ovaj proces neelastičan i izaziva gubitke u dielektriku. Vreme potrebno za uspostavljanje orijentacije molekula je duže nego kod predhodna dva slučaja i zavisi od vrste dielektrika i



Slika 2.3: Šematski prikaz jonske polarizacije u prisustvu električnog polja



Slika 2.4: Šematski prikaz dipolne polarizacije u prisustvu električnog polja

njegove temperature. U slučaju delovanja naizmeničnog električnog polja visoke frekvencije, gubici rastu sa porastom frekvencije zbog većeg broja promene orijentacije molekula u jedinici vremena. Međutim, ako frekvencija predje neku gornju graničnu vrednost, dipoli ne mogu da prate promenu polja i ne dolazi do njihove orijentacije. Zbog toga se može uočiti da kod pojedinih dielektrika sa porastom frekvencije iznad neke granične vrednosti dolazi do smanjivanja gubitaka.

2.1.1 Električna provodnost tečnih dielektrika

Specifična provodnost dielektrika zavisi od njegove čistoće. Dobro očišćeni dielektrici imaju specifičnu provodljivost 10^{-10} do $10^{-20} \Omega/m$. Provodnost tečnih dielektrika može imati jonski ili elektronski karakter. Sa povećanjem temperature tečnog dielektrika raste i njegova provodljivost. Nakon što je predjena kritična jačina električnog polja dolazi do udarne jonizacije elektronima. Dielektrici kod kojih su glavni nosioci naelektrisanja joni zovu se dielektrici sa jonskom provodnošću, dok kod dielektrika kod kojih su glavni nosioci naelektrisanja elektroni koji nastaju u tečnosti su sa elektronskom provodnošću. Svaka tečnost na bilo kom stepenu disocijacije sadrži određenu količinu jona u jedinici zapremine. Stepenu disocijacije tj. odnos broja disociranih molekula n_d prema ukupnom broju molekula n u jedinici zapremine zavisi od dielektrične konstante tečnosti. Polar-

izovane tečnosti uvek disociraju mnogo jače. Tako na primer za transformatorsko ulje stepen disocijacije iznosi $\frac{n_d}{n} = 10^{-11}$, a za ricinusovo ulje $\frac{n_d}{n} = 10^{-8}$.

Pri odsustvu spoljašnjeg električnog polja joni i molekuli u tečnosti kreću se haotično. Pri malim jačinama električnog polja pokretljivost pozitivnih i negativnih jona u tečnosti je veoma mala, reda $10^{-5} \frac{m^2}{Vs}$, te specifična provodnost ima jonski karakter. Specifična provodnost nepolarizovanih tečnih dielektrika koji su pažljivo očišćeni može dostići $10^{-20} \Omega m^{-1}$. Slabo polarizovani tečni dielektrici imaju specifičnu provodnost do reda $10^{-11} (\Omega m)^{-1}$, a kod jako polarizovane tečnosti koja ima primese provodnost može dostići i $10^{-8} (\Omega m)^{-1}$, te je njihova primena kao izolacije neadekvatna. Sa porastom temperature raste i provodljivost tečnih dielektrika, pa se ta zavisnost može izraziti sledećim odnosom:

$$\gamma = \gamma_o e^{\alpha(\vartheta - \vartheta_0)} \quad (2.1)$$

gdje su:

γ_o specifična provodnost na temperaturi ϑ_0 ,

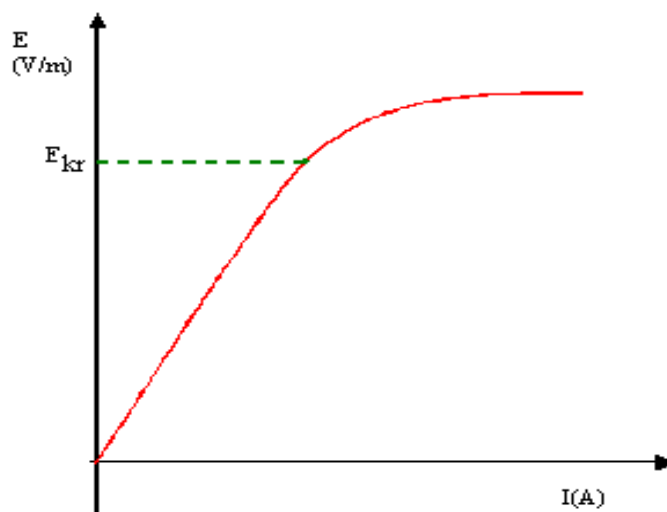
α temperaturni koeficijent koji za mineralno ulje iznosi $\alpha = 0,04$ do $0,05 (1/^\circ C)$,

γ specifična provodnost na temperaturi ϑ .

Zavisnost 2.1 važi za uži opseg temperatura u kome se ne događa nijedna druga promena u dielektriku. Na primer, pri temperaturama prekom $80^\circ C$ do $100^\circ C$ ulja organskog porekla počinju da gube neka svojstva, pa izraz 2.1 ne bi važio.

Polarne tečnosti uvek imaju veću provodnost u poredjenju sa nepolarnim, pri čemu je provodnost veća ako je veća dielektrička konstanta. Izrazito polarne tečnosti se odlikuju tako velikom provodnošću, da se razmatraju kao provodnici sa jonskom električnom provodnošću umesto kao tečni dielektrici. Čišćenje tečnih dielektrika od primesa omogućuje znatno povećanje njihove specifične otpornosti. Kad se električna struja propusti da teče duže vreme kroz nepolarni tečni dielektrik, moguć je takodje porast otpornosti zbog prenosa slobodnih jona ka elektrodama (električno čišćenje). Pri velikim jačinama električnog polja struja u tečnosti se ne potčinjava omovom zakonu, što se objašnjava povećanjem broja jona koji se kreću pod dejstvom električnog polja. Na krivoj zavisnosti struje od jačine električnog polja u tečnim dielektricima kriva ima oblik kao na slici 2.5

Može se uočiti da struja raste linearno sa električnim poljem, mada je struja kroz dielektrik izuzetno mala, reda 10^{-10} do $10^{-15} A$ u zavisnosti od kvaliteta dielektrika i jačine polja. Posle porasta polja preko kritične vrednosti dolazi do porasta struje po eksponencijalnom zakonu.



Slika 2.5: Zavisnost struje u tečnom dielektriku od intenziteta električnog polja

Kod veoma čistih tečnosti, na krivoj zavisnosti struje od električnog polja se može javiti vertikalni deo koji odgovara struji zasićenja, slično kao kod gasova. U svakoj tečnosti pri dovoljno jakom električnom polju nastaje udarna jonizacija elektronima. Merenja su pokazala da počevši od neke kritične jačine električnog polja E_{kr} nastaje udarna jonizacija u tečnosti. Pri višim naponima odnosno većim jačinama električnog polja provodnost tečnih dielektrika se povećava na račun elektronske komponente, odnosno dominira elektronska provodnost. U tom slučaju povećanje provodnosti u zavisnosti od jačine električnog polja može se izraziti preko sledećeg izraza:

$$\gamma = \gamma_0 e^{kE} \quad (2.2)$$

Oznake u izrazu 2.2 imaju sledeće značenje:

γ_0 električna provodnost dielektrika kada ne postoji električno polje ili je ono vrlo slabo,

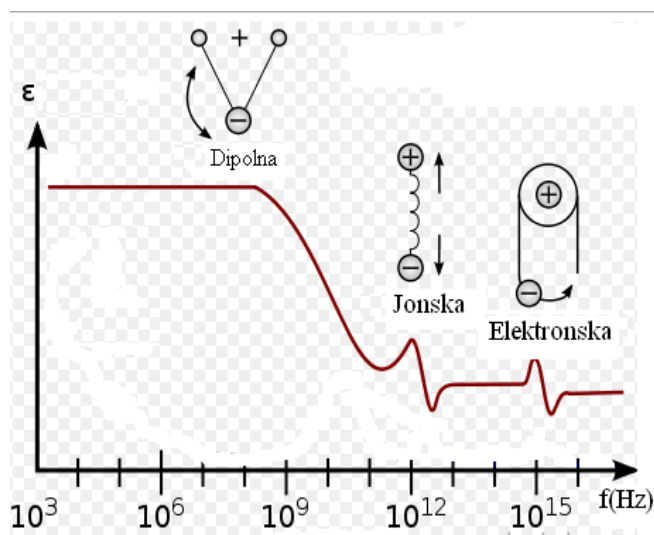
γ električna provodnost dielektrika u prisustvu električnog polja,

k empirijska konstanta.

Konstanta k se dobija eksperimentalno. Provodnost tečnih dielektrika zavisi od vremena delovanja napona. Ona se smanjuje pri povećanju vremena delovanja napona do neke određene vrednosti usled skupljanja prostornog opterećenja u tečnosti i izobličenja prvobitnog oblika polja. Trajanje ovog prelaznog procesa zavisi od prirode i sastava dielektrika i menja se u vrlo širokom opsegu, od sekundi do časova, te o tome treba voditi računa pri merenju provodnosti tečnih dielektrika.

2.1.2 Dielektrična konstanta

Dielektrična konstanta tečnih dielektrika određuje kapacitet izolacije i veoma je važna pri konstrukcijama kondenzatora i druge visokonaponske opreme. Zavisnost dielektrične konstante ϵ sa temperaturom nepolarnih tečnosti je opadajuća, što se objašnjava smanjenjem broja molekula u jedinici zapremine zbog toplotnog širenja tečnosti. Vrednost relativne dielektrične konstante obično ne prelazi 2,5, dok polarizovane tečnosti imaju znatno veću vrednost dielektrične konstante. Zavisnost dielektrične konstante polarnih tečnosti od učestanosti data je na slici 2.6. Na slici su označeni mehanizmi koji dovode do polar-

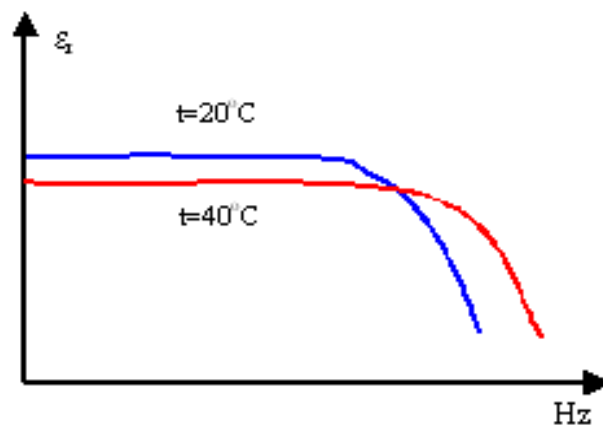


Slika 2.6: Zavisnost dielektrične konstante od učestanosti polarnih dielektrika

izacije tečnih dielektrika pri određenim opsezima učestanosti.

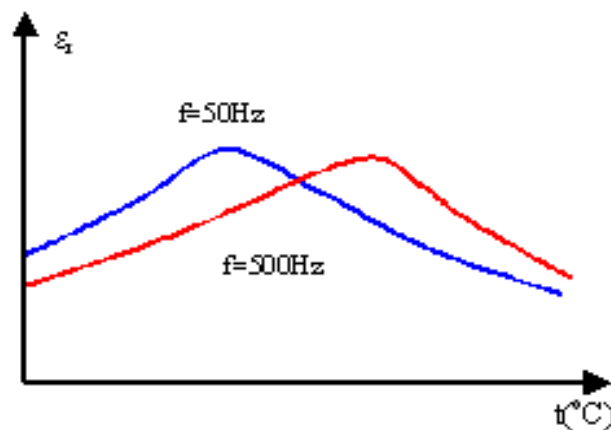
Mineralna ulja su slabo polarizovan tečan dielektrik. Čista voda je veoma polarizovan dielektrik, čija je relativna dielektrična konstanta $\epsilon_r = 80$. Mineralna ulja su veoma higroskopna i povlače vlagu tako da se moraju primenjivati mere za sprečavanje prodora vlage u ulje. Ulje koje sadrži vlagu ima značajno degradirane karakteristike i veoma promenljivu dielektričku konstantu sa temperaturom i frekvencijom.

Na slici 2.7 data je zavisnost dielektrične konstante transformatorskog ulja od učestanosti, pri dve temperature ulja. Sa slike se može uočiti da sa porastom učestanosti počevši od određene kritične učestanosti dolazi do opadanja ϵ_r , što se može protumačiti da iznad neke učestanosti orijentacija dipola ne može da prati promenu polariteta polja, pa se potpuno gubi efekat polarizacije dielektrika. Što je viša temperatura, to lakše dolazi do orijentacije molekula i kritična učestanost pri kojoj dipoli ne mogu da stignu da se orijentišu je viša.



Slika 2.7: Zavisnost dielektrične konstante od učestanosti za dve temperature ulja

Na slici 2.8 data je zavisnost dielektrične konstante transformatorskog ulja od temperature, pri dve učestanosti.



Slika 2.8: Zavisnost dielektrične konstante od temperature za dve učestanosti

Na osnovu slike 2.8 može se izvući sličan zaključak. Sa porastom temperature olakšava se orijentacija dipola, pa ϵ_r raste. Međutim, pri nekoj temperaturi postiže se maksimalna dielektrična konstanta i zatim ona počinje da opada. Ovakav oblik krive vezan je i za prisustvo vode rastvoreno u ulju, koje pri višim temperaturama počinje da isparava.

2.1.3 Dielektrični gubici

Dielektrični gubici okarakterisani su veličinom $\tan \delta$, koja se definiše izrazom:

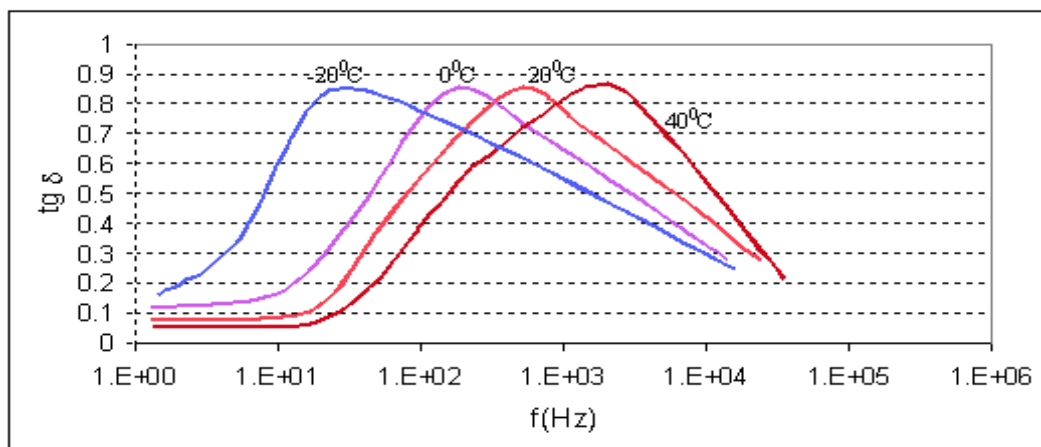
$$\tan \delta = \frac{P}{Q} \quad (2.3)$$

gde su:

P aktivni gubici snage u dielektriku,

Q reaktivna snaga u dielektriku,

Ukupni dielektrični gubici se sastoje se od gubitaka u aktivnoj otpornosti dielektrika i gubitaka vezanih uz dipolnu polarizaciju. Gubici u aktivnoj otpornosti dielektrika su nezavisni od učestanosti, dok se gubici zbog dipolne polarizacije jako povećavaju sa učestanošću do neke kritične učestanosti. Pri višim učestanostima dipoli ne mogu da stignu da prate promenu orijentacije električnog polja, pa se tada gubici smanjuju. Gubici usled dipolne polarizacije jako zavise od sadržaja vlage u tečnom dielektriku. Frekvencija pri kojoj se pojavljuju maksimalni gubici zavisi od temperature dielektrika i povećava se sa temperaturom, jer se sa temperaturom povećava pokretljivost jona i kritična učestanost pri kojoj prestaju dipoli da prate promenu polja. Na temperaturama ispod nule voda rastvorena u ulju se leđi, što dovodi do snižavanja učestanosti na kojima se pojavljuju maksimalni gubici. Zavisnost faktora dielektričkih gubitaka od učestanosti prikazan je na slici 2.9.



Slika 2.9: Zavisnost faktora dielektričkih gubitaka od učestanosti za dve temperature

2.1.4 Dielektrična čvrstoća

Tečni dielektrici imaju veću dielektričnu čvrstoću od gasova u normalnim uslovima. Na njihovu dielektričku čvrstoću najveći uticaj imaju strane primese. Potpuno čisti dielektrici se dobijaju veoma teško. Primese u tečnim dielektricima su voda, gasovi i čvrste čestice. Postojanje primesa uglavnom i određuje vrednost probojnog napona tečnih dielektrika.

Mehanizmi proboja tečnih dielektrika se mogu podeliti na sledeće:

- udarne jonizacije elektronima i nastanka prostornih opterećenja u tečnosti,
- emisije elektrona sa površine katode,
- obrazovanje gasnih mehura u tečnom dielektriku koji se deformišu u električnom polju i olakšavaju proboj,
- uticaj čvrstih provodnih primesa koje izazivaju lokalno pojačanje polja.

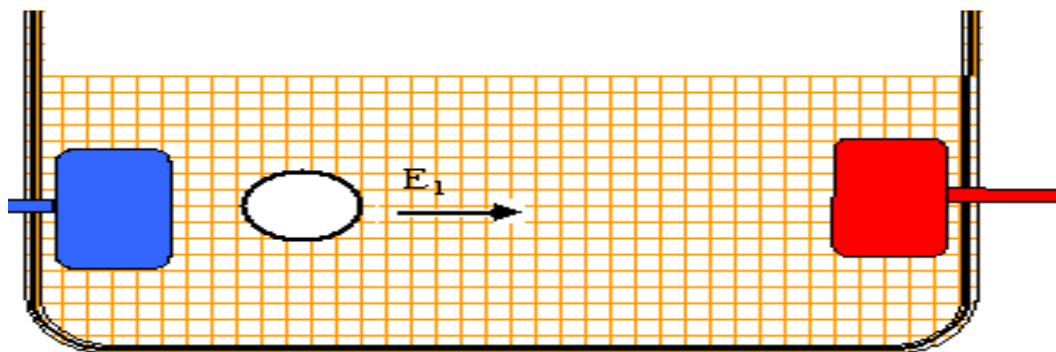
Teorija električnog proboja usled udarne jonizacije tečnih dielektrika može se primeniti ako su tečnosti maksimalno očišćene od primesa. Za dobro očišćene dielektrike od primesa dielektrični čvrstoća je reda 1000 kV/cm.

Pri velikim vrednostima električnog polja može nastati autoelektronska emisija elektrona iz metalnih elektroda kao u gasovima i do udarne jonizacije, koja stvara provodni kanal iskre u kome se ulje zagreva i isparava, što dalje olakšava razvoj pražnjenja. Ako provodni kanal stigne do druge elektrode, dolazi do proboja ulja. Proboj ulja se manifestuje kao stvaranje provodnog kanala u ulju uz pojavu jonizovanog gasa unutar kanala i pojavu strimera, a kod velikih razmaka čak i lidera unutar ulja. Osim toga, provodni kanal iskre pri parcijalnom probouju u ulju može da izazove stvaranje prostornih naelektrisanja u tečnosti što dovodi do pojave neravnomernog polja i njegovog lokalnog pojačanja. Veća dielektrična čvrstoća tečnog dielektrika u odnosu na gasni je posledica znatno manje dužine slobodne putanje elektrona. Osim autoelektronske emisije, do udarne jonizacije u zapremini tečnosti može da dodje usled lokalnog pojačanja polja zbog nagomilavanja prostornog naelektrisanja ili zbog stranih primesa u vidu mehura gasa ili čvrstih čestica koje pojačavaju polje.

Uticaj gasnih primesa

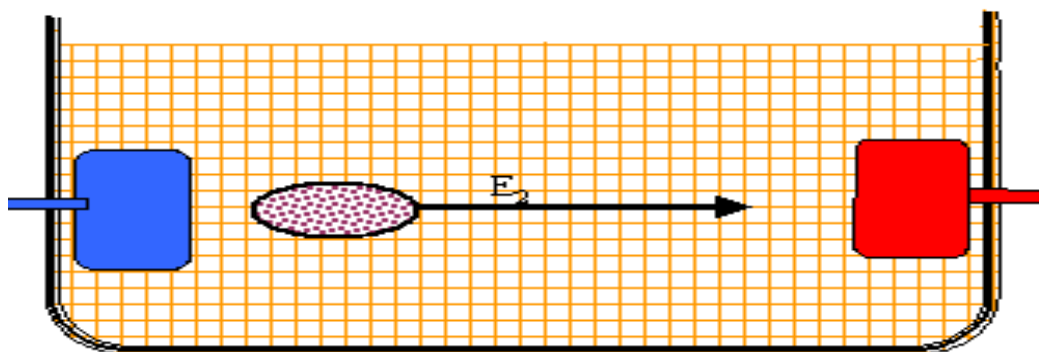
Proboj tečnosti koja sadrži gasne primese objašnjava se lokalnim pregrevanjem tečnosti usled energije koja se stvara u mehurovima gasa u kojima se relativno lako vrši jonizacija.

Gasovite primese mogu nastati u tečnim dielektricima isparavanjem same tečnosti ili razlaganjem tečnosti, kao i stvaranjem mehurova od rastvorenog vazduha. Jonizovani mehuri vazduha postaju provodni i izdužuju se u pravcu električnog polja tako da dolazi do pojave lokalnog pojačanja polja na krajevima izduženih mehurova. Na slici 2.10 prikazan je gasni mehur u ulju kada vlada polje koje nije dovoljno da jonizuje gas unutar mehura. Kada



Slika 2.10: Mehur u izolacionom ulju kada nije došlo do jonizacije gasa u mehuru

se polje pojača dovoljno da izazove jonizaciju unutar mehura, tada se mehur izdužuje, a električno polje u blizini izduženog dela mehura se višestruko pojačava omogućavajući proboj ulja, kao na slici 2.11.



Slika 2.11: Mehur u izolacionom ulju kada je došlo do jonizacije gasa u mehuru i višestrukog pojačanja pola

Uticaaj tečnih primesa

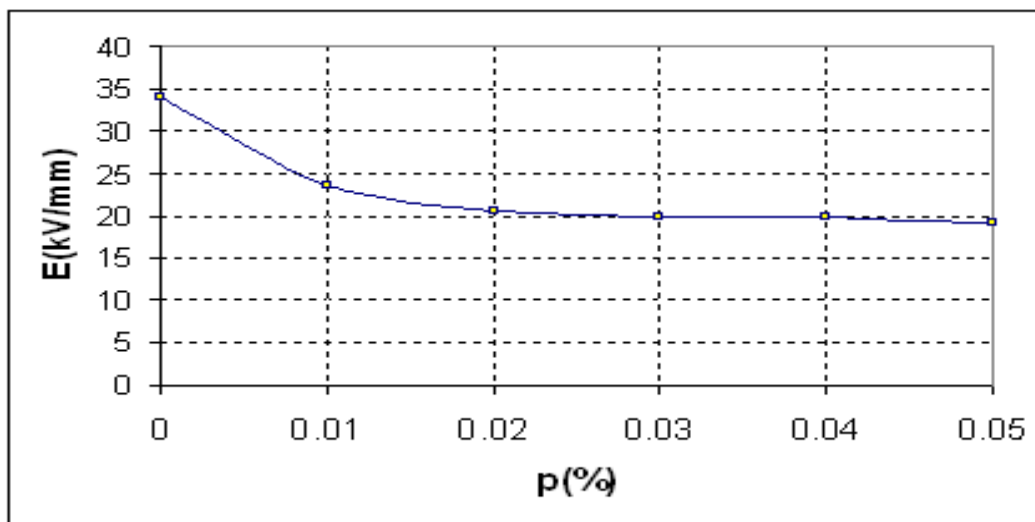
Najvažnija tečna primesa u izolacionom ulju je voda. Ona dolazi u ulje upijanjem vlage iz vazduha usled higroskopnosti, usled neadekvatne pripreme i lagerovanja ulja ili oslobadja-

njem vlage iz čvrste izolacije u slučaju neadekvatne pripreme papirne izolacije namotaja transformatora ili uljno-papirne izolacije kablova, koja u sebi može sadržati veliku količinu upijene vlage. Zbog toga se pre nalivanja ulja izolacija namotaja transformatora zagreva i vakumira, da bi se izvukla sva zaostala vlaga.

Voda u vidu sitnih odvojenih kapi koja se nalazi u transformatorskom ulju, pri normalnoj temperaturi znatno snižava dielektričnu čvrstoću. Pod uticajem električnog polja sferne kapi vode se izdužuju, dobijaju oblik elipsoida i privlače se medju sobom suprotno naelektrisanih krajeva stvarajući izmedju elektroda nizove sa povećanom provodnošću, kroz koje može da nastane električni proboj.

Dielektrična čvrstoća osim što zavisi od primesa zavisi i od temperature, učestanosti i pritiska. Najbitniju ulogu od stranih primesa ima voda odnosno vlaga u ulju, jer se ona zbog higroskopnosti ulja, najčešće i najlakše pojavljuje. Rastvorljivost vode u ulju zavisi od temperature ulja, jer se voda u ulju može nalaziti u vidu molekularnog rastvora ili u vidu emulzije. U oba slučaja ona smanjuje dielektričnu čvrstoću.

Na slici 2.12 data je zavisnost smanjenja dielektrične čvrstoće ulja sa povećanjem procenta vlage u ulju.

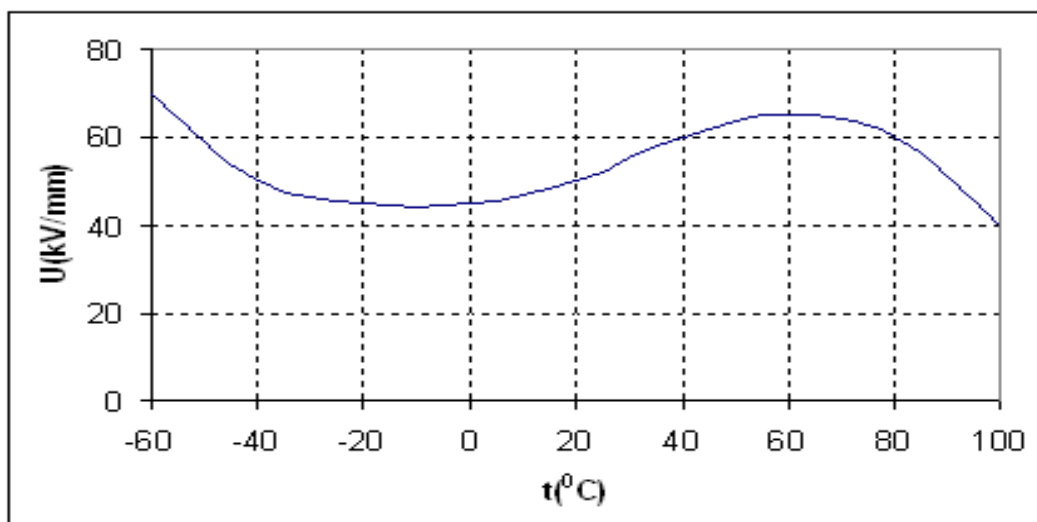


Slika 2.12: Zavisnost dielektrične čvrstoće od porasta procenta vlage u ulju

Sa slike 2.12 se može uočiti da sadržaj vlage u izolacionom ulju ima izuzetno veliku važnost za dielektričku izdržljivost. Porast procenta vlage od 0 do 0.05% smanjuje dielektričku čvrstoću na oko polovinu.

Temperature ulja ima složeni uticaj na dielektričnu čvrstoću, što je posledica pre svega rastvorene vlage u ulju. Za temperature ulja ispod nule dolazi do zamrzavanja

kapljica vode koji se pretvaraju u ledene kristale. Ledeni kristali imaju dielektričnu konstantu blisku dielektričnoj konstanti ulja, pa se ulje sa ledenim kristalima ponaša kao homogen dielektrik. Sa porastom temperature ledeni kristali se tope i formira se vodena emulzija u ulju koja smanjuje dielektričnu izdržljivost. Sa daljim porastom temperature vlaga u ulju iz oblika emulzije prelazi u molekularni rastvor kada je njen uticaj na dielektričnu čvrstoću manji, odnosno probojni napon ulja raste. Za temperature od 60°C do 80°C postiže se maksimalna dielektrička izdržljivost ulja. Sa daljim povećanjem temperature iznad 80°C dolazi do opadanja dielektričke čvrstoće, što je vezano za isparavanje vlage i obrazovanje gasnih mehura u tečnosti. Uticaj temperature na probojnu čvrstoću ulja prikazan je na slici 2.13



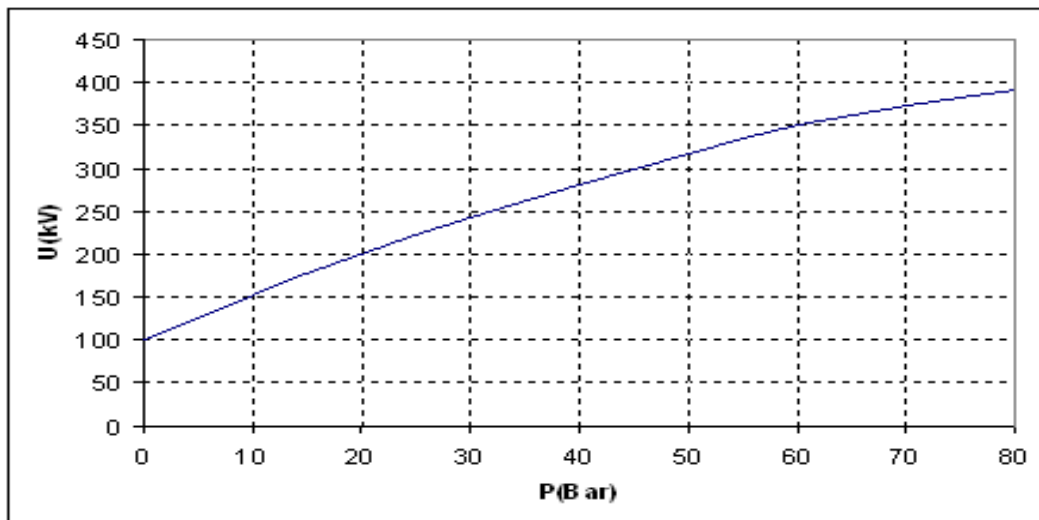
Slika 2.13: Zavisnost dielektrične čvrstoće od temperature ulja

Uticaj pritiska ulja na dielektričnu čvrstocu uslovljena je smanjenjem intezivnosti jonizacionih procesa u gasnim mehurima ulja, koji su osnovni uslov za razvoj proboja ulja. Na slici 2.14 data je zavisnost povećanja dielektrične čvrstoće ulja sa povećanjem pritiska. Sa smanjenjem pritiska ispod atmosferskog može doći do opadanja dielektrične čvrstoće.

Uticaj čvrstih primesa

Čvrste strane primese u tečnom dielektriku mogu biti:

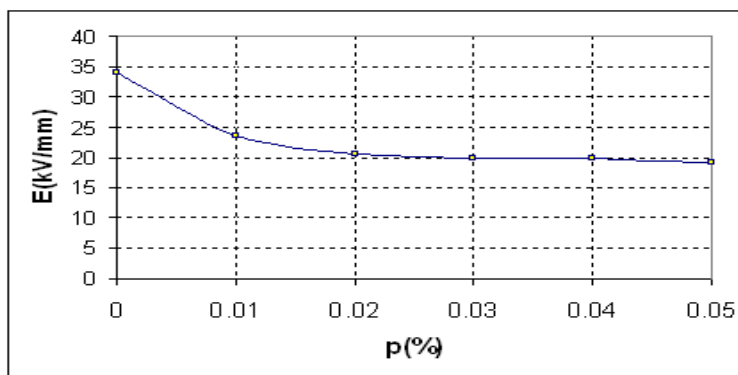
- prašina,



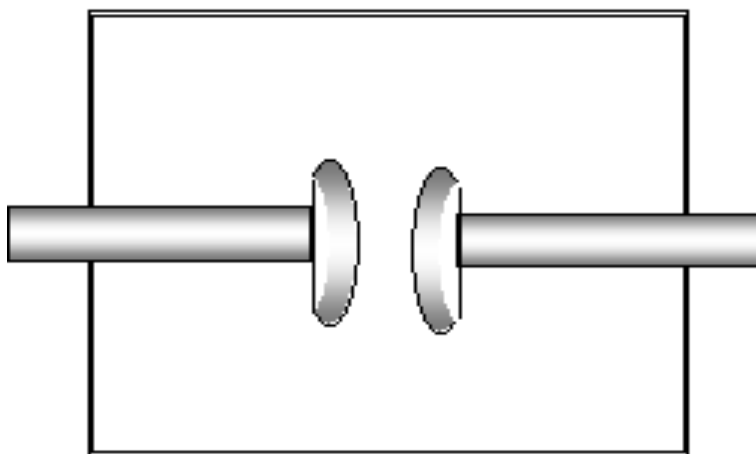
Slika 2.14: Zavisnost dielektrične čvrstoće od pritiska

- čvrsti produkti sagorevanja ili razlaganja ulja najčešće u obliku ugljenika,
- celulozna vlakna ili drugi materijali nastali razlaganjem čvrstih organskih dielektrika u ulju.

Ovi čvrsti materijali, naročito ako su higroskopni, obrazuju poluprovodne ili provodne mostove unutar tečnosti, što može imati za posledicu pojavu jakih električnih polja. Električno polje može da dovede do usmeravanja čvrstih primesa, posebno ako su u obliku vlakana, u pravcu delovanja polja. Ovako formirani provodni mostovi unutar izolacionog ulja lako mogu da dovedu do pojave električnog polja koje prevazilazi dielektričku čvrstoću. Na slici 2.15 prikazan je slučaj pojačanja polja usled usmerenih vlakana čvrstih higroskopnih primesa.



Slika 2.15: Usmeravanje higroskopnih vlakana u ulju pri delovanju polja



Slika 2.16: Skica standardne ispitne komore za ispitivanje dielektričke čvrstoće ulja

Struja koja protiče kroz ove provodne mostove može da dovede do isparavanja tečnosti i da omogući stvaranje gasovitih sastojaka u tečnosti. Sve ovo utiče na taj način da je dielektrična čvrstoća tečnosti u prisustvu čvrstih sastojaka snižena.

Na dielektričnu čvrstoću ulja utiče i vreme delovanje napona. Pri vrlo kratkim vremenskim intervalima reda od $1\mu s$ do $10\mu s$ ne mogu se obrazovati provodnih mostovi usled primesa niti mogu doći do izražaja toplotni procesi u tečnosti. Sa povećanjem vremena trajanja napona od $10ms$ do $1s$ primese igraju veoma bitnu ulogu, dolaze do izražaja toplotni procesi. Ukoliko je ulje čistije utoliko je manja zavisnost njegovog probojnog napona odnosno dielektrične čvrstoće od vremena delovanja napona. Ispitivanje dielektrične čvrstoće ulja vrši se naizmeničnim naponom industrijske učestanosti 50Hz. Pri ovom ispitivanju treba voditi računa da se napon ne podiže brzo jer razlike u dobijenim vrednostima dielektrične čvrstoće mogu dosta odstupiti ukoliko uspostavljeni napon nije u više pokušaja podizan istom brzinom. Zato se definiše da je korak podizanja naizmeničnog napona pri ispitivanju probojne čvrstoće manji od 2% očekivane vrednosti. Obično se pri ispitivanju napon podiže kontinualno sa porastom od 1 do 2 kV po sekundi. Oblik električnog polja utiče na dielektričnu čvrstoću ulja jer što je polje ravnomjernije, to je i dielektrična čvrstoća veća. Stoga se za ispitivanje dielektrične čvrstoće ulja primenjuju elektrode standardnog oblika i međusobnog rastojanja, smeštene u standardnu ispitnu komoru, kao na slici 2.16.

Kako se pri ispitivanju ulja naizmeničnim naponom mogu u ulju javiti i toplotni procesi to se kao merodavna uzima efektivna vrednost napona, predpostavljajući da kriva napona ne odstupa bitno od sinusoide, odnosno da je u granici odredjenih tolerancija.

Od tečnih dielektrika se zahteva:

- velika dielektrična čvrstoća,
- mali ugao dielektričnih gubitaka,
- hemijska postojanost,
- termička postojanost,
- nezapaljivost,
- niska cena.

Poglavlje 3

Čvrsti dielektrici

3.1 Uvod

Čvrsti dielektrici se najčešće primenjuju u tehničkim konstrukcijama gde treba da obezbede trajan i neometan rad pod različitim uslovima, kako u pogledu primjenjenih napona tako i u pogledu različitih uticaja okoline. Čvrsti dielektrici se mogu koristiti na različite načine u elektroenergetici, a najčešći su:

- Kao nosači, podupirači ili odstojnici u gasovitoj ili tečnoj izolaciji, kao na primer izolatori kod nadzemnih vodova, potporni izolatori u postrojenjima ili odstojnici u SF6 postrojenjima.
- Čvrsta izolacija oko provodnika kao kod kablova, ili suvih transformatora zalivenih u smole kao što je araldit.
- Čvrsta izolacija impregnirana tečnom izolacijom kao što je slučaj kod uljnih transformatora kod kojih se provodnici izoluju papirnom izolacijom, a sve je potopljeno u izolaciono ulje. Slična je primena uljno papirne izolacije kablova kod koje su provodnici izolovani papirom, a sve je potopljeno u ulje. Ova konstrukcija kablova se napušta.

U primeni čvrstih dielektrika pod visokim naponima važnu ulogu igraju osnovne električne karakteristike čvrstih dielektrika u pogledu izolacionih sposobnosti i to:

- specifična provodnost,

- dielektrična konstanta,
- dielektrični gubici,
- dielektrična čvrstoća.

Ove karakteristike mogu se menjati usled uticaja temperature, učestanosti, vlažnosti, dužine trajanja delovanja napona i drugih faktora, kao što su na primer mehanička naprezanja.

Čvrsti izolacioni materijali koji se primenjuju u tehnici visokih napona mogu se podeliti na organske i neorganske materijale, iako se često sreću kombinacije organskih i neorganskih materijala. Svi čvrsti dielektrici su razvrstani u klase, gde se definiše njihova najviša dozvoljena radna temperatura, koja se kreće od $90^{\circ}C$ za klasu *Y* (organski materijali na bazi celuloze), do temperatura od preko $180^{\circ}C$ za dielektrike klase *C* (keramika, staklo).

3.2 Električne karakteristike čvrstih dielektrika

3.2.1 Električna otpornost

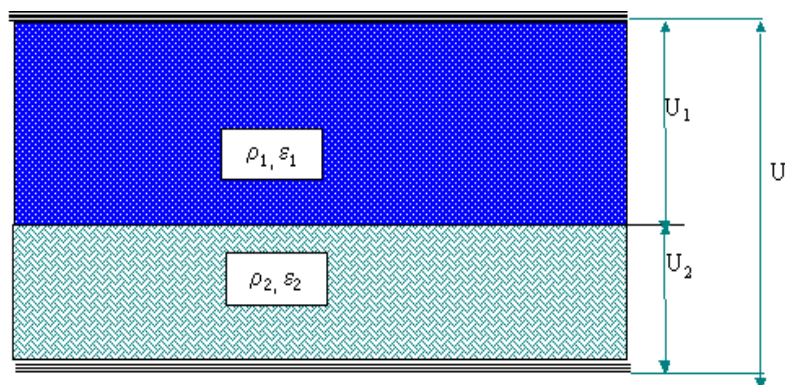
Čvrsti dielektrici imaju specifičnu električnu otpornost od 10^8 do $10^{20}\Omega m$. Kao i kod tečnih dielektrika sa porastom temperature opada otpornost čvrstih dielektrika. Veoma slično kao i kod tečnih dielektrika strane primese imaju jako veliki uticaj na specifičnu otpornost. Jedna od važnih primesa koja jako smanjuje otpornost čvrstog dielektrika je prisustvo vlage. Specifična provodnost čvrstih dielektrika u zavisnosti od prirode materijala, tehnologije izrade, prisustva stranih primesa i okoline i menja se u širokim granicama. Specifična provodnost od $10^{10}\Omega m$ smatra se granicom sa kojom se još može čvrsti dielektrik koristiti u eksploataciji.

Vlažnost jako utiče na specifičnu provodnost čvrstih dielektrika, naročito ako dielektrik ima primesa koje su rastvorljive u vodi, te sa porastom vlažnosti raste specifična provodnost.

Veličina specifične provodnosti čvrstih dielektrika merena jednosmernim naponom zavisi od vremena delovanja napona. Ovo se može objasniti sakupljanjem prostornih opterećenja unutar dielektrika, a naročito je izraženo kod raznorodnih dielektrika sastavljenih zajedno ili kada dielektrik nije homogen. Ovo sakupljanje slobodnih prostornih

opterećenja unutar dielektrika dovodi do promene početne raspodjele polja i može izazvati povišenje napona na pojedinim delovima dielektrika.

Na slici 3.1 prikazan je nehomogen dielektrik. Tipičan slučaj je čvrst dielektrik sa uvlaženim spoljašnjim slojem, što je čest slučaj kod celulozne izolacije koja je jako higroskopna. Na slici 3.1 oznake imaju sledeće značenje:



Slika 3.1: čvrst dielektrik sa uvlaženim spoljašnjim slojem

U ukupan napon koji vlada između elektroda (u ovom slučaju to su obloge kondenzatora),

U_1 napon koji vlada na sloju dielektrika koji ima specifičan otpor ρ_1 i relativnu dielektričku konstantu ε_1 ,

U_2 napon koji vlada na sloju dielektrika koji ima specifičan otpor ρ_2 i relativnu dielektričku konstantu ε_2 ,

Na slici 3.2 prikazana je električna šema za direktno merenje otpora izolacije jednosmernom strujom. Oznake na slici 3.2 imaju sledeće značenje:

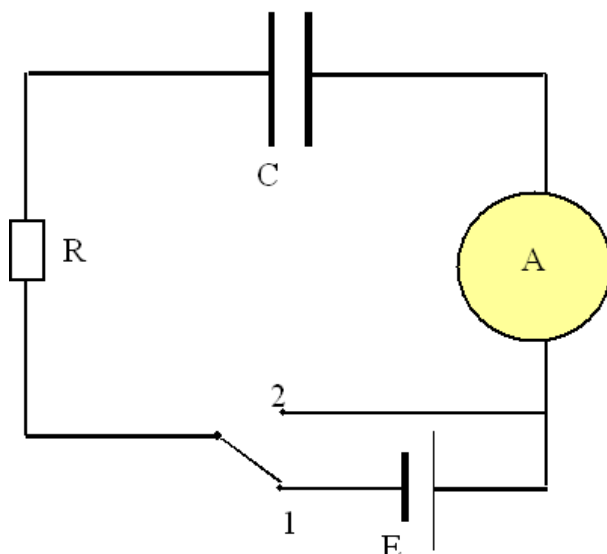
E elektromotorna sila izvora jednosmernog napona,

R otpornost otpornika za ograničenje struje punjenja kondenzatora, sa uračunatim svim otpornostima kola,

C kapacitet ispitivanog objekta

1 položaj preklopnika u kome se kondenzator puni,

2 položaj preklopnika u kome se kondenzator prazni.



Slika 3.2: Kolo za merenje električnog otpora jednosmernom strujom

Ako se dielektrik priključi na izvor jednosmernog napona uključenjem prebacača u položaj 1, kao na slici 3.2, tada se uspostavlja struja koja pri zanemarenim induktivitetima kola gotovo trenutno postiže vrednost:

$$I_m = \frac{E}{R} \quad (3.1)$$

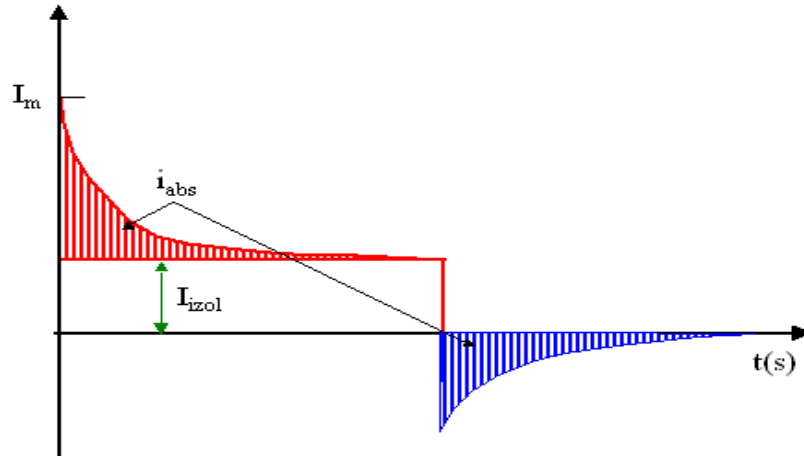
Pri tome se smatra da je vremenska konstanta opterećivanja kondenzatora C izuzetno mala i iznosi $T = R \times C$. Kasnije struja postepeno opada do vrednosti struje provodjenja dielektrika I_{izol} , koja je izuzetno mala i ima vrednost delova μA , odnosno:

$$I_{izol} = \frac{E}{R_{izol}} \quad (3.2)$$

gde je R_{izol} ukupna otpornost izolacije. Struja koja protiče nakon završetka punjenja kondenzatora naziva se strujom absorpcije. Kada se prelazni režim završi, tada se ustaljuje struja provodjenja dielektrika I_{izol} . Ako se sada prebaci prebacač iz položaja 1 u položaj 2 javlja se struja absorpcije suprotnog polariteta koja postepeno opada na nulu. Struja absorpcije prikazana je na slici 3.3. Do pojave struje absorpcije dolazi zbog pomeranja prostornih naelektrisanja unutar dielektrika. Posmatrajmo napon koji vlada na slojevima 1 i 2 dielektrika sa slike 3.1 koji se menja se u toku vremena, dok ukupan napon ostaje konstantan i ima vrednost:

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t) \quad (3.3)$$

Početna raspodela napona na slojevima dielektrika sa slike 3.1 dobija se na osnovu ka-



Slika 3.3: Promena struje kroz čvrsti dielektrik pri uključenju i kratkom spajanju ispitivanog kondenzatora

pacitivnog rasporedjivanja napona prilikom uključenja i ima vrednost:

$$U_1(t = 0) = U \times \frac{C_2}{C_1 + C_2} \quad (3.4)$$

$$U_2(t = 0) = U \times \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (3.5)$$

gde su C_1 i C_2 parcijalne kapacitivnosti slojeva odnosno:

$$U_1(t = 0) = U \times \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \quad (3.6)$$

$$U_2(t = 0) = U \times \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \quad (3.7)$$

Krajnja raspodela napona dobija se na osnovu proticanja struje kroz otpor izolacije i može se dobiti na osnovu parcijalnih otpornosti slojeva izolacije, odnosno:

$$U_1(t \rightarrow \infty) = U \times \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (3.8)$$

$$U_2(t \rightarrow \infty) = U \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.9)$$

gde su R_1 i R_2 parcijalne otpornosti slojeva izolacije, odnosno:

$$U_1(t = 0) = U \times \frac{\rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \quad (3.10)$$

$$U_2(t = 0) = U \times \frac{\rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \quad (3.11)$$

Struja absorpcije u posmatranom primeru je struja koja se javlja kroz dielektrik u prelaznom stanju kada se raspodela napona menja od početne definisane kapacitivnom raspodelom napona do krajnje definisane omskom raspodelom napona izmedju slojeva dielektrika. Ova struja je mala, a prelazni proces spor i vezan za proticanje električnih opterećenja kroz dielektrik.

Promena struje absorpcije sa vremenom definiše se koeficijentom absorpcije, kao odnosom vrednosti otpora izolacije u dva različita vremenska trenutka. Za objekte malog kapaciteta i prema uobičajenom načinu usvojenom u Evropi vrši se merenje otpora izolovanosti u trenutku 60 i 15 sekundi od momenta priključenja jednosmernog napona. Za objekte većeg kapaciteta i prema praksi u SAD merenje otpora izolovanosti vrši se u trenutku 10 minuta i 1 minut od momenta priključenja napona. Koeficijent absorpcije se definiše se za male kapacitete kao:

$$K_{abs} = \frac{R_{60}}{R_{15}} \quad (3.12)$$

gde su:

R_{60} otpornost izmerena posle 60 s od priključenja napoma,

R_{15} otpornost izmerena posle 15 s od priključenja napona.

3.2.2 Dielektrična konstanta

Dielektrična konstanta čvrstih dielektrika karakteriše sposobnost čvrstih dielektrika da se polarizuju pod dejstvom električnog polja. Ona određuje kapacitet kao jedan od najvažnijih parametara izolacionih konstrukcija. Vrednost dielektrične konstante zavisi od toga da li je dielektrik i koliko podložan polarizaciji. U dielektricima koji nisu podložni polarizaciji dielektrična konstanta ϵ_r je reda 2 do 4, u slabo polarizovanim 3 do 6, a u jako polarizovanim može dostići vrednost 100, pa i više. Date vrednosti se odnose na relativnu dielektričnu konstantu.

Dielektrična konstanta, odnosno njoj proporcionalan kapacitet, zavise od temperature i učestanosti. Zavisnost od temperature je prilično složena. Tako na primer kod nepolarizovanih dielektrika dielektrična konstanta se smanjuje sa povišenjem temperature. Kod polarizovanih se menja na razne načine u zavisnosti od sastava dielektrika i različita je za razne učestanosti i temperature.

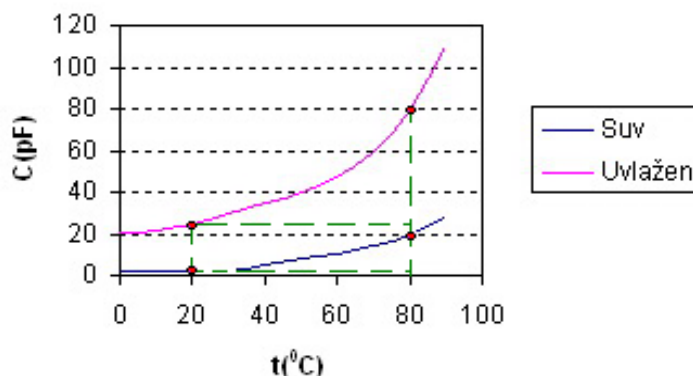
Promena dielektrične konstante, odnosno kapaciteta, sa sadržajem vlage u dielektriku može poslužiti kao merilo vlažnosti izolacije. Naime molekuli vode kao jako polarizovane tečnosti dovode do povećanja dielektrične konstante, odnosno kapaciteta. Sa

porastom temperature dielektrika olakšava se orijentacija dipola vode i kapacitet objekta raste brže nego kod suvog dielektrika.

Stoga se meri kapacitet objekta pri dvema raznim temperaturama i to najčešće pri 20°C i pri 80°C i određuje njihov odnos:

$$k_v = \frac{C_{80}}{C_{20}} \quad (3.13)$$

Ako je ovaj odnos veći od 1,3 dielektrik je već dovoljno uvlažen i treba preduzeti mere sušenja. Na slici 3.4, kriva 1 odgovara suvom, a kriva 2 vlažnom dielektriku.

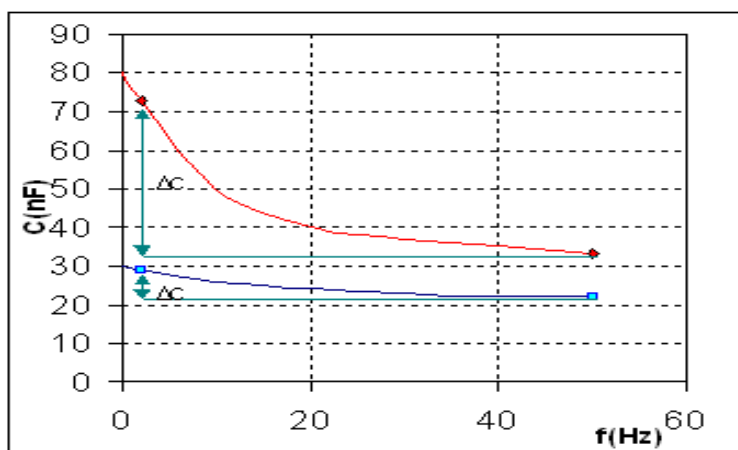


Slika 3.4: Zavisnost kapaciteta objekta od temperature

Na veoma sličan način, merenjem kapaciteta objekta pri dve različite učestanosti, može se zaključiti da li je dielektrik uvlažen. Na slici 3.5 je prikazan postupak određivanja stepena uvlaženosti dielektrika merenjem kapaciteta pri frekvenciji od 2 Hz i 50 Hz. Sa povećanjem frekvencije napona, kod polarizovanih dielektrika, smanjuje se sposobnost dipola da prate promenu orijentacije električnog polja, pa se smanjuje i kapacitet dielektrika. Kod neuvlaženih dielektrika polarizacija nije prisutna, pa je promena kapaciteta mnogo manja. Ako obeležimo kapacitet dielektrika pri frekvenciji 2 Hz sa C_2 , a kapacitet pri frekvenciji 50 Hz sa C_{50} , tada se kao kriterijum uvlaženosti posmatra koeficijent:

$$k_v = \frac{C_2}{C_{50}} \quad (3.14)$$

Ukoliko je koeficijent k_v veći od 1,3 smatra se da je dielektrik uvlažen.



Slika 3.5: Zavisnost kapaciteta objekta od frekvencije

3.2.3 Dielektrični gubici

Dielektrični gubici okarakterisani su takozvanim tangensom ugla gubitaka $\text{tg } \delta$, a sastoje se iz gubitaka u aktivnoj provodnosti dielektrika i gubitaka vezanih za dipolnu polarizaciju. Prva vrsta gubitaka je veoma mala, naročito na niskim temperaturama, pa glavni deo gubitaka čine gubici koji potiču od dipolne polarizacije.

Tangens ugla gubitaka $\text{tg } \delta$ je odnos gubitaka aktivne snage prema reaktivnoj snazi u dielektriku:

$$\text{tg } \delta = \frac{P}{Q} \quad (3.15)$$

gde su:

P snaga aktivnih gubitaka,

Q reaktivna snaga koja protiče kroz kolo.

Reaktivna snaga se može izraziti kao:

$$Q = \omega C U^2 \quad (3.16)$$

gde je:

C kapacitet objekta,

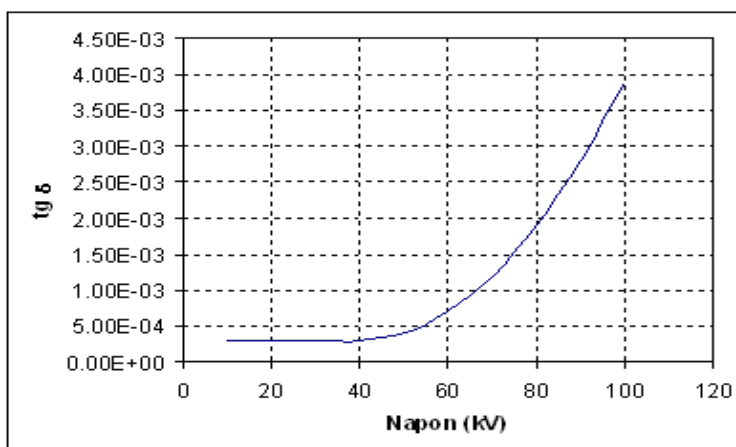
ω industrijska kružna učestanost,

U napon na dielektriku.

Na osnovu izraza 3.16 i 3.15 može se izračunati aktivna snaga gubitaka u dielektriku usled dipolne polarizacije, koja je dominantna.

$$P = \omega CU^2 \times \operatorname{tg} \delta \quad (3.17)$$

Promena tangensa ugla gubitaka sa naponom obično se u laboratorijskim uslovima meri u granicama od 0,5 do 1,5 nazivnog napona. Kod izolacije koja je dobrog kvaliteta u navedenom intervalu napona nema promene tangensa ugla gubitaka. Ovaj slučaj prikazan je na slici 3.6. Sa slike 3.6 se može uočiti da je do napona od oko 40 kV $\operatorname{tg} \delta$ praktično



Slika 3.6: Zavisnost $\operatorname{tg} \delta$ od napona

konstantan, a pri višim naponima dolazi do značajnog porasta faktora dielektričkih gubitaka. Radni napon kome će izolacija trajno biti izložena mora biti niži od napona pri kome nastaje povećanje dielektričkih gubitaka. $\operatorname{tg} \delta$ se povećava sa temperaturom po eksponencijalnom zakonu u užem opsegu temperatura oko radne temperature dielektrika, što je dato sledećim izrazom.

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_0 e^{(t-t_0)} \quad (3.18)$$

gde je:

$\operatorname{tg} \delta_0$ predstavlja $\operatorname{tg} \delta$ na sobnoj temperaturi,

t_0 sobna temperatura,

t radna temperatura dielektrika.

3.2.4 Dielektrična čvrstoća

Probojni napon čvrstih dielektrika bitno se razlikuje od dielektrične čvrstoće tečnih i gasovitih dielektrika. Osnovna razlika proboja čvrstih dielektrika od pražnjenja u tečnim i gasovitim dielektricima je u tome što posle proboja čvrstih dielektrika njihova dielektrična čvrstoća ne može ponovo da se uspostavi.

Zakovitosti proboja čvrstih dielektrika imaju složen karakter i zavise od niza faktora kao što su: hemijski sastav i struktura dielektrika, tehnologija obrade, količina stranih primesa, električna, mehanička, termička i hemijska delovanja na dielektrik.

U zavisnosti od gore navedenih faktora, od kojih su najvažniji vreme delovanja napona i temperatura možemo razlikovati sledeće mehanizme proboja čvrstih dielektrika:

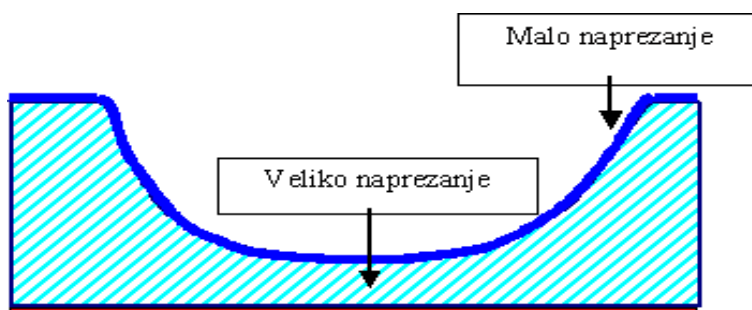
- unutrašnji (elektronski) proboj,
- termički proboj,
- elektrohemijski ili jonizacioni proboj.

3.3 Mehanizam proboja čvrstih dielektrika

3.3.1 Električni proboj čvrstih dielektrika

Danas još ne postoji potpuno jasno fizičko razjašnjenje procesa električnog proboja čvrstih dielektrika, ali postoji nekoliko teorija koje pokušavaju da objasne pojave pri delovanju jakih električnih polja u unutrašnjosti čvrstih dielektrika. Unutrašnji ili elektronski proboj čvrstih dielektrika nastaje u onim slučajevima kada je isključena mogućnost zagrevanja dielektrika ili razvoj procesa starenja dielektrika, kao i uticaj ivičnih efekata ili okoline na čvrsti dielektrik. Prilikom eksperimentalnog istraživanja uzorci koji se ispituju moraju da budu oslobođeni stranih primesa i posebno se oblikuju da bi se postiglo maksimalno električno naprezanje u odredjenom delu u unutrašnjosti dielektrika. Na slici 3.7 prikazan je uzorak čvrstog dielektrika sa elektrodama koje su tako oblikovane da se postigne maksimalno naprezanje u unutrašnjosti dielektrika i smanjenje ivičnih efekata. Elektrode su obojene plavom i crvenom bojom.

Unutrašnji proboj se odvija u toku vrlo kratkog vremenskog perioda pri delovanju impulsnih napona, reda veličine 10^{-8} s. Električno polje koje izaziva proboj je reda veličine



Slika 3.7: Uzorak čvrstog dielektrika sa elektrodama oblikovanim tako da se postigne maksimalno naprezanje u unutrašnjosti dielektrika

10^8 V/m. Smatra se da pri električnim poljima tog intenziteta elektroni mogu da pokidaju svoje valentne veze i predju u stanje slobodnih elektrona kao u provodnicima. U čistim i homogenim dielektricima razmak između stanja provodjenja i stanja u kome su elektroni vezani valentnim vezama je dovoljno širok da treba takve dielektrike dovoljno zagrejati da bi prešli iz valetnog stanja u stanje provodjenja. Kod dielektričkih materijala sa primesama u obliku nečistoća u prostoru dielektrika se mogu nalaziti zarobljeni elektroni koji pri nižim temperaturama (sobna temperatura) mogu da postignu dovoljnu energiju da predju u zonu provodjenja. Kod amorfni materijala lakše dolazi do zarobljavanja elektrona koji mogu da se termičkim putem oslobode i predju u zonu provodjenja nego kod kristalnih dielektrika.

Strimerski mehanizam objašnjava nastanak proboja pri homogenim poljima na taj način što elektron koji postigne dovoljnu energiju udarnom jonizacijom stvara lavine. Da bi došlo do strimerskog proboja, potrebno je da lavina dodje do druge elektrode i izazove proboj.

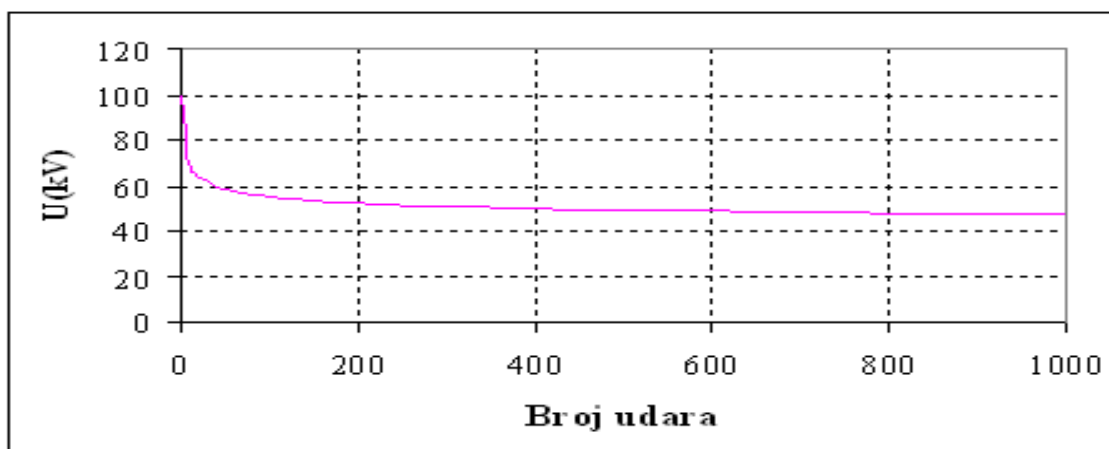
Elektromehanički proces razaranja čvrstih dielektrika se može primeniti kod materijala kod kojih pod uticajem elektrostatičkih sila dolazi do pucanja u strukturi dielektrika i stvaranja mikropukotina u zapremini dielektrika. Pukotina u čvrstom dielektriku, napunjena jonizovanim gasom, predstavlja neku vrstu poluprovodne igle koja izaziva progresivno pojačanje polja i dovodi do mehaničkog razaranja dielektrika.

Glavna od teškoća stvaranja teorije proboja koja bi bila podesna za inženjerske proračune je nemogućnost matematičke obrade svih vrlo složenih uslova i okolnosti koje uslovljavaju proboj tehničkih dielektrika koji imaju složen hemijski sastav kao i nemogućnost obuhvatanja u proračunima uticaja stranih primesa, neravnomjernost polja itd.

Praktični rezultati određivanja probajnog napona čvrstih dielektrika dobijaju se na osnovu rezultata eksperimenata i oni karakterišu njegovu dielektričnu čvrstoću sa uzimanjem u obzir osobine materijala i konkretne uslove njegove eksploatacije. Ovakva

dielektrična čvrstoća predstavlja izvesnu uslovnu veličinu zavisnu od konfiguracije električnog polja i električnih karakteristika kako samog ispitivanog dielektrika, tako i okolne sredine. Dobijena vrednost se najčešće uzima kao srednja vrijednost iz više eksperimenata i predstavlja orijentacioni podatak za navedene uslove pri ispitivanju probojnog napona.

Bitnu ulogu kod impulsnog proboja čvrstih dielektrika ima takozvani kumulativni efekat tj. da probojni napon zavisi od broja primenjenih impulsa. Pri primeni impulsnih napona čija je amplituda veća od probojnog napona pri 50 Hz, no nedovoljna da probije čvrsti dielektrik pri kratkotrajnom delovanju, može nastati delimično razaranje dielektrika, tj. nepotpuni proboj u vidu malih šupljina. Pri tome treba razlikovati dve vrste dielektrika. Kod jednih (primer stakla), pri ponovljenom impulsu nepotpuni proboj nastaje uvek na drugom mjestu, a kod drugih (kristali, keramički materijali) pri ponovljenom impulsu nepotpuni proboj nastaje uvek na istom mestu i povećava delimično razaranje dok posle više uzastopnih udara ne nastupi potpuni proboj. Pojava nepotpunog i postepenog proboja čvrstih dielektrika dovodi do toga da su opasni po izolaciju ne samo impulsnii naponi koji izazivaju proboj pri jednom udaru, nego i impulsnii naponi sa nižom amplitudom koji dovode do proboja pri višestrukom delovanju. Zavisnost probojnog napona kablovskog papira od broja udara data je na slici 3.8. Oprema koja se koristi u elektro-



Slika 3.8: Zavisnost probojnog napona od broja udara

energetici mora da bude ispitana podnosivim naponima. Oprema koja može biti izložena atmosferskim prenaponima ispituje se standardnim atmosferskim udarnim naponom. Prilikom donošenja standarda o ispitivanju udarnim naponima uvek postoji dilema da li će ispitivani uzorak biti oslabljen prilikom ispitivanja sa većim brojem udara, pa se bira optimalan broj udara. Ispitivanja podnosivim udarnim naponom spadaju u tipska ispitivanja, pa se ispitivanje vrši na propisanom broju uzoraka, a ne na svakom uređaju iz serije. Međutim, postoje uređaji kao što su na primer veliki energetski transformatori, koji se rade pojedinačno po narudžbini. Takvi uređaji moraju da budu tipski ispitani, da bi se eliminisala mogućnost nastanka proizvodne greške koja bi se manifestovala ubrzo

nakon ugradnje. Transport i postavljanje transformatora iziskuju velike troškove tako da se mora izvršiti potpuna eliminacija bilo kakve slabosti uređaja pre transporta.

3.3.2 Termički proboj čvrstih dielektrika

Termički proboj čvrstih dielektrika nastaje pri narušavanju toplotne ravnoteže u dielektriku, tj. kada je toplota koja se stvara u dielektriku veća od odvedene toplote, pa nastaje povišenje temperature dielektrika. Sa progresivnim povišenjem temperature dielektrika smanjuje se njegova dielektrična čvrstoća, te nastaje proboj.

Termički proboj dielektrika pri jednosmernom naponu praktično ne nastaje jer je provodnost dielektrika vrlo mala pa je i mala količina razvijene toplote u dielektriku. Stoga se toplotni proboj posmatra pri delovanju naizmjeničnog napona gde su gubici u dielektriku daleko veći. Gubici u dielektriku pri naizmjeničnom naponu i njima srazmerna količina toplote koja se razvija u dielektriku, zavise od temperature dielektrika i mogu se izračunati preko izraza:

$$P = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta_o e^{a(t-t_o)} \quad (3.19)$$

U izrazu 3.19 oznake imaju sledeće značenje:

P - toplotna snaga koja se oslobadja u dielektriku usled dielektričkih gubitaka,

$\operatorname{tg} \delta_o$ - $\operatorname{tg} \delta$ pri temperaturi u laboratorijskim uslovima.

t_o - temperatura u laboratorijskim uslovima, najčešće usvojena 20°C ,

a - koeficijent porasta $\operatorname{tg} \delta$ sa temperaturom.

Odvodjenje toplote vrši se najintenzivnije preko spoljašnje površine dielektrika S i proporcionalno je temperaturnoj razlici izmedju dielektrika i okoline u koju se odvodi toplota. Toplotna snaga :

$$Q_H = k(t - t_A)S \quad (3.20)$$

gde su:

Q_H - toplotna snaga hladjenja, koja se odvodi sa površine dielektrika u okolni ambijent,

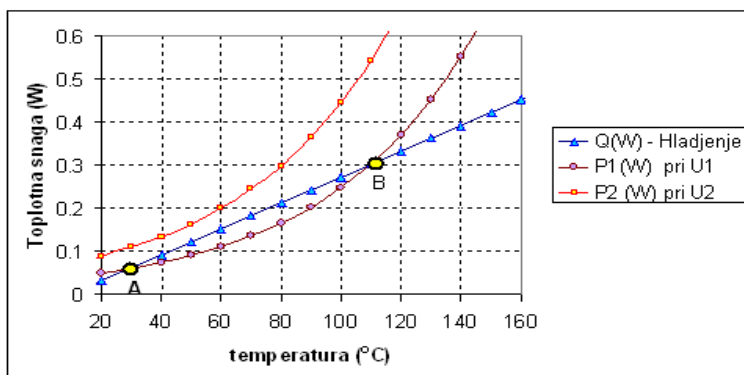
k - koeficijent odvodjenja toplote ($\text{W}/^\circ\text{C}$),

t - temperatura dielektrika,

t_A - temperatura okolnog ambijenta u koji se toplota odvodi,

S - površina dielektrika koja je u dodiru sa okolnim ambijentom sa koje se toplota odvodi.

Na slici 3.9 prikazane su toplote nastale usled dielektričkih gubitaka pri naponu U_1 i naponu U_2 koji je viši od U_1 . Takodje je prikazana toplotna snaga koja se odvodi usled hladjenja u okolinu Q_H .



Slika 3.9: Toplotna snaga nastala usled dielektričkih gubitaka pri naponu U_1 i naponu U_2 , kao toplotna snaga hladjenja

Toplotna ravnoteža može nastati samo u tačkama koje odgovaraju preseku krive zagrevanja i prave koja odgovara hladjenju. U slučaju krive zagrevanja P_1 postoje dve tačke preseka krive zagrevanja i krive hladjenja. Tačka A definiše režim toplotne ravnoteže. Pri malom porastu temperature snaga hladjenja postaje veća od snage zagrevanja P_1 , što dovodi do rashladjivanja dielektrika i vraćanje režima u tačku A . Ukoliko se dielektrik zagreje da radna tačka dospe u tačku B na slici 3.19, tada pri malom povećanju temperature oslobodjena snaga na dielektriku $P_2 > Q_H$, te dolazi do daljeg grejanja dielektrika. Ako se proces grejanja nastavi dalje, a ne preduzmu nikakve mere, dolazi do toplotnog proboja. Obrnuto, ako se temperatura smanji malo u odnosu na temperaturu u presečnoj tački B , tada je oslobodjena snaga $P_1 < Q_H$ i dolazi do hladjenja dielektrika dok se ne uspostavi stacionaran režim u tački A . Tačka A predstavlja stabilnu režimsku tačku, a tačka B nestabilnu.

Ukoliko ne postoji presek prave Q_H i krive oslobodjene snage P_2 , tada ne može da se uspostavi toplotna ravnoteža, već je u celom opsegu temperatura ispunjen uslov da je $P_2 > Q_H$, što dovodi do termičkog proboja.

Do povećanja temperature dielektrika može da dodje iz dva razloga:

1. zagrevanja dielektrika usled dielektričkih gubitaka,

2. zagrevanja dielektrika usled zagrevanja provodnika kroz koji protiče struja, koji je izolovan posmatranim dielektrikom.

U slučaju transformatora, kablova i drugih uređaja kod kojih postoje izolovani provodnici, do zagrevanja izolacije može da dodje zbog struje opterećenja i zbog dielektričkih gubitaka. Kada je uređaj neopterećen, tada se izolacija zagreva samo usled dielektričkih gubitaka, a kad je opterećen, tada oba procesa podižu temperaturu dielektrika. U slučaju kada dielektrički gubici podižu temperaturu dielektrika, tada se gubici povećavaju srazmerno sa U^2 , a kada struja opterećenja podiže temperaturu dielektrika, tada gubici rastu srazmerno sa I^2 .

Sistemi izolovanih provodnika u transformatorima, kablovima i drugim električnim uređajima imaju osobinu toplotne inercije. To znači da od trenutka kada snaga zagrevanja postane veća od snage hladjenja, potrebno je da protekne određeno vreme potrebno za zagrevanje dielektrika. Vremenske konstante zagrevanja su veoma različite i kreću se od nekoliko minuta za male uređaje do nekoliko sati za uređaje velikih dimenzija. Vremenska konstanta zagrevanja se najjednostavnije definiše kada se nekom sistemu koji je na temperaturi ambijenta dovede konstantna toplotna snaga ΔP koja ga greje, izazivajući porast temperature po eksponencijalnom zakonu:

$$\vartheta = \vartheta_{max} - (\vartheta_{max} - \vartheta_o) \cdot e^{-\frac{t}{T_i}} \quad (3.21)$$

gde su:

ϑ - temperatura dielektrika u posmatranom trenutku t ,

ϑ_o - temperatura ambijenta,

ϑ_{max} - maksimalna temperatura koja se postiže posle beskonačno dugog zagrevanja toplotnom snagom ΔP ,

ΔP - toplotna snaga koja zagreva dielektrik $\Delta P = P - Q = \text{const}$,

T_i - vremenska konstanta zagrevanja posmatranog sistema.

Ukoliko dodje do toplotnog debalansa i snaga zagrevanja prevaziđe snagu hladjenja, toplotni proboj ne nastupa trenutno. Ukoliko se primene mere hladjenja rasterećivanjem objekta ili na neki drugi način, može se sprečiti toplotni proboj dielektrika. Za kontrolu važnih elektroenergetskih uređaja kao što su na primer transformatori velikih snaga, ugradjuju se termometri koji šalju alarmni signal kada dodje do njihovog pregrevanja. Da bi se sprečio toplotni proboj dielektrika, treba primeniti određene mere od rasterećenja do isključenja, ukoliko je to neophodno. Ukoliko transformator radi na povišenom naponu i snabdeven je regulatorom napona, tada se može intervenisati snižavanjem napona.

3.4 Elektrohemijski proboj čvrstih dielektrika

Elektrohemijski proboj čvrstih dielektrika predstavlja proces koji je dugotrajan i dovodi do degradacije dielektrika usled postepenih hemijskih promena unutar i po površini čvrstog dielektrika. Razlikujemo nekoliko pojava koje se mogu svrstati u elektrohemijski proboj. To su:

- parcijalna pražnjenja,
- treeing (grananje) koje se najčešće javlja u izolaciji kablova,
- tracking (erozija) se javlja na površini čvrstog izolatora izloženog spoljašnjim atmosferskim uticajima i dejstvu električnog polja.

Svaki od ovih procesa je pojava koja izaziva starenje dielektrika i skraćuje njegov vek. To znači da ove pojave ne predstavljaju kvar izolacionog sistema, već njegovo loše stanje.

3.4.1 Parcijalna pražnjenja

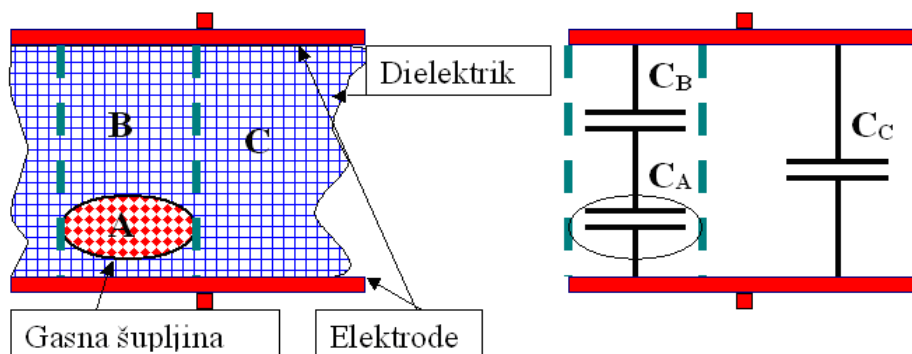
Nastanak parcijalnih pražnjenja

Parcijalna pražnjenja su proces izazvan dejstvom jonizacionih pojava u gasnim šupljinama u čvrstom dielektriku. Aktivni produkti jonizacije gasa u šupljini čvrste izolacije mogu izazvati hemijsko dejstvo na čvrsti dielektrik izazivajući njegovu degradaciju. Najpoznatiji produkt koji može da izazove degradaciju dielektrika u šupljini je ozon.

Jonizacioni procesi u gasnim šupljinama čvrstih dielektrika imaju lokalni karakter. Njima se u novije vreme pridaje veliki značaj zbog toga što se na osnovu njihove detekcije i praćenja može sagledati stanje izolacije. Merenje parcijalnih pražnjenja je jedna od metoda koja se koristi za preventivno održavanje elektroenergetske opreme.

Da bi objasnili nastanak parcijalnih pražnjenja, na slici 3.10 prikazan je presek čvrstog dielektrika sa prisutnom gasnom šupljinom (levo) i ekvivalentna električna šema dielektrika sa šupljinom (desno). Na slici 3.10 levo slovom **A** obeležena je gasna šupljina, slovom **B** cilindar prečnika gasne šupljine u zapremini dela dielektrika van gasne šupljine. Slovom **C** obeležen je prostor ostalog dela dielektrika.

Na slici 3.10 desno prikazana je ekvivalentna šema dielektrika sa šupljinom. Gasni mehur ima kapacitet C_A , a kapacitet ostalog dela dielektrika u cilindru van šupljine **B** ima

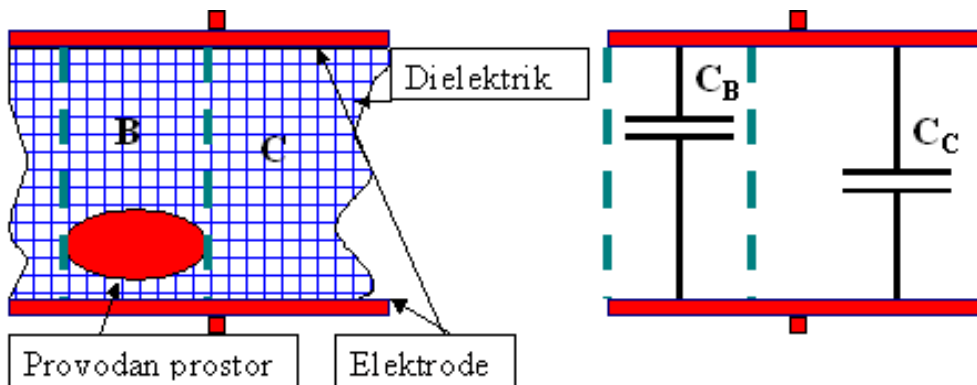


Slika 3.10: presek čvrstog dielektrika sa prisutnom gasnom šupljinom (levo) i ekvivalentna električna šema dielektrika sa šupljinom (desno)

kapacitet C_B . Kapacitet ostalog dela dielektrika je C_C . Pre nego što nastupi jonizacija u šupljini, ukupni ekvivalentni kapacitet sa slike 3.10 desno je:

$$C_{ekv1} = \frac{C_A C_B}{C_A + C_B} + C_C \quad (3.22)$$

Pri dovoljno visokom naponu u gasnom mehurima nastaje jonizacija, odnosno delimično pražnjenje. Tog trenutka se ekvivalentna šema menja jer kapacitet C_A je u šemi kratko spojen, kao na slici 3.11. Na slici 3.11 prostor gasne šupljine je jonizovan i smatra



Slika 3.11: Presek čvrstog dielektrika sa kratko spojenim gasnim mehurima i ekvivalentna električna šema dielektrika bez šupljine (desno)

se provodnim. Zbog toga kondenzator C_A je kratko spojen i ukupan kapacitet cilindra oko šupljine postaje C_B . Jonizacija gasnog mehura dovodi do povećanja ukupnog ekvivalentnog kapaciteta dielektrika na vrednost:

$$C_{ekv2} = C_B + C_C \quad (3.23)$$

Zbog promene kapaciteta dielektrika za vrednost:

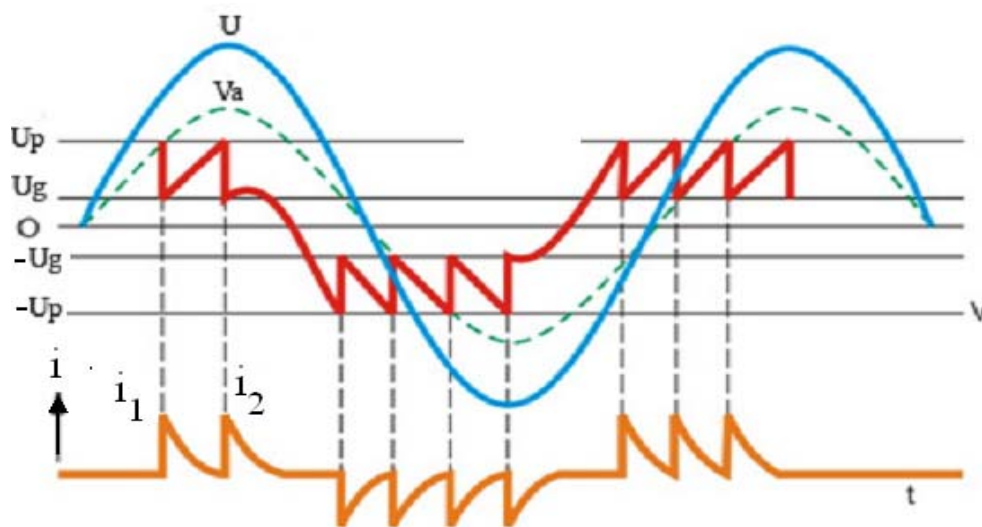
$$\Delta C = C_{ekv2} - C_{ekv1} \quad (3.24)$$

dolazi do proticanja količine elektriciteta kroz kolo:

$$\Delta Q = \Delta C \times U \quad (3.25)$$

gde je U napon koji vlada izmedju elektroda na dielektriku. Količina elektriciteta ΔQ je merilo intenziteta parcijalnih pražnjenja i naziva se prividnom količinom elektriciteta parcijalnih pražnjenja.

Na slici 3.12 prikazan je pun napon na dielektriku (sinusoida A) i deo napona koji se pojavljuje na gasnom mehuri (kriva B). Kad napon postane veći od podnosivog napona gasnog mehura (prava **P** na slici 3.12), pali se električna iskra u mehuru, nakon čega napon opada do napona gašenja (prava **G**) i ponovo počinje da raste napon. Proces pražnjenja u gasnom mehuru se ponavlja. Zbog toga se parcijalna pražnjenja pojavljuju kao serija sukcesivnih pražnjenja kao na slici 3.12. U negativnoj poluperiodi se pojava ponavlja, stim što do paljenja iskre dolazi onda kada napon na šupljini po apsolutnoj vrednosti poraste iznad napona paljenja **-P**, a posle toga opada na **-G**. Strujni impulsi se pojavljuju uvek



Slika 3.12: Dijagram napona na dielektriku i na šupljini pri procesu uzastopnih parcijalnih pražnjenja

kada dodje do paljenja iskre na šupljini, i nacrtani su ispod dijagrama napona. Prvi u nizu strujnih impulsa obeležen je slovom i_1 , a drugi u istoj poluperiodi i_2 . U toku poluperiode može da se pojavi više desetina uzastopnih paljenja parcijalnih pražnjenja, ali su zbog jednostavnosti prezentacije na slici 3.12 prikazana samo po 2 do 4 paljenja u svakoj poluperiodi.

Grananje (treeing)

Sa početkom korišćena kablova sa izolacijom od umreženog polietilena koji se označavaju kao XLPE kablovi, uočena je pojava da umreženi polietilen koji je izolator izuzetno dobrih izolacionih karakteristika u pojedinim slučajevima pokazuje naglu degradaciju posle nekoliko godina eksploatacije. Nakon opsežnih istraživanja utvrđeno je da ukoliko u zapremini dielektrika postoji zaprljanje u vidu čvrstog ugruška, tečnog (najčešće vodenog) ili gasnog mehura, tada ta primesa može da izazove nastanak hemijske degradacije u vidu pojave pukotina u vidu grančica koje se šire od mesta ugruška granajući se i šireći dok ne dodje do druge elektrode. Na slici 3.13 prikazan je presek materijala u kome se pojavilo grananje usled jakog električnog polja na graničnoj površini. Danas se problem grananja rešava



Slika 3.13: Fotografija preseka izolacije sa izraženim oštećenjem u obliku grananja

promenom tehnološkog postupka izrade koji onemogućava pojavu vlage unutar izolacije i posebnim merama održavanja čistoće kako sirovina, tako i u toku same proizvodnje. U pukotinama u izolaciji koje nastaju grananjem javljaju se veoma intenzivna parcijalna pražnjenja.

Ukoliko je površina dielektrika izložena naponu i istovremeno delovanju hemijskih agenasa iz atmosfere ili ozonu kao posledici pužajućih pražnjenja, javlja se na pojedinim materijalima pojava koju nazivamo erozija (engl. tracking), koja ima veoma sličnu prirodu i posledice kao grananje.

3.4.2 Merenje parcijalnih pražnjenja

Metode merenja parcijalnih pražnjenja se mogu podeliti na sledeće osnovne grupe prema ulozi koju imaju i načinu ispitivanja:

- laboratoriska merenja, koja se rade kod novih uređaja prilikom tipskih ili serijskih ispitivanja ili nakon servisiranja uređaja iz pogona, koja se sprovode u visokonaponskim laboratorijama,
- merenja na terenu, sa isključenjem uređaja, ali bez transporta u laboratoriju,
- merenja na terenu u pogonu, bez isključivanja uređaja.

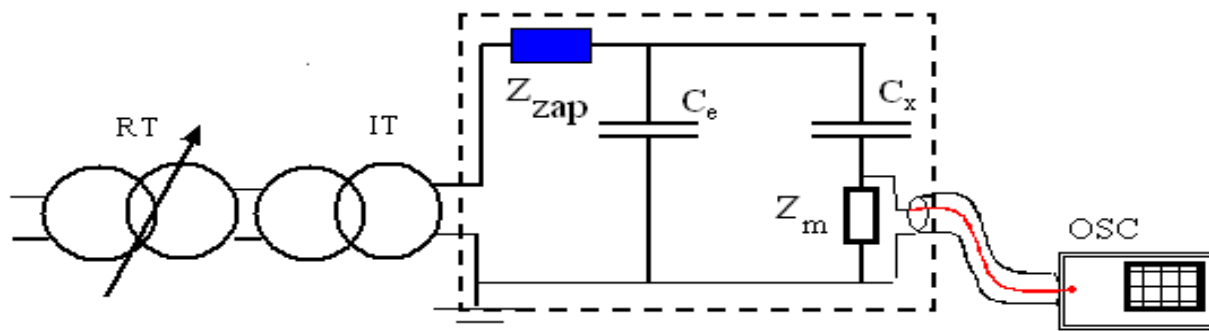
Merenja parcijalnih pražnjenja se mogu prema načinu merenja podeliti dva tipa:

- direktna električna merenja,
- indirektna merenja.

Pod direktnim električnim merenjima podrazumeva se merenje struje kroz objekat koji se ispituje i detektuju visokofrekvencijski impulsi koji su posledica parcijalnih pražnjenja. Ove metode su veoma osetljive na elektromagnetne smetnje iz spoljašnje okoline koje je potrebno eliminisati. Indirektno metode koriste kao kriterijum druge fizičke veličine koje mogu nositi informaciju o parcijalnim pražnjenjima. To su električno ili magnetsko polje koje će sadržati visokofrekvencijske komponente u slučaju parcijalnih pražnjenja, kao i zvučne efekte (ultrazvučna metoda).

3.4.3 Direktna električna metoda za merenje parcijalnih pražnjenja

Direktna metoda merenja parcijalnih pražnjenja se primenjuje samo u laboratorijskim uslovima i zahteva pažljivu primenu ekraniranja objekta i merne šeme od spoljašnjih elektromagnetnih uticaja. Kolo za merenje parcijalnih pražnjenja se sastoji od izvora naizmeničnog napona za šta se koristi ispitni transformator IT . Visina napona može da se reguliše pomoću regulacionog transformatora RT . Iz ispitnog transformatora se napaja ispitni objekat koji je na slici 3.14 označen kondenzatorom C_x , preko impedanse koja ne propušta visoke učestanosti Z_{zap} . Ova impedansa služi kao zaprečni filter za visoke učestanosti, koji ne dozvoljava da visokofrekventni impulsi nastali na objektu ispitivanja C_x odu preko transformatora IT u mrežu, a takodje da spreče eventualni nailazak visokofrekventnih smetnji iz mreže u merno kolo. Paralelno sa ispitnim objektom C_x postavljen je etalon kondenzator C_e koji ne sme da ima parcijalna pražnjenja. Visokofrekventne struje parcijalnih pražnjenja se zatvaraju kroz kolo koje čine kondenzatori C_x , C_e i merna impedansa Z_m koja je takodje nepropusnik visokih učestanosti. Iako su visokofrekventni strujni impulsi nastali usled parcijalnih pražnjenja male amplitude, oni proizvode padove napona na mernoj impedansi Z_m , koja je najčešće induktivni

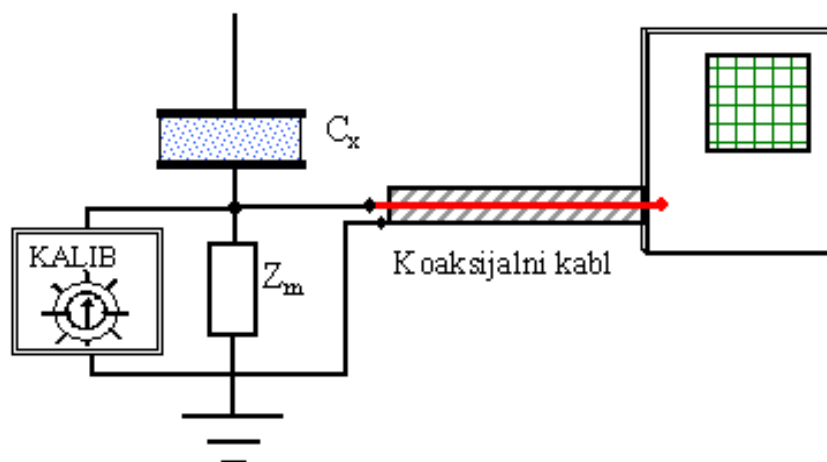


Slika 3.14: Šema mernog kola za merenje parcijalnih pražnjenja direktnom električnom metodom

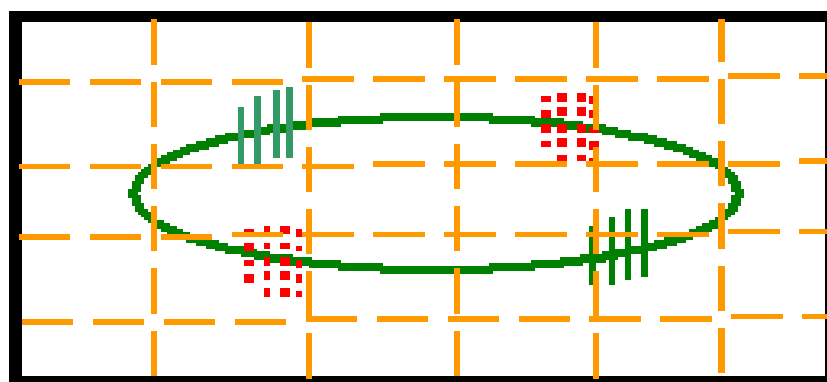
kalem, dovoljne amplitude da mogu lako da budu registrovani. Kompletno merno kolo postavljeno je u Faradejev kavez da bi se sprečile spoljašnje elektromagnetne smetnje. U zavisnosti od očekivane osetljivosti merenja, Faradejev kavez se pravi od mreže provodnika ili od metalnih ploča. Na šemi na slici 3.14 Faradejev kavez označen je isprekidanom linijom oko mernog kola.

Nivo parcijalnih pražnjenja se izražava u pC, a vrednosti se kreću od nekoliko pC za kablove sa polietilenskom izolacijom do nekoliko stotina pC, pa i preko 1000 pC za transformatore u ulju.

Merenje intenziteta parcijalnih pražnjenja vrši se upoređivanjem veličine izmerenih impulsa usled parcijalnih pražnjenja na osciloskopu sa veštački generisanim impulsima iz specijalnog izvora koji nazivamo kalibratorom. Šema primene kalibratora predstavljena je na slici 3.15, koji je na slici označen blokom "KALIB". Merenje impulsa parcijalnih pražnjenja vrši se pomoću osciloskopa kod koga se na vertikalni ulaz dovodi signal sa merne impedanse Z_m u obliku sinusnog napona 50 Hz na koji su superponirani visokofrekvencijski impulsi parcijalnih pražnjenja. Umesto vremenske baze na horizontalni otklonski sistem se dovodi sinusni napon iste učestanosti. Kao rezultatna slika na osciloskopu se dobija elipsa kod koje se vide vertikalni impulsi koji odgovaraju padovima napona na mernoj impedansi usled struje parcijalnih pražnjenja. Na slici 3.16 prikazan je ekran osciloskopa sa elipsom i dva para povorki impulsa. Par povorki impulsa koji su označeni punim linijama bi se na osciloskopu video kao stabilna slika vertikalnih linija koja neprekidno stoji na istom mestu. Ovi signali potiču iz kalibratora. Naprotiv, isprekidana crvena povorka impulsa bi se na osciloskopu videla kao pulsirajuće linije iste boje kao i iz kalibratora, čiji položaj na elipsi nije stabilan. Ovi signali potiču od parcijalnih pražnjenja.



Slika 3.15: Šema za merenje parcijalnih pražnjenja pomoću kalibratora



Slika 3.16: Slika na ekranu osciloskopa sa parom vertikalnih snopova punih linija koje odgovaraju signalu iz kalibratora i parom vertikalnih snopova isprekidanih linija koje odgovaraju signalu parcijalnih pražnjenja

3.4.4 Diferencijalna električna metoda za merenje parcijalnih pražnjenja

Diferencijalna električna metoda ima prednost nad direktnom električnom metodom za merenje parcijalnih pražnjenja jer je manje osetljiva na spoljašnje smetnje. Merna šema je veoma slična kao i kod direktne metode, jedina razlika je što u grani sa etalon kondenzatorom C_e takodje smeštena merna impedansa, prema slici 3.17. Oznake na slici imaju sledeće značenje:

Z_{m1} merna impedansa propusnik niskih učestanosti (najčešće induktivni kalem) koja se nalazi u grani sa etalon kondenzatoom,

Z_{m2} merna impedansa propusnik niskih učestanosti koja se nalazi u grani sa ispitivanim objektom,

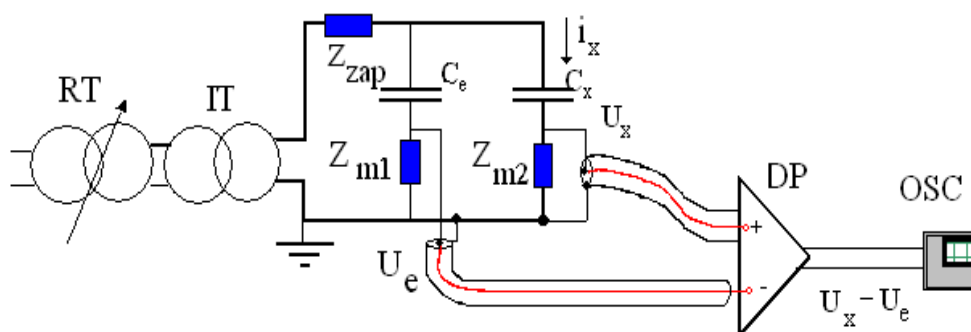
DP diferencijalni pojačavač na koji se dovode signali sa merne impedanse etalon kondenzatora i merne impedanse objekta ispitivanja,

U_e naponski signal sa merne impedanse etalon kondenzatora,

U_x naponski signal sa merne impedanse objekta ispitivanja.

i_x - struja usled parcijalnih pražnjenja u obliku povorke visokofrekventnih impulsa, koja protiče kroz kondenzator C_x i zatvara se kroz kondenzator C_e .

Razlika napona $U_x - U_e$ meri se na osciloskopu. Ukoliko na objektu ispitivanja predstavljenom kondenzatorom C_x postoje parcijalna pražnjenja, ona će generisati struju u obliku povorke visokofrekventnih impulsa. Kada se mere padovi napona na mernim



Slika 3.17: Zamenska šema mernog sistema za merenje parcijalnih pražnjenja diferencijalnom metodom

impedansama Z_{m1} i Z_{m2} usled proticanja struje i_x parcijalnih pražnjenja iz objekta C_x koja se zatvara kroz etalon kondenzator C_e , tada su smerovi padova napona suprotni na Z_{m1} i Z_{m2} , jer struja i_x ima orijentaciju na više u grani sa C_e . Struja i_x ne može da se zatvori kroz napojni transformator zbog zaprečne impedanse Z_{zap} . Pošto su naponi izmereni na mernim impedansama Z_{m1} i Z_{m2} različitih polariteta, njihovim oduzimanjem na diferencijalnom pojačavaču se napon parcijalnih pražnjenja udvostručava.

Ako se iz spoljašnje sredine indukuju smetnje, one će izazvati struje istog polariteta u granama sa objektom C_x i etalon kondenzatorom C_e , pa će padovi napona na mernim impedansama biti identični. Zbog toga izlazni napon iz diferencijalnog pojačavača DP će slati razliku napona smetnji na osciloskop. Na ovaj način diferencijalnim merenjem poništavaju se signali smetnji, a sabiraju signali parcijalnih pražnjenja.

Primenom diferencijalne metode, uz odgovarajuće podešavanje mernih impedansi da budu u saglasnosti sa kapacitetima kondenzatora etalona i merenog objekta mogu se raditi laboratorijska merenja bez posebnih elektromagnetnih ekrana.

3.4.5 Metode indirektnog merenja parcijalnih pražnjenja

Merenje parcijalnih pražnjenja preko električnog polja

Sonda za merenje parcijalnih pražnjenja indirektnim putem predstavlja uređaj koji se bazira na detekciji visokofrekvencijskih promenljivih električnih ili magnetnih polja ili ultrazvuka koja potiču od parcijalnih pražnjenja, mada takva polja mogu nastati i iz drugih razloga. Primenom odgovarajućih filtera postiže se izdvajanje onih frekvencija čiji je uzrok najverovatnije parcijalno pražnjenje. Uređaj može da se koristi sa više različitih senzora, u zavisnosti od toga koji se princip merenja koristi. Merena veličina i kod sonde je prividno naelektrisanje parcijalnog pražnjenja izraženo u pC.

Koriste se četiri principa za detekciju parcijalnih pražnjenja:

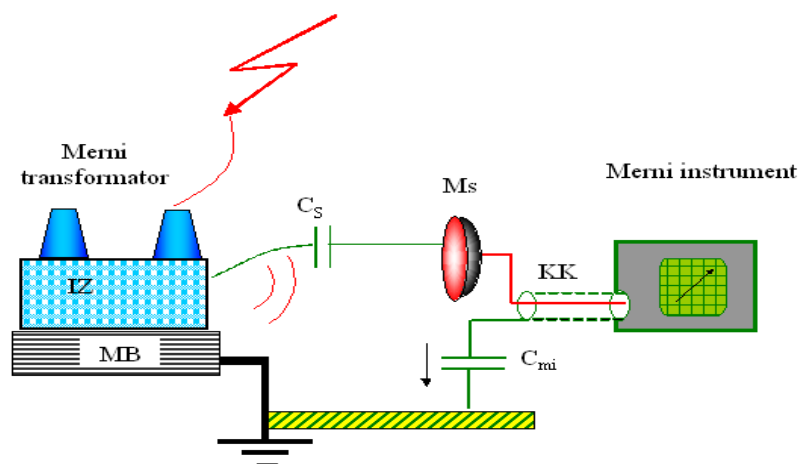
- Kapacitivna sprega (C-senzor),
- Diferencijalna kapacitivna sprega (C-senzor),
- Induktivna sprega (L-senzor),
- Ultrazvučna metoda.

Indirektne metode se koriste za merenja na terenu kada su uređaju koji se ispituju u pogonu. Ovakva dijagnostička ispitivanja se nazivaju preventivnim održavanjem, jer se vrše u pogonu dok su svi uređaji ispravni. Dijagnostika i mere koje se preduzimaju nakon kvara nekog elementa nazivaju se korektivnim održavanjem.

Merenje parcijalnih pražnjenja preko magnetnog polja

Na slici 3.18 prikazana je kapacitivna merna sprega sonde za merenje električnog polja prilikom merenja parcijalnih pražnjenja na naponskim mernim transformatorima, kada je merni instrument izolovan od zemlje.

Oznake na slici 3.18 imaju sledeće značenje:



Slika 3.18: Primena kapacitivne sprege za merenje parcijalnih pražnjenja merenjem električnog polja

C_s ekvivalentna kapacitivnost između mernog transformatora i kapacitivne sonde,

M_s kapacitivne merna sonda u obliku tanjira,

KK koaksijalni kabl do mernog instrumenta,

C_{mi} -kapacitivnost mernog instrumenta i plašta koaksijalnog kabla prema zemlji, pošto je kućište instrumenta izolovano od zemlje,

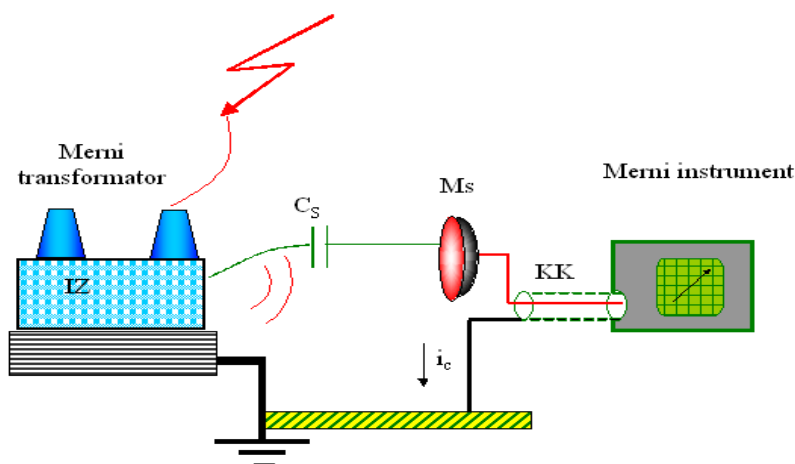
IZ izolovani deo mernog transformatora u kome se mere parcijalna pražnjenja,

MB metalna baza (kućište) mernog transformatora koje mora da bude uzemljeno i u kome se nalazi sam transformator sa sekundarnim priključcima.

Unutar izolovanog dela mernog transformatora koji se pravi kod suvih konstrukcija od araldita, nalazi se zaliven aktivan deo. Prilikom livenja i zalivanja aktivnog dela izolacijskom smolom mogu se pri neadekvatnoj proizvodnji pojaviti mehurovi ili druge nečistoće koje mogu da prouzrokuju parcijalna pražnjenja.

Na slici 3.19 prikazana je kapacitivna merna sprega sonde za merenje električnog polja prilikom merenja parcijalnih pražnjenja na naponskim mernim transformatorima, kada je merni instrument vezan za zemlju bilo preko posebnog uzemljivačkog provodnika (zemljovoda) ili preko rukovaoca koji nema dobro izolovanu obuću.

Oznake na slici 3.19 imaju identične oznake kao i na predhodnoj, osim što je merni uređaj uzemljen. Snimaju se samo visokofrekvencijske komponente signala električnog polja (odnosno kapacitivne struje koje protiču kroz sprežnu kapacitivnost C_s) koje potiču



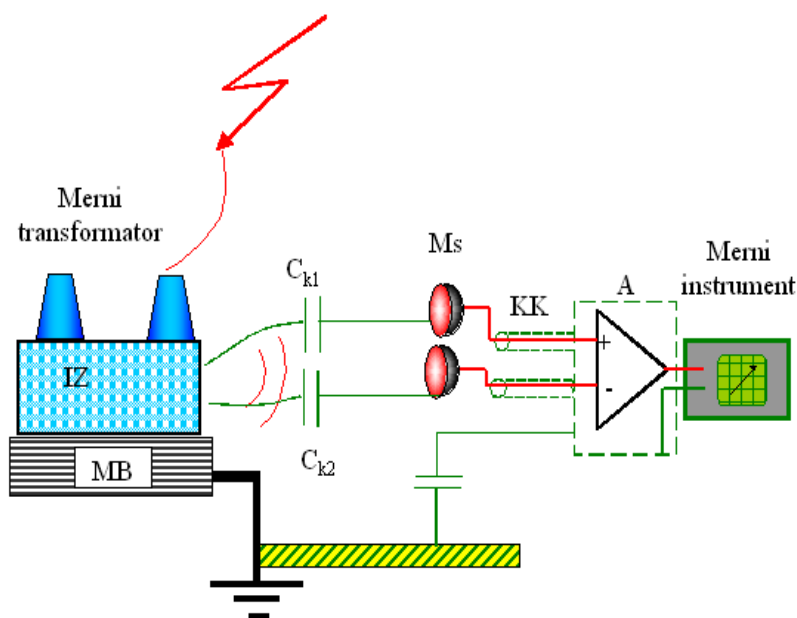
Slika 3.19: Primena kapacitivne sprege za merenje parcijalnih pražnjenja sa uzemljenim mernim instrumentom

od strujnih impulsa nastalih parcijalnim pražnjenjima. Da bi se eliminisale smetnje usled drugih uzroka, vrši se filtriranje signala kroz odgovarajuće filtre da bi se pojačale tipične učestanosti signala koji potiču od parcijalnih pražnjenja. U oba slučaja se ne može lokalizovati mesto parcijalnog pražnjenja, već se može konstatovati postojanje i proceniti intenzitet.

Merenje pacijalnih pražnjenja preko električnog polja diferencijalnom metodom

Diferencijalna indirektna metoda merenja parcijalnih pražnjenja preko električnog polja omogućava lokalizaciju pražnjenja. Šema metode prikazana je na slici 3.20.

Sa slike 3.20 se vidi da dve kapacitivne sonde M_s primaju signale srazmerne brzo promenljivom električnom polju koje emituje objekat merenja. Signali te dve sonde oduzimaju u diferencijalnom pojačavaču A i rezultatni signal se meri. Ukoliko obe sonde primaju iste visokofrekvencijske (VF) signale, njihova razlika se poništava, što znači da je izvor VF signala daleko od istraživane lokacije. Ukoliko je izvor VF električnog polja blizu lokacije na kojoj se istražuju parcijalna pražnjenja, jedna sonda će primati jači signal od druge, pa će instrumenat detektovati signal. Signali se mere u odnosu na kućište instrumenta, koje je kapacitivno spregnuto sa zemljom. Primena diferencijalne kapacitivne sprege ograničena je samo na visokonaponske objekte gde se može sondom prići objektu na bezbednosno rastojanje. Sa druge strane preciznost lokacije pražnjenja se povećava ukoliko se pridje bliže objektu koji se analizira. To znači da se diferencijalnom sondom sme prilaziti uzemljenom kućištu ili izolatoru neposredno uz kućište visokonaponskih mernih transformatora. Kod inverznih naponskih mernih transformatora kod kojih je kućište pod



Slika 3.20: Primena kapacitivne sprege za merenje parcijalnih pražnjenja diferencijalnom metodom

visokim naponom primena diferencijalne kapacitivne sprege je nepodesna.

Merenje parcijalnih pražnjenja pomoću magnetnog polja

Za merenje parcijalnih pražnjenja se može koristiti induktivni senzor, koji radi na principu kalema Rogovskog. Magnetno polje oko provodnika, koji služi kao zemljovod od ispitivanog objekta ka zemlji, detektuje se pomoću senzora u obliku petlje u kojoj se indukuju naponi srazmerni brzini promene fluksa. Kako parcijalna pražnjenja izazivaju visokofrekvencijske struje malog intenziteta koje protiču kroz zemljovod, pod njihovim uticajem se u senzorskoj petlji indukuju visokofrekvencijski naponski signali srazmerni brzini promene fluksa u mernoj petlji, koji su srazmerni amplitudi i frekvenciji struje.

Glavne prednosti primene induktivnog senzora su sledeće:

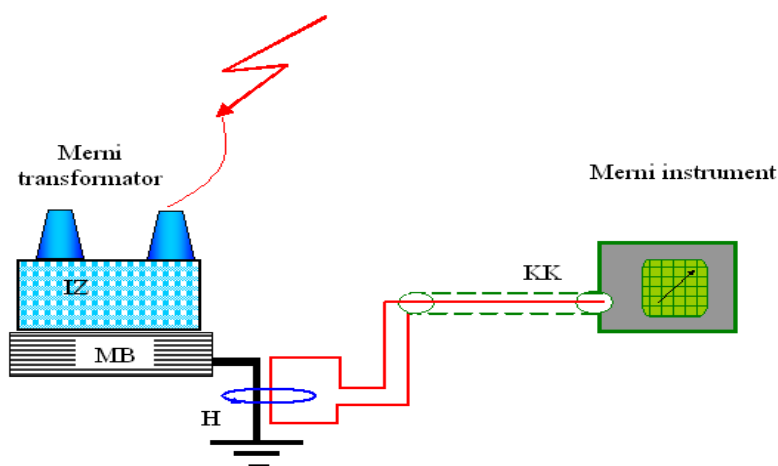
- Objekat koji se ispituje je u normalnom pogonu,
- Nema galvanskog kontakta sa delovima koji su pod visokim naponom,
- Nema potrebe za sprežnim kondenzatorom

Zbog jednostavnosti procedure može se brzo ispitati kompletno postrojenje.

Mane primene induktivnog senzora su sledeće:

- Ne postoji mogućnost lokacije mesta pražnjenja,
- Mora da postoji pristupačan zemljovod.

Sonda se postavlja paralelno provodniku kao na slici 3.21. Nije potrebno provlačiti provodnik kroz otvor sonde.



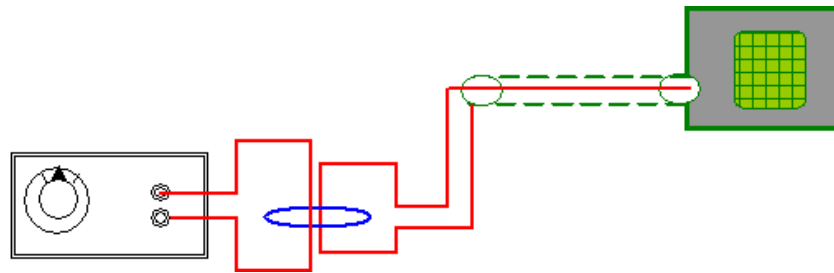
Slika 3.21: Induktivna merna sprege sonde i zemljovoda za merenja parcijalnih pražnjenja

Na slici 3.21 oznaka H odnosi se na vektor jačine magnetnog polja.

3.4.6 Kalibrisanje sonde za indirektna merenja parcijalnih pražnjenja

Pri primeni induktivne sprege za merenje parcijalnih pražnjenja koristi se kalibrator koji ima svoju omčastu antenu, uz koju se na isto rastojanje kao kod merenja na terenu stavlja antena u obliku omče senzora, kao na slici 3.22. Intenzitet parcijalnih pražnjenja se bira pre početka kalibracije izborom opsega signala parcijalnih pražnjenja koje očekujemo.

Kalibracija se vrši na taj način što se puštaju strujni impulsi u petlju uz koju se postavlja ram senzora za magnetnu indukciju.



Slika 3.22: Primena kalibratora za kalibrisanje induktivnog senzora

Sadržaj

I Dielektrici	1
1 Mehanizam pražnjenja u gasovitim dielektricima	3
1.1 Uvod	3
1.2 Jonizacija u gasovima	4
1.2.1 Udarne jonizacije u prostoru sa gasom	6
1.2.2 Fotojonizacija u prostoru gasa	8
1.2.3 Termicka jonizacija u zapremini gasa	8
1.2.4 Površinska jonizacija	10
1.2.5 Rekombinacija	13
1.2.6 Sekundarne jonizacije	13
1.2.7 Pražnjenje u neravnomernom polju	14
1.2.8 Uticaj pritiska na razvoj pražnjenja	16
1.3 Preskočni napon u vazduhu	18
1.3.1 Slučajna priroda preskoka	18
1.3.2 Volt-sekundna karakteristika preskočnog napona	19

1.3.3	Definicija udarnih napona	22
1.3.4	Uticaoaj atmosferskih uslova na preskočni napon	25
1.4	Preskočni napon po površini čvrste izolacije	27
1.4.1	Fizičko tumačenje pojave	27
1.4.2	Izolatori za zagadjena područja	31
2	Tečni dielektrici	37
2.1	Polarnost dielektrika	38
2.1.1	Električna provodnost tečnih dielektrika	41
2.1.2	Dielektrična konstanta	44
2.1.3	Dielektrični gubici	46
2.1.4	Dielektrična čvrstoća	47
3	Čvrsti dielektrici	55
3.1	Uvod	55
3.2	Električne karakteristike čvrstih dielektrika	56
3.2.1	Električna otpornost	56
3.2.2	Dielektrična konstanta	60
3.2.3	Dielektrični gubici	62
3.2.4	Dielektrična čvrstoća	64
3.3	Mehanizam proboja čvrstih dielektrika	64
3.3.1	Električni proboj čvrstih dielektrika	64
3.3.2	Termički proboj čvrstih dielektrika	67

3.4	Elektrohemijski proboj čvrstih dielektrika	70
3.4.1	Parcijalna pražnjenja	70
3.4.2	Merenje parcijalnih pražnjenja	73
3.4.3	Direktna električna metoda za merenje parcijalnih pražnjenja . . .	74
3.4.4	Diferencijalna električna metoda za merenje parcijalnih pražnjenja .	76
3.4.5	Metode indirektnog merenja parcijalnih pražnjenja	78
3.4.6	Kalibrisanje sonde za indirektna merenja parcijalnih pražnjenja . .	82