

4.5. Пробив во диелектриците

5.5.1. Увод

Ако јачината на електричното поле во диелектрикот надмине некоја критична вредност, диелектрикот го губи својството на електроизолационен материјал. Оваа појава се вика **пробив** во диелектрикот или губиток на неговата електрична цврстина. Вредноста на напонот при кој настанува оваа појава се вика **пробивен напон**, а соодветната јачина на ел. поле се вика **електрична (диелектрична) цврстина** на диелектрикот. Ако на местото на пробивот на диелектрикот постои дебелина h важи:

$$E_{pr} = \frac{U_{pr}}{h} \quad (4.78)$$

каде U_{pr} е пробивниот напон, а E_{pr} е електричната цврстина. Електричната цврстина се изразува во kV/mm или MV/m. Притоа важи: $1 \text{ MV/m} = 1 \text{ kV/mm} = 10^6 \text{ V/m}$.

Треба да се напомене дека губењето на електричната цврстина нема исти последици кај диелектрици од разна агрегатна состојба. Додека кај гасовитите и течните (флуидите) после престанокот на јакото поле диелектрикот пак си ја повраќа електричната цврстина (самообновливи диелектрици во поглед на електричната цврстина), кај тврдите диелектрици настанува трајно губење на цврстината, бидејќи настанува прогорување на истите во вид на канал со изменети ел. својства (прогорување, јазгленисување, механичко разрушување и сл.). Тоа не станува во целиот обем на изолацијата, туку локално на некое место (каналче).

4.5.2. Пробив во гасовите

Гасовите се користат како изолатори во електричните конструкции, а особено воздухот (напр. водови за висок напон, надворешна изолација кај трансформатори и апарати за висок напон). Електричната цврстина на воздухот во однос на онаа на течните и цврстите диелектрици е релативно помала.

Видовме дека во гасот се присутни слободни полнежи-електрони и јони добиени по пат на делување на страни влијанија. Под дејство на ел. поле E истите се движат и на пат еднаков на средната должина на слободниот пат λ (просечен пат меѓу два последователни судари со молекулите на гасот) еден електрон (со товар q) придобива енергија:

$$W = Eq\lambda \quad (4.79)$$

Ако енергијата W е доволно голема, електронот може при судирот со некоја молекула да ја предаде својата енергија и истата ја доведе во побудена состојба, а може и да ја јонизира ако располага со доволна енергија, т.е. да ја раздели на еден електрон и позитивен јон. За ова е потребна енергија $W > W_j$.

Енергијата на јонизација W_j обично ја изразуваме преку јонизациониот потенцијал U_j

$$U_j = \frac{W_j}{q} \quad (4.80)$$

Јонизациониот потенцијал за мнозинството гасови се движи од 4 до 25 V, а ова одговара на енергија од 4-25 eV. Опишаната појава се вика судирна јонизација.

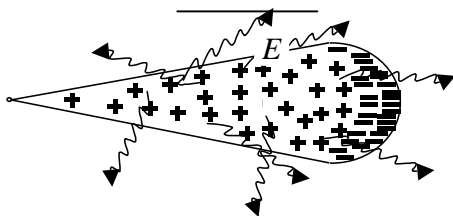
При зададен притисок и температура на гасот, судирната јонизација почнува при одредена јачина на полето E_j , бидејќи q и λ се константи. Оваа вредност на полето се вика **почетна јачина на полето**.

Кај некои гасови каков што е кислородот (и воздухот бидејќи содржи кислород), CO_2 , водената пареа, сулфурен хексафлуорид (SF_6), слободните електрони имаат афинитет за припојување кон неутралните молекули на гасот и се градат негативни јони. Ова се т.н. електронегативни гасови, и бидејќи го намалуваат расположивиот број слободни електрони кои се на располагање да го продолжат процесот на судирната јонизација, истите имаат релативно повисока диелектрична цврстина. Кај инертните гасови оваа појава не постои.

Како резултат на судирната јонизација бројот на јони и електрони се зголемува **лавинаобразно** и во многу кусо време се создаваат голем број електрони и позитивни јони, на пример, за случајот на воздухот, тоа се: O^+ , O_2^+ , N_2^+ , N^+ , NO^+ , сл. 4.38.

Пресметките покажуваат дека практично судирната јонизација ја обавуваат слободните електрони, бидејќи тие се многу подвижни и успеваат да насоберат доволна енергија (постигаат брзина $v=1000 \text{ km/s}$), додека настанатите позитивни јони се троми. Улогата на позитивните јони е важна само при нивниот удар во негативната електрода, при што тие од електродата може да избијат слободни електрони.

Во процесот на празнење во гасот битна улога има и фотојонизацијата. При судирите на електроните со неутралните молекули може да настани само побудување на истите, без да ги јонизираат. Возбудените молекули излучуваат фотон за сметка на вишокот на енергија, а фотонот се движи со голема брзина низ гасот ($v = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$) и при удар во неутрална молекула тој може да предизвика јонизација - при што се создава нов слободен електрон на подалечно место од **лавината** која се развива. На овој принцип се објаснува поголемата брзина на развивање на пробивот, одошто е брзината на растење на лавината, (сл.4.39, должината AD е поголема од до



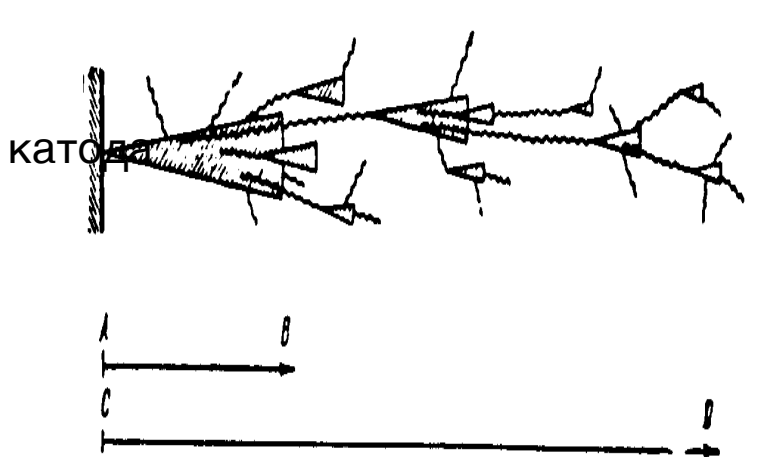
сл.4.38 Слика на една електронска лавина. Во “главата” се лесно подвижните електрони, а во “опашката” се позитивните јони

Опишаните процеси на судирна јонизација образуваат во гасот лавини од електрони кои зад себе оставаат конусовиден облак исполнет со спородвижечки позитивни јони, а преку фотојонизацијата низ гасот повеќе лавини успеваат да се поврзат во т.н. „стример“, како збир на лавини кои се проводна врска меѓу електродите.

Штом стримерот ја допре анодата, настануваат дополнителни јонизациони процеси кои доведуваат до тоа, каналот да се обогати со јони и

електрони, постане многу проведен и се претвори во тенка нишка на т.н. плазма, во која владее висока температура. Како резултат на сите овие процеси настанува пробив во гасот - создавање на проводна патека меѓу двете електроди.

Дали појавата “пробив” ќе се манифестира како прескок на електрична искра, искра која се пали и гаси, или пак во електричен лак кој гори континуирано, зависи од карактеристиките (од импедансата) на надворешното електрично коло кое го создава напонот на електродите. Ако е импедансата мала, појавата се манифестира како моќен енергетски лак, а ако импедансата е голема, појавата ќе се манифестира како слаб лак или искра кој не може да гори континуирано.



сл.4.39: Шема на образување на стример при пробив во гасот
Примарната лавина која настанала заради судирна јонизација во силно поле, преку фотојонизација стартува секундарни лавини подалеку во меѓуелектродното растојание.

е пробојниот напон за напон со фреквенција 50 Hz.

Пробивот во гасови зависи од степенот на хомогеноста на електричното поле. Во хомогено поле пробивот настанува практички моментално, штом напонот ја постигне критичната вредност.

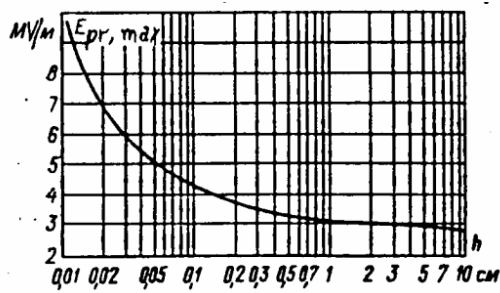
Ако растојанието меѓу електродите е мало, се забележува знатно зголемување на електричната цврстина на воздухот, сл.4.40.

Ова се објаснува со фактот што при мали растојанија меѓу електродите тешко се формира електрично празнење - мала е веројатноста за електроните при движењето од едната електрода до другата да претрпат судир со неутралните молекули на гасот. Така, при нормални атмосферски услови (притисок 0,1 МПа, температура 20°C) електричната цврстина на воздухот при растојание на електродите од 1 cm во хомогено поле е околу 3 MV/m, а при 0,005 mm достигнува до 70 MV/m.

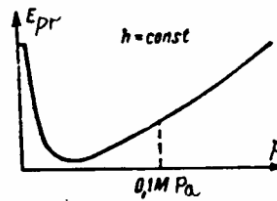
Пробивот на гасот се случува многу брзо. На пример растојание од 1 cm се пробива за 10^{-7} до 10^{-8} s. Ако долготрајноста на напонот е мала (на пример импулсовиден напон) и соизмерлива со ова време, пробивниот напон е поголем во однос на еднонасочен или споропроменлив (50 Hz). Оваа појава се карактеризира со т.н. **коэффициент на импулсот**:

$$\beta = \frac{U_{pri}}{U_{50}} > 1 \quad (4.81)$$

каде U_{pri} е пробивен напон при напонски импулс, а U_{50}



Сл.4.40: Зависност на ел. цврстина на воздухот од растојанието меѓу електродите при $f = 50 \text{ Hz}$, $\theta = 20^\circ\text{C}$ и $p = 0,1 \text{ MPa}$.



сл.4.41: Зависност на електричната цврстина на гасот од притисокот

Електричната цврстина на гасот многу зависи и од неговата густина (од притисокот при $\theta = \text{const}$) При мали промени на θ и p пробивниот напон на гасот е право пропорционален со релативната густина δ :

$$U_{pr} = U_{pro} \delta \quad (4.82)$$

каде U_{pr} е пробивен напон при некоја релативна густина δ (зададена преку температурата θ и притисок p), а U_{pro} е пробивниот напон при релативна густина $\delta=1$ (владее при нормални атмосферски услови за θ и p).

$$\delta = \frac{p}{101,3} \frac{273 + 20}{273 + \theta} = 2,89 \frac{p}{\theta + 273} \quad (4.83)$$

каде p е притисокот во КПа, а θ е температурата во степени целзијусови. При нормални атмосферски услови е $\delta=1$.

При повисоки притисоци а со тоа и поголема густина на гасот, се намалува растојанието меѓу молекулите на гасот, се намалува должината на слободниот пат, а со тоа е потребно и појако поле односно поголем пробивен напон, сл.4.41. При намалување на притисокот почнувајќи од нормален атмосферски, отпрво E_{pr} намалува, но потоа пак расте. Тоа се објаснува со намалување на бројот на молекули во единица волумен на гасот, па се намалува и веројатноста за судирна јонизација. При висок вакуум, E_{pr} е високо, но сепак постои пробив, кој се објаснува со појавата “**ладна емисија**”, а ова е директна емисија на електрони од електродите под дејство на силното електрично поле. При оваа појава електричната цврстина е многу висока, но зависи од состојбата на површината (рапавост, нечистотији) и материјалот на електродите.

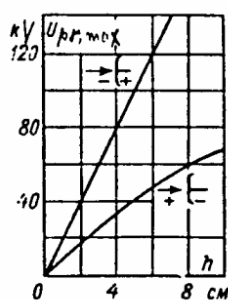
Гасови под притисок се применуваат за изолирање на високонапонски апарати, а исто така и за производство на кабели и кондензатори за висок напон.

Ако полето е **нехомогено**, појавата на електрично празнење во гасовите има некои специфичности. Нехомогено поле владее меѓу електроди во форма на шилци, шилец-плоча, во околината на проводниците од високонапонските преносни водови и сл.или

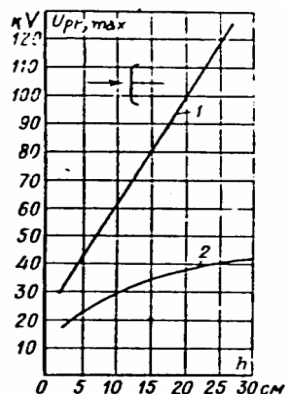
накратко, секаде онаму каде радијусот на кривината на електродите е мал во споредба со растојанието меѓу нив. При нехомогено поле се јавува т.н. “**парцијално празнење**” односно “**корона**” во местата каде полето е најјакое (поголемо од критичното) и празнењето со своите стримери не достига до спротивната електрода, т.е. не е целосно. Само при уште повисок напон настанува целосен пробив - премостување на стримерот од едната до другата електрода. Во услови на нехомогено поле, се јавува и зависност на пробивниот напон и од поларитетот на посилено закривената електрода, сл.4.42.

Ако приложениот напон на електродите има висока фреквенција, напонот на пробив е идентичен со почетниот напон на короната, и многу не зависи од растојанието меѓу електродите (сл.4.43), додека при $f = 50\text{Hz}$ тој зависи практично линеарно со растојанието.

Празнењето во воздух по површината на цврст диелектрик се вика **прескок** или површинско празнење. Тоа секогаш настанува при помал напон одошто напонот кој би бил потребен ако меѓу електродите би бил само гасот (воздухот). Оваа појава е заради присуството на површината на цврстиот диелектрик на која може да има влага и нечистотии.



сл.4.42: Зависност на пробивниот напон во нехомогено поле од растојанието и поларитетот, $p = 0,1$ МПа, воздух



сл.4.43: Зависност на пробивниот напон во воздух од растојанието и фреквенцијата: 1) $f = 50\text{ Hz}$, 2) $f = 3,85 \cdot 10^5\text{ Hz}$.

судир со молекулите на течноста обавува јонизација; ослободениот притоа електрон пак се забрзува и обавува нова јонизација и т.н. и по лавинообразен пат настанува пробив. Зголемената ел. цврстина на течниот диелектрик се толкува со помалиот среден слободен пат заради поголемата густина на течноста. Кај течен диелектрик кој содржи гасови (неповолно!) се смета дека пробивот настанува со јонизација на гасот во микрошуплините - гасни меурчиња кои се прошируваат и образуваат гасен канал меѓу електродите.

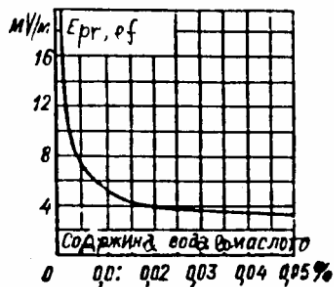
Водата ако е присутна на пример, во трансформаторското масло во вид на мали капки при нормална температура многу ја снижува електричната цврстина E_{pr} , сл.4.44. Под влијание на силното електрично поле, капките вода (која е многу поларна течност) се издолжуваат во форма на елипсоиди и се наредуваат една до друга по силовите линии на

4.5.3. Пробив во течни диелектрици

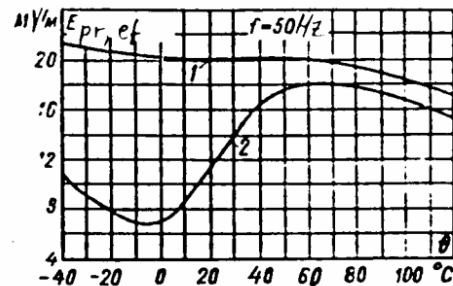
Обично течностите имаат многу поголема електрична цврстина од гасовите. Но, за постигање на висока ел. цврстина течните диелектрици треба да се многу чисти. Добивањето на екстремно чисти течни диелектрици е многу тешко. Во праксата, при електричната цврстина на течните диелектрици пресудна улога имаат нечистотиите, кои сепак се присутни, макар и во најмала мерка.

Кај екстремно чистите течни диелектрици се смета дека настанува електричен пробив со сличен механизам како и кај гасовите. Под дејство на јако електрично поле настанува оттргнување на електрон од електродите и истиот во

ел. поле прилепувајќи се со спротивно поларизираниот краев. Со тоа прават проводливо мовче по кое настанува електричниот пробив.



сл.4.44: Зависност на ел. цврстина на трансф. масло од содржината на вода.



сл.4.45: Зависност на електричната цврстина на трансформаторското масло од температурата; 1-суво масло, 2-масло со трагови влага

На сл.4.45 дадена е зависноста на E_{pr} за трансформаторско масло од температурата. Ако маслото е суво, се до 80°C, E_{pr} не зависи од температурата. При повисоки температури настанува вриење на полесните маслени фракции и создавање на парни меурчиња, па цврстината опаѓа.

Присуството на вода го прави маслото електрички слабо при ниски температури, вклучувајќи ги и собните. При повисоки температури водата преминува од состојба на емулзија во состојба на молекуларен раствор (растворливоста на водата е повисока при повисоки температури). Натамошниот пораст на температурата пак доведува до пад на цврстината сега заради вриење на маслото. При ниски температури кај влажното масло пак се забележува пораст на E_{pr} , што се објаснува со пораст на вискозноста а и со премин на водата во мраз, кој има помала диелектрична пропусливост во однос на водата.

Примеси од саѓи, влакненца и други цврсти нечистотии предизвикуваат деформација на електричното поле во течноста и исто така многу ја намалуваат електричната цврстина. Затоа, нечистите масла се чистат со специјални филтерски машини кои вршат повеќе физички постапки како загревање, центрифугирање, вакуумирање филтрирање и дегазирање на трансформаторското масло, после што тоа си ја повраќа високата електрична цврстина и други добри својства. (напр. од 4 MV/m се постигнува 20-25 MV/m).

4.5.4 Пробив во цврсти диелектрици

Постојат четири вида пробив во цврстите диелектрици:

1. Електричен пробив во макроскопски хомогени диелектрици,
2. Електричен пробив во нехомогени диелектрици,
3. Топлотен пробив,
4. Електрохемиски пробив.

Првиот вид, имено електричниот пробив на макроскопски **хомогени** диелектрици се карактеризира со брз развој и трае 10^{-7} до 10^{-8} s. Во механизмот на овој пробив не се присутни спорите топлински процеси. Овој електричен пробив по својата природа е елек-

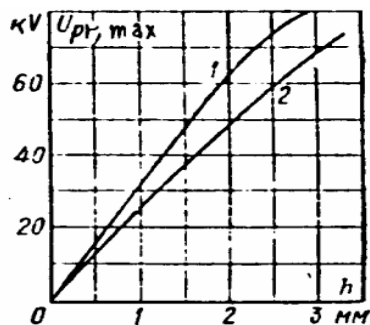
тронски процес. Под дејство на силното ел. поле од мал број почетни електрони се формира електронска лавина по пат на судирна јонизација. При овој пробив исклучена е појавата на електропроводливоста и диелектричните загуби кои би го загревале материјалот, а исто така и услов е да нема гасни меурчиња во кои би настанала јонизација.

Во хомогено ел. поле, при целосна хомогена структура на материјалот овој пробив дава електрична цврстина која е својство на самиот материјал. Такви услови на експериментот може да се исполнат само ако се работи за монокристален материјал без примеси, со мала дебелина на примерокот. При ова може да се добијат фантастично големи износи за E_{pr} , до стотина MV/m и повеќе. При нехомогено поле цврстината може да се добие знатно помала.

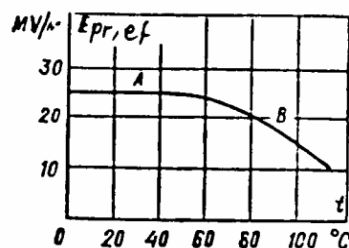
Пробивот кај **нехомогените** диелектрици е карактеристичен за техничките диелектрици кои содржат гасни меурчиња и други непожелни примеси. И овој пробив се развива многу брзо, исто како и претходниот, за хомогените материјали. И овде се согледува извесна разлика во пробивниот напон во зависност од степенот на хомогеноста на ел. поле, но не толку силна како кај хомогениот диелектрик.

Практичните обиди покажуваат дека со зголемувањето на дебелината на испитуваниот примерок забележуваме намалување на електричната цврстина, сл. 4.46. Тоа може да потекнува од фактот што при подебел диелектрик веројатноста за совпаѓање на пробивната патека со дефекти, шуплини и уклоци е поголема. Со зголемувањето на површината на електродите при експериментот, исто така се забележува намалување на ел. цврстина, што се објаснува на истиот начин како погоре.

Што се однесува до влијанието на температурата, до извесна висина на температурата електричната цврстина е константна. Над таа вредност, електричната цврстина се намалува, што се толкува како показател дека делумно при пробивот делува механизмот на топлотниот пробив, сл.4.47.



сл.4.46: Зависност на пробивниот напон при 50 Hz од дебелината на примерокот за порцелан. 1.-хомогено, 2.-нехомогено поле.



сл. 4.47: Зависност на електричната цврстина на електротехничкиот порцелан од температурата при $f=50\text{Hz}$; А- област на електричен пробив, В - област на топлински пробив.

Мала електрична цврстина имаат диелектриците со порозна структура (неимпрегнирана хартија, дрво, порозна керамика). Нивната ел. цврстина е слична со онаа на

воздухот. Причината за ова се воздушните уключоци. Тие се исто така многу неповолни ако диелектрикот треба да работи на високи фреквенции.

Диелектриците со густа структура како што се лискунот, добро импрегнираната хартија со течен диелектрик, стакла и др. имаат висока ел. цврстина, таб.4.11.

Табела 4.11: Примери на ел. цврстина на некои цврсти диелектрици во хомогено поле

| материјал | E_{pr} (еф.вр.) MV/m | опис на структурата |
|-----------------------------|------------------------|--|
| стакло | 100-300 | хомогени густы диелектрици и слојни, ако полето е нормално на слоевите |
| лискун | 100-150 | исто како погоре |
| импрегнирана хартија | 100-300 | исто како погоре |
| керамика | 10-30 | нехомогена структура со незатворени поврзани пори - капилари |
| пластични маси со полнители | 8-15 | исто како погоре |

Топлински пробив настанува тогаш, кога количеството топлина која се развива во диелектрикот за сметка на диелектричните загуби е поголемо одошто количеството на топлина која се оддава во надворешната средина. При ова се нарушува топлинската рамнотежа, материјалот се прегрева, ги губи добрите својства (омекнува, му расте проводливоста, што доведува до натамошен пораст на загубите и т.н.) Процесот завршува со пробив, кој во крајна линија пак има електричен карактер (лавинаобразен), но појавата е спора и поврзана со топлински процеси. Ист материјал има различна вредност на диелектричната цврстина при електричен и при топлински пробив (диелектричната цврстина при топлинскиот пробив е помала).

Електричната цврстина при топлинскиот пробив не е карактеристика на самиот материјал, туку на конструкцијата со диелектрик посматрана како целина. Пробивниот напон зависи од фреквенцијата, условите за ладење и температурата на околната средина.

На пример, ако некоја изолациона конструкција е лошо топлински пресметана, таа ќе претрпи топлински пробив при релативно ниски износи на електричното поле, иако е употребен квалитетен диелектричен материјал, кој има висок износ на диелектричната цврстина при електричен пробив.

Освен тоа, топлинскиот пробив зависи и од топлинската постојаност на материјалот. Органските диелектрици имаат пониски пробивни напони при топлински пробив одошто неорганските (кварц, керамика) при исти други услови. На сл.4.47 се гледа дека ел. цврстина при топлинскиот пробив опаѓа со порастот на температурата.

Нека на плочка од хомоген диелектрик со загуби делува наизменично ел. поле чија јачина можеме да ја менуваме, сл.4.48. Во диелектрикот ќе се развива моќност која се пресметува според

$$P_a = U^2 \omega C \tan \delta.$$

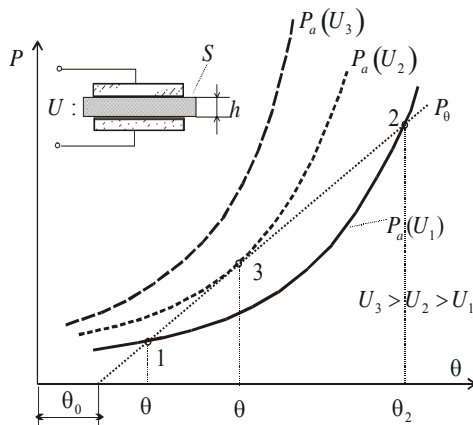
Топлински пробив ќе настане ако температурата порасне до таа мерка, што главен механизам во настанувањето на загубите биде порастот на ел. проводливост. Во тие услови и $\tan \delta$ ќе зависи од температурата по експоненцијален закон: Ако појдеме од

специфичните загуби (загуби по единица волумен) и посматраме проба со површина S и дебелина h :

$$P_a = P'V = \sigma_a E^2 Sh = \sigma_a \frac{U^2}{h^2} Sh = \frac{U^2}{h} 2\pi f \epsilon_o \epsilon_r \operatorname{tg} \delta_o e^{\alpha(\theta - \theta_o)} S$$

$$P_a = \frac{U^2 S f \epsilon_r \operatorname{tg} \delta_o e^{\alpha(\theta - \theta_o)}}{1,8 \cdot 10^{10} h} \quad (4.84)$$

каде $\operatorname{tg} \delta_o$ е фактор на загубите при температура на околната средина θ_o , α е температурен коефициент на $\operatorname{tg} \delta$, θ е температурата на загреаниот диелектрик.



сл.4.48: Со поимот топлински пробив.

Истовремено со порастот на температурата на испитуваниот примерок, настанува и негово ладење кое се пресметува по Њутновата формула за одведената моќност по пат на конвекција:

$$P_\theta = 2sS(\theta - \theta_o) \quad (4.85)$$

каде s е коефициент на топлинското оддавање, $W/(m^2K)$ а S е површината ($2S$ е вкупната површина).

Додека произведената топлина P_a е нелинеарна функција од температурата која брзо расте со пораст на температурата, оддадената топлина P_θ е линеарна функција. И двете криви се претставени на сл.4.48. Можни се 3 случаи: При $U = U_1$ кривите се сечат во

точките 1 и 2. Точката 1 е стабилна точка во термички смисол, бидејќи при овие услови не настанува растење на температурата и евентуален топлински пробив.

Ако напонот U порасне, двете криви веќе не се сечат, туку во специјален случај се допираат. Допирната точка 3 не е топлински стабилна. При достигнување на температурата θ , настанува натамошно загревање и топлински пробив. Според тоа, може да се одреди при кој напон ќе настане топлинскиот пробив, ако се решат равенките:

$$P_a = P_\theta \quad \text{и} \quad \frac{\partial P_a}{\partial \theta} = \frac{\partial P_\theta}{\partial \theta} \quad (4.86)$$

Ако натаму се анализираат горните изрази, може да се покаже дека напонот при кој настанува топлотен пробив е повисок ако е s поголем, (подобро ладење) и ако е диелектрикот подебел (Право пропорционално со квадратниот корен на s и h). Пробојниот напон е помал при поголеми ω , ϵ_r , $\operatorname{tg} \delta_o$ и α . (Обратно пропорционално со квадратниот корен на овие величини).

Електрохемиски пробив доаѓа предвид при повишени температури и влажност. За ваков вид пробив можеме да говориме ако во материјалот се одвиваат долготрајни процеси кои водат кон неповратни промени: намалување на специфичната отпорност, промена на физичко-хемиските својства. Ова со еден збор се вика стареење на

изолацијата. За овој процес потребно е да помине подолго време. Тој процес е покарактеристичен за органските диелектрици, а во негово настанување може да имаат влијание и составот на електродите.

4.6. Физичко-хемиски својства на диелектричните материјали

4.6.1 Својства во врска со влагата

Под поимот **хигроскопност** го разбираме својството на диел. материјали да ја впиваат влагата од околната средина, а **пропусливост за влага** значи способност материјалот да ја пропушта водената пареа низ себе.

Апсолутна влажност на воздухот е масата m на водената пареа која се содржи во единица волумен воздух. За секоја температура одговара одредена вредност на апсолутната влажност при заситување m_{zas} . Ако при таа температура е присутна поголема количина влага, истата ќе се оддели во вид на роса. Износот m_{zas} расте со порастот на температурата, сл.4.51.

Релативна влажност на воздухот е односот

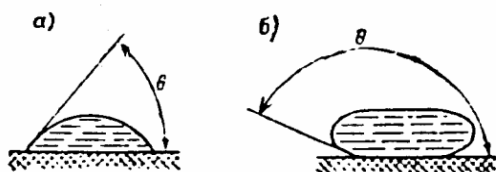
$$\varphi = \frac{m}{m_{zas}} 100 = \frac{p}{p_{zas}} 100 \quad (4.87)$$

каде p и p_{zas} се соодветните притисоци на водената пареа. При температура од 20°C и притисок на воздухот од 0,1МПа е $m_{zas} = 17,3 \text{ g/m}^3$.

На пример, при релативна влажност од 65%, која обично се усвојува за нормална при 20°C воздухот содржи $m = 17,3 \cdot 0,65 = 11,25 \text{ g/m}^3$ вода.

Водата е силно поларен диелектрик со низок специфичен отпор ($\rho = 10^3 - 10^4 \Omega \cdot \text{m}$), и затоа ако таа доспее во евентуалните пори на диелектрикот, му ги намалува сите важни диелектрични својства. Особено е штетно дејството на влагата при повишени температури (30-40°C) и при високи вредности на рел. влажност на воздухот од 98 - 100%. Високата влажност на воздухот се одразува на површинскиот специфичен отпор на диелектрикот. За да се запазат цврстите поларни диелектрици од дејството на влагата истите се лакираат со погодни лакови кои ја одбиваат влагата, т.е. не се натопуваат.

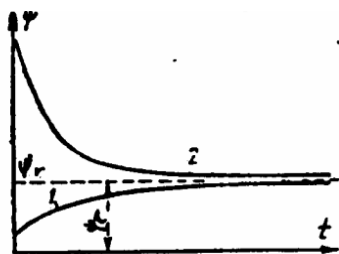
Способноста на диелектрикот да се **натопува** со вода се карактеризира со аголот на натопување θ на една капка вода кој се создава ако на површината на истите се капне вода, сл.4.49. Колку е аголот θ помал, толку натопувањето е посилно. Површини кои се натопуваат имаат $\theta < 90^\circ$, а оние кои не се натопоуваат имаат $\theta > 90^\circ$.



сл. 4.49: Изглед на капка вода врз диелектрик
а)-кога се натопува; б)-кога не се натопува



сл.4.50: Различен вид на порозност и шуплин
минуваат низ целиот материјал; б - отворени,
целиот материјал; с- затворени



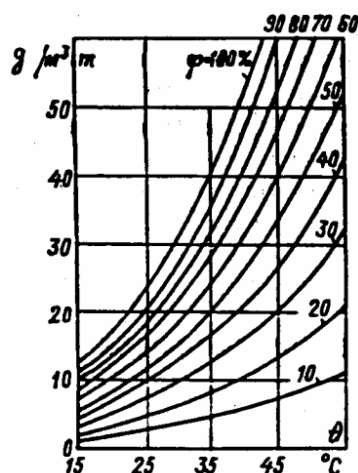
сл.4.52: Промена на влажноста φ на парче диелектрик
навлажување; 2 - при сушење. Обидот се обрнува
кон константна влажност на околниот воздух.

тоа ќе се стреми кон состојба на некоја равнотежна влажност ψ_r сл.4.52. Обратно, ако во воздух со релативна влажност φ се постави примерок изолација со почетна влажност поголема од равнотежната ψ_r , која одговара на таа влажност на воздухот, влажноста ќе му се намалува приближувајќи се кон равнотежната. Колакава е таа равнотежна влажност ψ_r при дадена релативна влажност на воздухот φ , зависи од видот на материјалот.

Врз хигроскопноста на материјалот влијае неговата структура, присуството и димензиите на порите. Материјали со развиени пори (текстил) се повеќе хигроскопни одошто компактните материјали. Кај разни видови материјали се среќаваат пори со следни димензии во нанометри, таб. 4.12.

Табела 4.12

| | |
|--|---------------|
| микропори во керамика | $10^2 - 10^5$ |
| капилари во влакнеста целулоза | 100 |
| пори во сидовите на влакната | 1 - 10 |
| меѓумолекуларни пори во разни материјали | 1-5 |
| внатрешно-молекуларни пори | <1 |



сл. 4.51: апсолутна и релативна
влажност на воздухот во зависност
од температурата при нормален
атмосферски притисок

Ако во диелектриот има пори, влагата може да навлезе во него. Најлошо во овој смисол е ако порите проникнуваат низ целиот материјал. Но од аспект на импрегнација со течно изолационо средство, ваквото својство е поволно, сл.4.50.

Влажност на материјалот. Ако парче изолационен материјал се остави во средина со дадена рел. влажност φ , со текот на времето

За споредба да спомнеме дека ефективниот дијаметар на молекулите на водата е 0,27 нм, па според тоа водата може да продри и во внатрешно-молекуларните пори на целулозата.

Дали одреден процент проникната влага во изолациониот материјал ќе се одрази на електричните

својства на материјалите, зависи од додатни услови. Ако влагата образува нишки кои проникнуваат низ целата дебелина на материјалот, и најмалото количество влага негативно се одразува на електричните својства. Поповолно е ако влагата се распределува во изолирани островца. Најголемо снижување на ρ под влијание на влажноста се јавува кај оние порозни материјали, каде има примеси растворливи во влагата, при што се образуваат електролити со голема проводливост.

Содржаната влага негативно се одразува и при наизменичен напон особено на $\tan \delta$ и ϵ_r , кои растат со пораст на влажноста. Понекогаш преку мерење на овие параметри судиме за присуството на влагата во материјалот.

Водопропусливост е способноста на диел. материјал да пропуштаат водени пареи низ себе. Оваа карактеристика е важна ако од материјалот се прават заштитни превлаки и покривки, заливни маси и друго. За намалување на хигроскопноста и водопропусливоста кај порозните материјали се применува **импрегнација** на истите - натопување со погодни течни диелектрици.

Но треба да се напомене дека импрегнацијата на целулозните влакнасти материјали и други органски диелектрици само го успорува навлажнувањето на материјалот, а не влијае на ρ кое се постига после долготрајно влијание на влажноста.. Затоа, и импрегнираните материјали додатно треба да се заштитат од влагата, например со смесување во непропусни кукишта.

4.7. Механички својства на диелектриците

Исто како и кај проводните материјали, и кај диелектриците важни се и овие својства. Во нив спаѓа цврстината на истегнување, притисок и свиткување. Кај анизотропните материјали (слоести и влакнести) механичките својства зависат од правецот на делувањето на оптоварувањето. Кај некои материјали како стаклото, керамичките материјали, некои пластични маси, многу е поголема цврстината на притисок одошто на истегнување и свиткување. Механичката цврстина на многу диелектрици зависи од површината на попречниот пресек на примероците (пр. стаклени влакна се појаки ако се потанки)

Механичката цврстина на изол. материјали зависи од температурата и по правило се влошува при пораст на истата. Кај хигроскопните материјали механичката цврстина зависи и од влажноста.

Многу диелектрици (особено термопластичните) имаат особина да се деформираат ако силата делува долготрајно. Притоа тие претрпуваат пластични деформации и велиме дека материјалот “тече”. Оваа особина е многу неповолна, а се засилува при повисоки температури.

Кршливоста е својството на материјалот да се разрушува без приметна пластична деформација. Таа зависи од видот на материјалот и од условите при испитувањето. При поголеми брзини на оптоварување и при пониски температури, појавата е посилено

изразена. Некои материјали се поотпорни на статички а не се отпорни на динамички напрегања.

Вискозноста е важна за течните и полутечните изолациони материјали, масла и лакови, заливни маси, компаунди за импрегнација. Вискозноста преставува внатрешно триење - својство на течностите и гасовите да се противат на преместувањето на еден дел во однос на друг. Квантитативно вискозноста се карактеризира со коефициентот η - коефициент на динамичка вискозност. Динамичката вискозност во SI системот се мери во Pa.s. (порано во Пуази). Кинематичката вискозност ν е еднаква на односот на динамичката вискозност и густината на течнота $\nu = \eta / \rho$. Во SI системот кинематичката вискозност се мери во m^2/s (порано во Стокси).

Вискозноста на сите материјали кои при загревањето не си го менуваат хемискиот состав силно зависи од температурата. По правило, законот на промена на вискозноста со температурата е експоненцијален:

$$\eta = Ae^{\frac{W}{kT}} \quad (4.88)$$

каде A е константа карактеристична за течнота, W е енергијата на активацијата, потребна за премин на молекулата од една рамнотежна положба во друга.

4.8 Топлински својства на диелектриците

Најважни топлински својства на диелектриците се топлинската постојаност, постојаност на студ, топлинската проводливост, топлинското ширење. Овие својства се изучуваат во Физиката. За нас поважна е топлинската постојаност.

Топлинската постојаност е способноста на диелектрикот да го издржи делувањето на повишени температури во тек на време споредливо со рокот на траење (живот, време на експлоатација) на изолацијата, без да се појават недозволените влошувања на неговите својства. Во зависност од дозволените температури во експлоатацијата, диелектриците се разврстени во **класи на топлинската постојаност**.

Топлинската постојаност на **неорганските диелектрици** по правило се определува според почетокот на битната промена на ел. својства на примерокот, според наглиот пораст на $tg\delta$ или снижувањето на ρ . Топлинската постојаност се оценува според висината на температурата при која се јавуваат овие промени.

Топлинската постојаност кај **органските диелектрици** обично се одредува според почетокот на механичките деформации на истегнување или свиткување, но и кај нив може да се одреди преку промената на електричните својства.

Највисоката дозволена работна температура се одредува на основа на внимателно студирање на кратковремената и долготрајната топлинска постојаност, притоа земајќи ги и коефициентите на резерва, кои зависат од условите на експлоатацијата, неопходниот степен на сигурност и рокот на служба во експлоатацијата.

Неповратното влошување на својствата на изолацијата при долготрајното делување на зголемена температура заради спорите хемиски процеси се вика **топлотно стареење** на изолацијата. Стареењето се манифестира на разен начин кај разни материјали. На пример кај лакови и кај целулозата се јавува зголемена тврдина и кртост, пукнатини и др.

При исти други услови, брзината на топлотното стареење на органските полимери многу се повишува со пораст на температурата, при што се покорува на општиот закон за температурната промена на брзината на хемиските реакции. **Времето на стареењето** (кое го мериме од почетокот на намалувањето на пример, на механичката јакост, па се додека се добие само дел од почетната вредност за јакоста) зависи од температурата според законот

$$\ln \tau = \frac{A}{T} + B \quad (4.89)$$

каде A и B се константи за даден материјал и дадени услови на стареење. На таков начин, зависноста на $\ln \tau$ од $\frac{1}{T}$ е линеарна. Обично нагибот на тие прави е таков, што на двојно намалување на времето на стареење му одговара пораст на температурата од 10 K. Аналогна зависност важи и за **времето на живот** на изолацијата (времето до испад) кај електричните машини и други изолациони конструкции.

Освен температурата, на брзината на стареењето битна улога има и концентрацијата на кислород, присуството на озон кој е посилено оксидационо средство од кислородот и присуство на разни хемиски реагенси кои или го убрзуваат, или го успоруваат стареењето. Топлотното стареење се забрзува под дејството на ултравиолетови зраци, ел. поле, механички напрегања и друго.

Можноста да се повиши работната температура на изолацијата е многу важна во праксата. Кај електричните машини и апарати топлинската постојаност всушност е одредена од топлинската постојаност на самата изолација. Ако се подобри топлинската постојаност на изолацијата, при исти габаритни димензии се добиваат поголеми моќности, а при исти моќности - помали габарити.

Согласно со препораките на IEC (Меѓународна електротехничка комисија) а и според нашите национални прописи кои се во согласност со тие препораки, електроизолационите материјали се делат на **класи според топлинската постојаност**. За секоја класа се фиксираат **највисоките дозволени работни температури** при користењето на тие материјали. Класите се одредени како следи:

| класа | Y | A | E | B | F | H | C |
|-------------------------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| највисока дозволена температура, °C | 90 | 105 | 120 | 130 | 155 | 180 | >180 |

Во **класата Y** спаѓаат влакнести материјали на основа на целулозата и свила (преѓа, ткаенина, ленти, хартија, картон дрво) ако не се импрегнирани и не потопени во електроизолациони материјал.

Во **класата A** спаѓаат органски материјали со влакнеста структура импрегнирани со лакови, компаунди или потопени во течен диелектрик, т.е. заштитени од непосреден допир со кислородот од воздухот што би го стареело материјалот. Овде спаѓаат полиамидни слоеви, маслено-смолни и поливинилацетатни лакови и др.

Во **класата Е** спаѓаат пластични маси со органски полнители и термореактивни врзивни средства од типот на фенолформалдехинди и слични смоли (пертинакс, текстолит) полиетилен-терафталат, епоксиди, полиестерски и полиуретански смоли. Со еден збор, во класите Y, A, E спаѓаат органски електроизолациони материјали.

Во **класата В** спаѓаат материјали за кои е карактеристична помала содржина на неоргански компоненти, на пример, лискунски делчиња, азбестни и стаклени влакна во **врска со органски** врзивни средства и импрегнациски материјали. Овде се сите миканити, ткаенини со стаклени влакна и лак, стаклотекстолити од фенолформалдехид и термореактивни смоли, епоксидни компаунди со неоргански полнители.

Во **класата F** влегуваат миканити производи врз база на стаклени влакна со примена на органски врзивни средства и импрегнациски лакови со зголемена топлинска постојаност, епоксиди, термореактивни полиестерски и силиконско -органски материјали.

Во **класата H** се користат силиконски органски смоли со особено висока термичка отпорност

Во **класата C** спаѓаат чисто неоргански материјали кои не содржат импрегнациски органски составни компоненти. Овде спаѓаат лискун, кварц, стакло, стакловлакнести материјали, азбест, микалекс, неимпрегниран азбестен цемент, миканит со неоргански врзивни средства и др. Од чисто органските материјали во класата C спаѓаат само тефлонот (флуоропласт 4 или политетрафлуоретилен), материјали врз основа на полиимиди.