

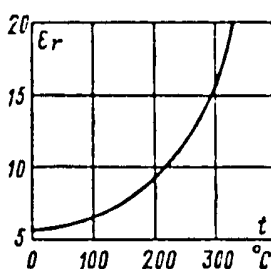
#### 4.2.8. Диелектрична пропусливост на цврсти диелектрици

Диелектричната пропусливост на цврстите диелектрици зависи од нивната структура. Кај цврстите диелектрици можни се сите видови поларизации.

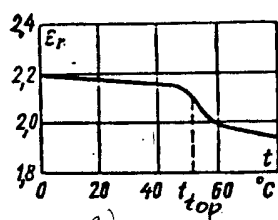
Ако цврстите диелектрици се **неполарни**, тие се однесуваат на ист начин како и неполарните течности и гасови. Тоа се илустрира на сл.4.17а и таблицата 4.4. При топењето на парафинот (на 54 °C) настанува нагло намалување на  $\epsilon_r$ , заради намалувањето на густината.

Таблица 4.4: Релативна диелектрична пропусливост  $\epsilon_r$  кај неполарни цврсти диелектрици при 20°C

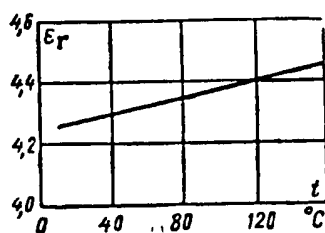
материјал	$n^2$	$\epsilon_r$
парафин	2,06	1,9-2,2
полистирол	2,4	2,4-2,6
сулфур	3,69	3,6-4,0
дијамант	5,67	5,8



сл.4.16: Температурна зависност на  $\epsilon_r$  кај електропорцеланот.



а)



б)

сл.4.17: Зависност на диелектричната пропусливост  $\epsilon_r$  од температурата; а)-кај неполарен диелектрик парафин, б)-кај јонски кристали на KCl кои имаат густо пакување.

јонски кристали на KCl кои имаат густо пакување, обично имаат релативно низок  $\epsilon_r$ , но и поголем позитивен ТК  $\epsilon_r$ , сл.4.16.

Кај неорганските стакла (квазиаморфни диелектрици)  $\epsilon_r$  се движи меѓу 4 и 20 (зависно од составот), а ТК  $\epsilon_r$  е позитивен, таб. 4.6. Ако во стаклото има лесно подвижни алкални јони, ТК  $\epsilon_r$  достигнува големи износи  $(+(500-1000) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1})$ . Но може да се добие и стакло со негативен ТК  $\epsilon_r$ , ако во него се додадат примеси од кристални компоненти со негативен ТК  $\epsilon_r$ , например рутил.

Поларните цврсти органски диелектрици имаат диполно-релаксациона поларизација. Таква е целулозата и продуктите од неа и полимерите. И кај мразот постои диполно-релаксациона поларизација. Кај сите овие материјали  $\epsilon_r$  зависи во голема мерка од фреквенцијата и температурата, слично како и кај поларните течности.

Цврстите диелектрици кои претставуваат јонски кристали со густо пакување на честичките поседуваат и електронска и јонска поларизација и имаат диелектрична пропусливост која се движи во широки граници, таб. 4.5. Температурниот коефициент на  $\epsilon_r$  на јонските кристали обично е позитивен, сл.4.17б.

Исклучок се кристалите кои содржат јони на Титан (рутил,  $\text{TiO}_2$ ) и некои титанати) кои имаат негативен температурен коефициент на  $\epsilon_r$ . Тврдите диелектрици кои спаѓаат во кристали со ретко пакувани честички (на пример електротехнички порцелан), каде постои покрај електронска и јонска, исто така и јонско-релаксациона поларизација, обично имаат релативно низок  $\epsilon_r$ , но и поголем позитивен ТК  $\epsilon_r$ , сл.4.16.

Како што спомнавме порано, фероелектричните материјали имаат висок износ на  $\epsilon_r$ , но многу зависен од јачината на полето и температурата. Карактеристично својство на овие материјали е диелектричниот хистерезис, сл. 4.19 (зависност на диелектричното померување  $D$  од јачината на ел. поле  $E$ ).

Фероелектрични материјали се на пример Сегњетовата сол ( $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), Баријум Титанат  $\text{BaTiO}_3$ , калијум дихидро фосфат  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  и други.

Табела 4.5:  $\epsilon_r$  и ТК  $\epsilon_r$  кај јонски кристали

кристал	$\epsilon_r$	ТК $\epsilon_r \cdot 10^6/\text{K}^{-1}$
камена сол	6	+150
корунд	10	+100
Рутил	110	-750
калцијум Титанат	150	-1500

Табела 4.6:  $\epsilon_r$  кај неоргански стакла и органски поларни диелектрици при 20°C

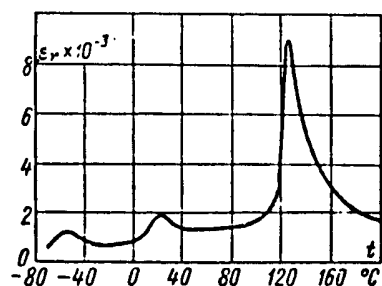
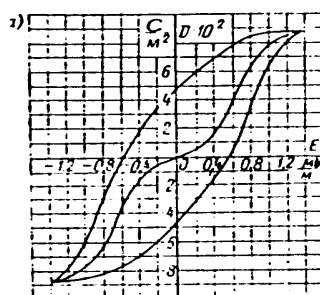
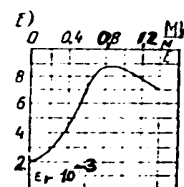
неоргански стакла	$\epsilon_r$
топен кварц	4,5
алкално стакло	6,5
Бариево стакло	10
органски цврсти диелектрици	
органско стакло (плексиглас)	4,0
фенол-формалдехидна смола	4,5
целулоза	6,5

Зависноста на  $\epsilon_r$  од температурата кај  $\text{BaTiO}_3$  има остро изразени максимуми при температура од 125°C, сл.4.18. Температурата при која  $\epsilon_r$  постига максимум се вика Кириева температурна точка. Над оваа температура фероелектричните својства се губат, а тоа значи дека се губи зависноста на  $\epsilon_r$  од  $E$ . На слика 4.8 дадена е хистерезисната крива за овој материјал за температури блиски до Кириевата точка. Износот на  $\epsilon_r$  кај некои фероелектрични материјали е како во табелата 4.7.

Таб. 4.7

материјал	$\epsilon_r$
сегњетова сол	500-600
Баријум Титанат	1500-2000
Баријум Титанат со додатоци	7000-9000

Кај фероелектричните материјали има уште едно интересно својство. Со текот на времето се јавува стареење, намалување на  $\epsilon_r$ . Можна причина за ова е прегрупирање на домените. Оваа појава особено е изразена при температури блиски до Кириевата температура. Со загревање над Кириевата температура и последователно ладење,  $\epsilon_r$  кај овие материјали се враќа на првобитната вредност. Истото може да се постигне ако на материјалот се делува со високофреквентно електрично поле.

сл.4.18: Зависност на  $\epsilon_r$  од температурата кај  $\text{BaTiO}_3$ сл.4.19: Хистерезисна зависност на  $D$  и  $\epsilon_r$  од  $E$  кај фероелектрик

**Прашања за самопроверка**

1. Направи класификација (поделба) на видовите на поларизација. Потоа нацртај еквивалентна електрична шема на диелектрикот во кој се присутни сите можни механизми на поларизација (без детален опис на поедините видови поларизација).
2. Објасни го механизмот на електронската поларизација.
3. Објасни го механизмот на јонската поларизација.
4. Кои се сличностите а кои разликите кај електронската и јонската поларизација.
5. Објасни го механизмот на диполно-релаксационата поларизација.
6. Објасни го механизмот на јонско-релаксационата поларизација.
7. Објасни го механизмот на миграционата поларизација.
8. Како се дефинира поимот релативна диелектрична пропусливост?
9. Кога се работи за диелектриците, со релации и зборови појасни го односот меѓу електричното поле  $E$  и индукцијата  $D$ ; Индукцијата  $D$  и поларизацијата  $P$ ; поларизацијата  $P$  и електричното поле  $E$ .
10. Во кои единици се изразуваат  $E$ ,  $D$  и  $P$ ?
11. Каков е односот меѓу електричната суспендибилност и релативната диелектрична пропусливост  $\epsilon_r$ , како и односот меѓу константата на поларизацијата  $\alpha$  и електричната суспендибилност  $h$ ? Како се нарекуваат овие 3 величини со заедничко име?
12. . Што е тоа коефициент на поларизација за една честичка?
13. Како зависи електричната суспендибилност предизвикана од електронската поларизација од концентрацијата на честичките и од нивниот радијус?
14. Како зависи електричната суспендибилност предизвикана од диполно - релаксационата поларизација од концентрацијата на честичките и од температурата?
15. Со зборови и дијаграм објасни ја зависноста на рел. диел. пропусливост од фреквенцијата кај диелектрик кај кој постои електронска и јонска поларизација.
16. Со зборови и дијаграм објасни ја зависноста на рел. диел. пропусливост од фреквенцијата кај диелектрик кај кој постои диполно - релаксациона поларизација.
17. Колкави износи поприма рел. диелектричната пропусливост на гасовите и од што принципиелно зависи?
18. Колкави износи поприма рел. диелектричната пропусливост на течните диелектрици и од што принципиелно зависи?
19. Колкави износи поприма рел. диелектричната пропусливост на цврстите неполарни диелектрици и од што принципиелно зависи?
20. Како влијае температурата врз диел. пропусливост кај цврсти диелектрици кои претставуваат: јонски кристали со густо пакување; јонски кристали со ретко пакување (стакла, порцелан).
21. Кои специфични својства во однос на диел. пропусливост имаат фероелектричните материјали? Знаеш ли примери на вакви материјали?

### 4.3 Електрична проводливост кај диелектриците

#### 4.3.1. Увод

Поларизационите процеси во диелектричниот материјал предизвикуваат течење на ел. струја која преставува струја на померување и која трае се до воспоставувањето на равнотежната состојба. Во зависност од карактерот на поларизацијата, тие струи се со различна долготрајност. Струите заради електронската и јонската поларизација при нагло вклучување на еднонасочно ел. поле на диелектрикот се толку брзопроменливи, што тешко се детектираат со мерни инструменти. Но струите на померување заради бавните (релаксациони) поларизации кои најчесто се јавуваат кај техничките диелектрици бавно се воспоставуваат и наречени се **апсорпциони струи**  $i_{ap}$ . При еднонасочно поле (напон) апсорпционите струи се јавуваат само при вклучување и исклучување (смерот им е спротивен при вклучување во однос на исклучување). При променлив напон (напр. простопериодичен) тие течат трајно, се додека владее полето.

Но, освен струите на померувањето, заради присуството на извесен број слободни товари во техничките диелектрици, се јавуваат и **проводни струи**  $i_{pr}$  наречени уште и **кондукциони**. Вкупната струја низ техничкиот диелектрик во општ случај е сума на две компоненти, апсорпциона и проводна струја:

$$i_{vk} = i_{pr} + i_{ap}.$$

На слика 4.9 даден е упростен временски тек на процесот на течење на ел. струја при нагло вклучување на еднонасочно поле (еднонасочен напон на електродите на кондензаторот). Велиме “упростен” бидејќи сите поларизациони струи ги замислуваме како една еквивалентна струја, што ако се посматра построго, не е сосема точно. Покасно, ќе ја дадеме подеталната слика на сите струи.

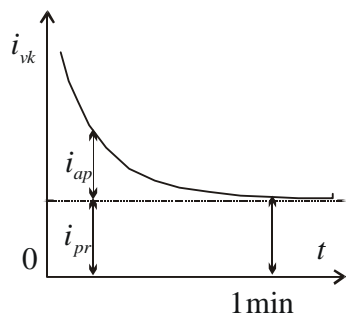
По завршувањето на процесите на поларизацијата низ диелектрикот тече само проводната струја. Ако отпорот на изолациониот материјал се мери со еднонасочен напон, треба да се почека додека исчезне апсорпционата струја и се прочита износот на проводната струја. Обично се чека една минута за примероци со помала големина

**Отпорот на изолацијата** на диелектрикот се одредува по формулата:

$$R_{iz} = \frac{U}{i_{vk} - \sum i_{ap}} = \frac{U}{i_{pr}} \quad (4.41)$$

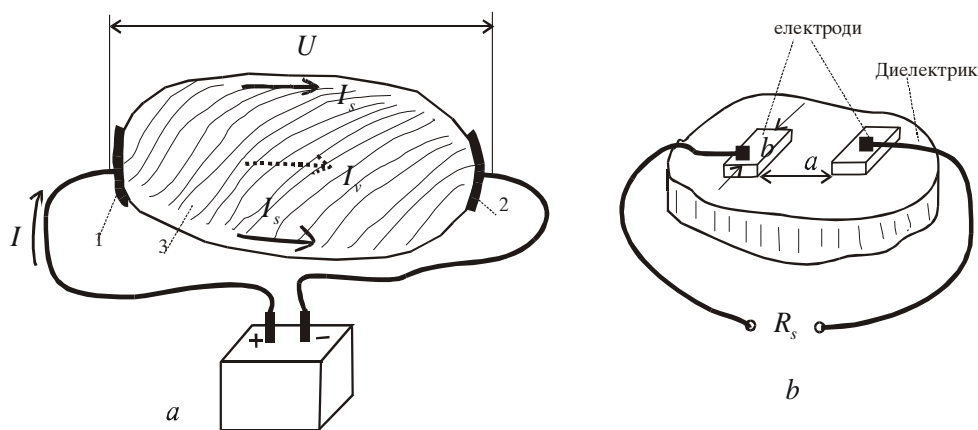
каде  $i_{vk}$  е вкупната струја,  $U$  е приложениот **еднонасочен напон**,  $\sum i_{ap}$  е сума на апсорпционите струи.

Треба да се напомене дека проводната струја кај диелектриците не е од електронски, туку од јонски карактер.



сл.4.20: Зависност на струјата низ диелектрикот  $i_{vk}$  од времето при нагло вклучување на еднонасочно поле.

Кај **цврстите диелектрици** треба да разликуваме **волуменска** и **површинска проводливост**, сл.4.21а Ова е неопходно бидејќи струите кои течат по површината кај цврстите диелектрици се од ист ред големина или поголеми од струите кои течат низ волуменот на диелектрикот. Во врска со тоа се воведени и величините **специфичен волуменски отпор**  $\rho_v$  и **специфичен површински отпор**  $\rho_s$ , а исто така и **специфична волуменска проводливост**  $\sigma_v$  и **специфична површинска проводливост**  $\sigma_s$ . И овде како и кај проводните материјали единица за мерење на  $\rho_v$  е ( $\Omega m$ ).



сл.4.21: а)- со поимот површинска и волуменска проводна струја во цврстиот диелектрик, б)- со поимот површински специфичен електричен отпор.

Сликовита престава за износот на  $\rho_v$  на еден материјал изразен во  $\Omega m$ , е отпорот на коцка од дадениот изолационен материјал со раб 1 m, ако струјата тече меѓу две спротивни страни.

За плочест хомоген материјал со со димензии површина  $S$  ( $m^2$ ) и дебелина  $\ell$  (m) во кој владее хомогено електрично и струјно поле важи:

$$R_v = \rho_v \frac{\ell}{S}; \quad \rho_v = R_v \frac{S}{\ell}$$

(4.14)

каде  $R_v$  е волуменскиот отпор на примерокот од изолацијата. Специфичната волуменска

проводливост  $\sigma_v$  се мери во S/m. Таа се добива како  $\sigma_v = \frac{1}{\rho_v}$

На сл.4.20b дадено е парче диелектрик на чија површина се залепени две тесни проводни електроди долги  $b$  единици и на меѓусебно растојание  $a$  единици. Да

претпоставиме дека струјата тече само по површината на диелектрикот, или ако тоа не е случај да ја посматраме само површинската струја. Површинската отпорност која би ја мереле меѓу овие електроди би се добила право пропорционално на растојанието меѓу електродите "a", а обратно пропорционално на ширината "b".

$$R_s = \rho_s \frac{a}{b}, \quad \text{и} \quad \rho_s = R_s \frac{b}{a} \quad (4.42)$$

Коефициентот на пропорционалноста  $\rho_s$  преставува **површински специфичен електричен отпор**. Бидејќи односот  $\frac{b}{a}$  нема димензија, излегува дека димензијата на  $\rho_s$  е иста со  $R_s$  т.е. оми. Ако  $a = b$  се добива и  $\rho_s = R_s$ , а ова значи дека износот за  $\rho_s$  за некој материјал преставува износот на површинскиот отпор мерен на едно парче површина со квадратен облик (без оглед на димензиите на страниците на квадратот) при што струјата тече меѓу две спротивни страни на квадратот.

Специфичната површинска проводливост  $\sigma_s$  се мери во Сименси. Вкупната проводливост на парче цврст диелектрик е сума на двете проводности, волуменската и површинската:

$$G_{iz} = G_v + G_s \quad \text{односно} \quad \frac{1}{R_{iz}} = \frac{1}{R_v} + \frac{1}{R_s} \quad \text{односно} \quad R_{iz} = \frac{R_v R_s}{R_v + R_s}$$

бидејќи се работи за две паралелно поврзани проводности.

Електричната проводливост на диелектричните материјали од сите агрегатни состојби зависи од влажноста, температурата, но исто така и од јачината на ел. поле при кое се врши мерењето.

Производот на отпорот на изолацијата на диелектрикот на еден кондензатор и неговиот капацитет се вика временска константа на саморастоварувањето на тој кондензатор:

$$\tau_o = R_{iz} C = \rho_v \epsilon_o \epsilon_r$$

Величината  $\tau_o$  може да се одреди ако се направи обид на саморастоварување на кондензатор со тој диелектрик. Тоа е времето потребно за напонот на кондензаторот спадне на 2,7 пати помала вредност од почетниот. Знаејќи го  $\epsilon_r$  и  $\tau_o$  може да се одреди  $\rho_v$ , ако се претпостави дека се во прашање само волуменските струи на растоварување.

## додаток 1:

### Подетална анализа на струите во диелектрикот

Да ги разгледаме подетално струите во диелектрикот.

Ако меѓу електродите на еден плочест кондензатор се постави диелектрик и на електродите се наринат одеднаш **еднонасочен напон**  $U$ , во надворешното коло ќе потечат струи кои имаат различна природа како следува.

1. **Струја на проводливоста**  $i_{pr}$  која е константна во текот на времето и е еднаква на

$$i_{pr} = \frac{U}{R_{iz}} \quad (4.43)$$

Оваа струја на сликата 4.21 во дијаграмот  $U-t$  прикажана е со права хоризонтална линија.

2. Освен струјата  $i_{pr}$ , низ диелектриокот ќе потречат и повеќе **струи на поларизација** и тоа:

- “моменталната” струја  $i_{mom}$  која се состои од збир на капацитивната струја на полнење на геометрискиот капацитет  $C_o$  (кондензаторот без диелектрик) и струите на брзите поларизации, електронската и евентуално (ако ја има) и јонската поларизација на капацитеот  $C_{e,j}$  (капацитет заради брзите поларизации), кои исто така се чисто капацитивни. Струјата  $i_{mom}$  се воспоставува скоро моментално. Максималниот износ не и зависи од својствата на диелектриокот, туку само од напонот  $U$  и од отпорот на надворешното коло  $r$  (отпорот  $r$  го сочинуваат доводните проводници и внатрешниот отпор на изворот на напон  $U$ ) и таа ќе се пригушува по експоненцијален закон:

$$i_{mom} = \frac{U}{r} e^{-\frac{t}{rC_{mom}}}$$

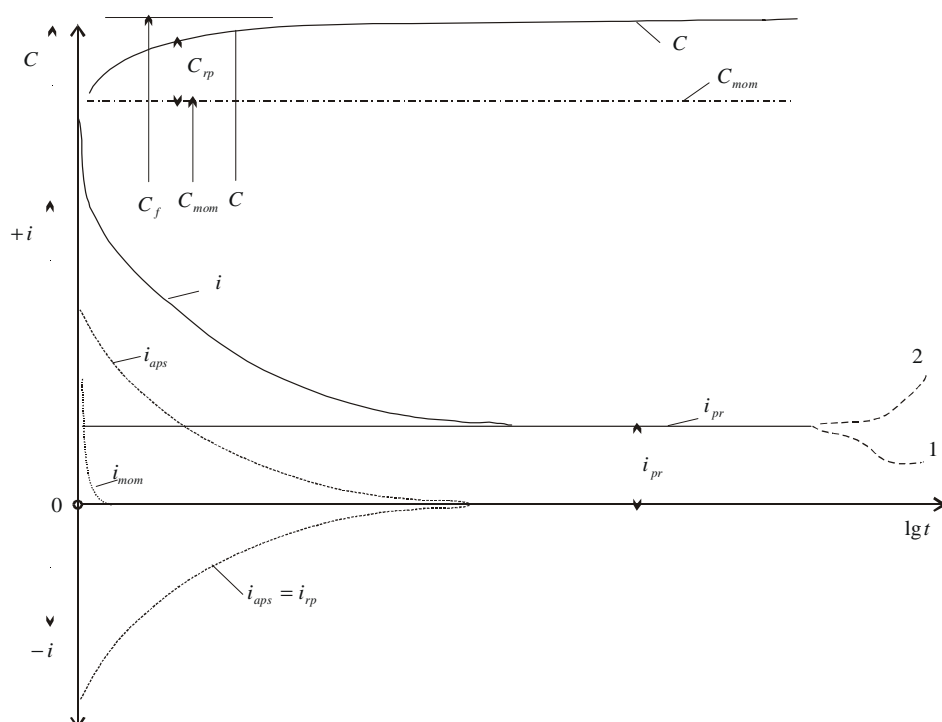
каде  $C_{mom} = C_o + C_{e,j}$  е капацитетот на кондензаторот кој е резултат на натрупаните товари  $Q_o$  и товарите од електронската е евентуално јонската поларизација  $Q_{e,j}$ .

Опаѓањето на струјата  $i_{mom}$  е многу брзо и таа не може да се регистрира вообичаените мерни уреди, туку само со специјални осцилографи. Оваа струја нема активна компонента.

- **Струја на апсорпцијата**  $i_{rp}$  која се должи на релаксационите поларизации, вклучително и меѓуслојната. Ако сакаме да бидеме строги, оваа струја е составена од повеќе компоненти, соодветно на сите видови побавни (релаксациони) поларизации кои неизбежно постојат во сите технички диелектрици и изолациони конструкции. Оваа струја се пригушува многу побавно од претходната, заради прераспределбата на напонот по слоевите на диелектриокот при процесот на полнење односно празнење.

Струјата на апсорпцијата всушност е збир на повеќе струи со различна почетна вредност и различна временска константа на опаѓањето. Зависноста од времето е сложена, но може да се апроксимира со хипербола од обликот

$$i_{rp} = at^{-m}$$



Сл. 4.21 Струи низ диелектрикот и капацитети кај кондензатор со материјален диелектрик во функција од времето при приложување на еднонасочен напон

каде  $a$  и  $m$  се константи, а  $t$  е времето. Вкупната струја на апсорпција од сите релаксациони поларизации според тоа е:

$$i_{rp} = \sum_{i=1}^n a_i t^{-m_i} \quad (4.44)$$

и таа е исто така нацртана на сликата 4.21.

Временската константа на струјата  $i_{rp}$  може да изнесува и повеќе минути. Во практиката се усвојува време на пригушување од 1 минута или кај поголеми објекти, 10 минути, но и тоа може да биде надминато.

За време на преодниот процес на течење на апсорпционите струи во кондензаторот се трупаат дополнителни товари од релаксационите поларизации. Тие доведуваат до зголемување на капацитетот за износ  $C_{rp}$ , сл. 4.21. Тој капацитет се менува од 0 до својата конечна вредност со истата временска константа како и струјата на апсорпција. Вкупниот капацитет на кондензаторот после пригушување на апсорпционите струи се вика физички капацитет  $C_f$ :

$$C_f = C_{mom} + C_{rp}.$$

Ако приложениот еднонасочен напон се исклучи и електродите се спојат накратко, низ надворешното коло и диелектрикот ќе протечат струи на растоварување, како е прикажано



на сликата 4.21 со обратен смер. На истата слика претставена е вкупната струја  $i$  во функција од времето  $t$  при полнењето, како збир на сите струи во изолацијата во даден момент:

$$i = \frac{U}{R_{iz}} + \frac{U}{r} e^{-\frac{t}{rC_{mom}}} + \sum_{i=1}^n a_i t^{-m_i}. \quad (4.45)$$

Како што се спомна погоре, ако сакаме да го утврдиме отпорот на изолацијата  $R_{iz}$  и специфичната проводливост  $\sigma_a$ , ќе примениме еднонасочен напон и ќе причекаме доволно време за да исчезнат апсорпционите струи, и тогаш ќе ги отчитаме напонот и струјата на кондензаторот со диелектрик.

Ако на кондензаторот со диелектрик се приклучи наизменичен синусоидален напон со кружна фреквенција  $\omega$ , моменталната струја и апсорпционата струја ќе се јавува во секоја полупериода. Сега проводливоста ќе се состои од две компоненти, активна и реактивна (капацитивна), односно може да се претстави со комплексен број, адмитанса. На сликата 4.22 нацртан е векторскиот дијаграм на напонот и струите, поточно на јачината на наизменичното електрично поле и густината на струите низ диелектриктот. (Се користат јачина на поле и густини на струи а не напон и струи од практични причини, да се избегне воведување на геометриските димензии на кондензаторот  $S$  и  $d$ ).

Моменталната струја  $J_{mom}$  е причинета од товарот на геометрискиот капацитет и електронската и евентуални јонската поларизација. Тој е чисто капацитивен и претставен со вектор која предничи за  $90^\circ$  пред векторот на јачината на полето  $E$ , се разбира ако фреквенцијата не надмине  $10^{13}$  Hz. Износот на оваа струја е:

$$J_{mom} = \omega \epsilon_o \epsilon_{r,ej} E \quad (4.46)$$

каде  $\epsilon_{r,ej}$  е релативната диелектрична пропусливост заради електронската и јонската поларизација.

Струјата на релаксационата поларизација (апсорпционата струја) има две компоненти: - Капацитивна,

$$J_{C,rp} = \omega \epsilon_o (\epsilon_r - \epsilon_{r,ej}) E \quad (4.47)$$

која е предизвикна од акумулираните товари на релаксационите поларизации и активна компонента,

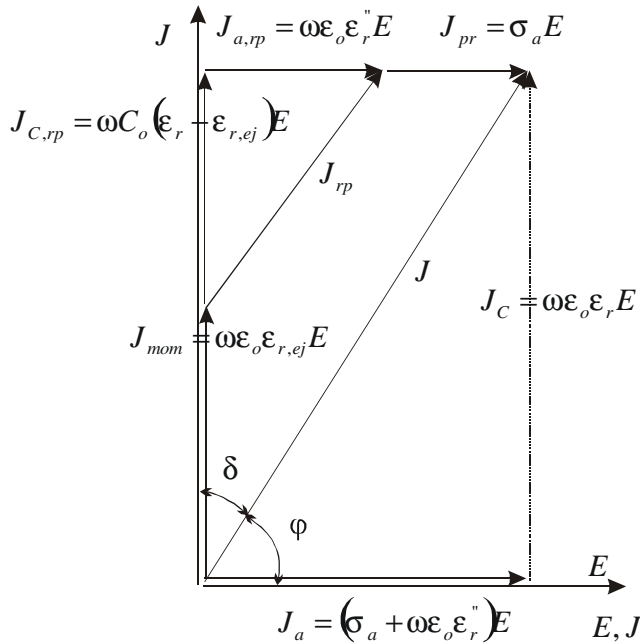
$$J_{a,rp} = \omega \epsilon_o \epsilon_r'' E \quad (4.48)$$

која е збир на активните струи кои се неопходни за совладување на отпорите за остварување на поместувањето на товарите при релаксационите поларизации, и при тоа  $\epsilon_r''$  е имагинарната компонента на релативната диелектрична пропусливост.

Струјата на проводливоста  $J_{pr}$  е чисто активна. Таа е причинета од движењето на слободните товари (јони и електрони):

$$J_{pr} = \sigma_a E \quad (4.49)$$

каде  $\sigma_a$  е специфичната електрична волуменска проводливост на диелектрикот при еднонасочен напон.



сл. 4.22. Векторски дијаграм на наизменично електрично поле и густините на струите кај некој технички диелектрик

Вкупната капацитивна струја при наизменично електрично поле е:

$$J_C = J_{mon} + J_{C,rp} = \omega \epsilon_o \epsilon_r E \quad (4.50)$$

а вкупната активна струја е:

$$J_a = J_{a,rp} + J_{pr} = (\sigma_a + \omega \epsilon_o \epsilon_r'') E \quad (4.51)$$

Активната струја на проводливоста не зависи од фреквенцијата ( $\omega$  не влегува во формулата за пресметка), но сите други струи зависат, бидејќи на различните поларизации им одговараат различни времиња на релаксација односно резонантни фреквенции. Тие времиња зависат од своја страна и од температурата. За секоја фреквенција и температура  $\epsilon_r$  и  $\epsilon_r''$  имаат различни вредности, па како што ќе се види покасно, и аголот на загубите  $\delta$  ќе биде различен.

Ако во диелектрикот има јони на примесите, по извесно време проводливоста ќе се намали, бидејќи ќе настане “електрично очистување (крива 1 на сликата 4.21). По уште подолго време, струјата може да се стабилизира на некоја нова, пониска вредност, условена само со јоните на основниот материјал.

Ако под дејство на електричното поле со тек на време настанат дополнителни механизми на промени на диелектрикот (старење) пропратени со зголемување на бројот на јоните, проводливоста ќе се зголеми (крива 2 на сл. 4.21) Тој процес на стареење може да води и кон т.н. “пробив” на диелектрикот како резултат на енормното зголемување на проводливата струја.

Ако приложеното електрично поле е наизменично со аголна фреквенција  $\omega$ , проводливоста е комплексна величина и се состои од активна и реактивна (капацитивна) компонента во согласност со струите опишани на сл. 4.22. Активната волуменска проводливост е

$$\sigma'_a = \sigma_a + \omega \epsilon_o \epsilon_r'', \quad (4.52)$$

а капацитивната специфична волуменска проводливост е:

$$\sigma_c = \omega \epsilon_o \epsilon_r \quad (4.53)$$

Комплексната волуменска специфична проводливост е:

$$\sigma^* = \sigma_a + \omega \epsilon_o \epsilon_r'' + j \omega \epsilon_o \epsilon_r' \quad (4.54)$$

каде  $\sigma_a$  е специфичната волуменска проводливост при еднонасочно поле,  $\epsilon_r'$  е реалниот а  $\epsilon_r''$  е имагинарниот дел на релативната диелектрична константа. Аголот  $\delta = 90^\circ - \varphi$  е аголот на загубите и  $\operatorname{tg} \delta = \frac{J_a}{J_c} = \frac{I_a}{I_c}$  е факторот на загубите.

Величините  $\epsilon_r'$ ,  $\epsilon_r''$  и  $\operatorname{tg} \delta$  зависат од фреквенцијата и од температурата. Тоа треба секогаш да се има предвид кога се работи за наизменично електрично поле.

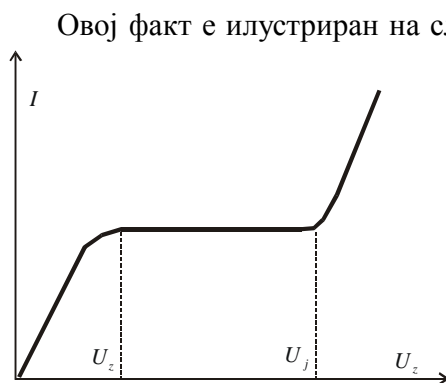
#### 4.3.2. Проводливост на гасовите

И гасовите при слаби електрични полиња приложени на нив покажуваат некоја мала проводливост. Струјата низ гасовите потекнува од секогаш во нив присутните јони и слободни електрони. Јонизацијата на некои неутрални молекули на гасот настанува или под влијание на надворешни фактори, или под влијание на самото електрично поле по механизам на судирна јонизација на честички (електрони) забрзани под дејство на електричното поле.

Во надворешни фактори се вбројуваат рентгенските зраци, ултравиолетовите зраци, радиоактивните зрачења или пак термичката јонизација. Проводливоста предизвикана преку сите овие или само некој од наброените фактори се вика **несамостојна проводливост**.

Ако под дејство на електричното поле забрзаните честички (електрони и јони) при судирот со неутралните молекули на гасот успеваат да ги јонизираат, тогаш ваквата проводливост се вика **самостојна**. Но оваа проводливост се јавува само при големи јачини на полето и (или) помала густина на гасовите.

При слаби електрични полиња не постои самостојна јонизација туку само несамостојна, која е со многу слаб интензитет. Создадените парови јон-електрон (тие се создадени заради погоре спомнатите фактори, а независно од електричното поле), постигаат некоја рамнотежна концентрација, бидејќи паралелно со јонизациите настануваат и рекомбинации - образување на неутрални молекули при средбата на електрон и позитивен јон.



сл.4.23: Зависност на струјата од напонот кај гасовите.

Овој факт е илустриран на сл. 4.23, каде е претставена зависноста на струјата  $I$  од приложениот напон  $U$ , за модел на кондензатор со гасовит диелектрик. Во почетниот дел на зависноста владее Омовиот закон, бидејќи има доволен број јони и електрони кои учествуваат во проводливоста. При повисоки јачини на полето (повисоки напони  $U$ ) сите јони и електрони кои се создаваат во гасот учествуваат воведувањето на струјата - пристигнуваат до електродите и се неутрализираат и настанува заситување на порастот на струјата. На пример, за воздух, при нормални услови и при растојание на електродите од 10 mm

веќе  $0,6 \text{ V/m}$  јако поле доведува до заситување. Густината на струјата при заситувањето на пример во воздух е многу мала и изнесува околу  $10^{-15} \text{ A/m}^2$ . Затоа, воздухот може да се смета за одличен изолатор (посматрано само од аспектот на отпорот на изолацијата, кој е многу голем), и тоа се до оние јачини на електричното поле, при кои настанува судирна јонизација (десна страна на кривата на сл.4.23) и проводливоста стане самостојна. Таа вредност на напонот се вика **напон на јонизацијата**  $U_j$  после кој струјата расте со пораст на напонот. Соодветно постои јачина на електричното поле на јонизацијата, ако посматраме општо, без оглед на димензиите на конкретните електроди меѓу кои владее напонот. За воздух  $E_j = 10^5 - 10^6 \text{ V/m}$ .

### 4.3.3. Проводливост на течните диелектрици

Проводливоста на течните диелектрици тесно е поврзана со градбата на нивните молекули. Кај неполарните течности, проводливоста зависи од присутноста на дисоцираните примеси, во прв ред влагата; кај поларните течности проводливоста зависи и од присуството на примеси, но и од дисоцирање на самите молекули на течноста. Струјата во течните диелектрици може да биде предизвикана не само од јони, туку од движење на поголеми натоварени колоидни честички. Према тоа, за добивање на течни изолации со што поголем изолационен отпор, потребно е пред се темелно чистење на истите од секој вид примеси кои се дисоцираат.

Поларните течности секогаш имаат поголема проводливост одошто неполарните, и при тоа силно поларните можеме да ги сметаме дури и за течни проводници со јонска проводливост.

При подолготрајно течење на ел. струја низ неполарните течности може да се постигне зголемување на специфичниот отпор, бидејќи слободните јони се пренесуваат до електродите и неутрализираат.

Специфичната проводливост на течните диелектрици многу зависи од температурата. Со зголемувањето на истата, расте подвижноста на носителите, бидејќи вискозноста се намалува, а исто така можна е и дисоцијација под дејство на температурата.

Специфичната ел. проводливост на течните диелектрици зависи од **температурата** според следниот закон:

$$\sigma = Ae^{-\frac{a}{T}} \quad (4.55)$$

каде  $A$  и  $a$  се константи зависни само од видот на течноста. Причината за оваа појава е промената а бројот на дисоцирани јони со порастот на температурата и зголемувањето на подвижноста на јоните со порастот на температурата (заради намалување на вискозноста). Притоа, кај течните диелектрици од примарно значење е токму промената на подвижноста на јоните.

Специфичниот отпор се промнува со температурата според законитоста:

$$\rho = Be^{\frac{b}{T}} \quad (4.56)$$

каде  $b$  и  $B$  се константи.

Ако работи за помали температурни подрачја, наместо апсолутната температура  $T$  може да се користи температурата во целзиусови степени според равенката:

$$\sigma = \sigma_o e^{\alpha\theta}; \quad \rho = \rho_o e^{-\alpha\theta} \quad (4.57)$$

каде  $\sigma_o$  и  $\rho_o$  се специфичната проводливост и специфичната отпорност на ниски температури каде тие не зависат од промената на температурата;

$\alpha$  е константа на материјалиот; а  $\theta$  е температурната разлика.

Инаку, специфичната ел. проводливост и овде може да се изрази со општата равенка

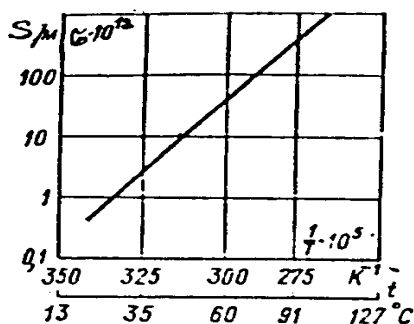
$$\sigma = n_o q \mu \quad (4.58)$$

каде  $\mu$  е подвижноста,  $n_o$  е концентрацијата на носителите, а  $q$  е нивниот товар.

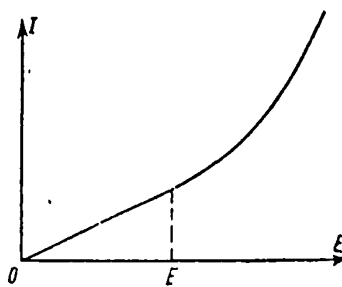
Може да се покаже дека производот на специфичната проводливост  $\sigma$  и динамичката вискозност  $\eta$  даден е со изразот: 
$$\sigma\eta = \frac{n_o q^2}{6\pi r} \quad (4.59)$$

каде  $r$  е радијусот на товарите (јоните). Ако сметаме дека величините  $n_o$ ,  $q$ ,  $r$ , не зависат од температурата (сметаме дека нема топлинска дисоцијација), производот  $\sigma\eta$  треба да биде константен при секоја температура. Но, ако допуштиме дека кај некои течности постои и топлинска дисоцијација, кај нив овој производ расте со пораст на температурата. Така на пример кај трансформаторското масло, кај кое проводливоста е причинета со движење на јоните од примесите, степенот на дисоцијацијата на примесите расте со пораст на температурата и затоа производот  $\sigma\eta$  расте исто така. На сликата 4.24 во својство на пример дадена е една зависност на  $\sigma$  од температурата  $T$ .

При посилни **електрични полиња** струјата во течните диелектрици отстапува од омовиот закон, сл.4.25, што се објаснува со зголемувањето на концентрацијата  $n_o$ , на носителите под дејство на силното електрично поле. Само кај многу чисти течности се забележува хоризонтален дел - струја на заситување слично како кај гасовите. Во табелата 4.8 дадени се некои податоци за течни диелектрици.



сл.4.24: Зависност на проводливоста на маслено – калофониски раствор од температурата



сл.4.25: Зависност U-I кај течни диелектрици

Кај колоидните системи постои **молјонска** или **электрофоретска** проводливост. При ова носители на товари се групи молекули- молјони. Од колоидните системи познати се : **емулзии** во кои двете компоненти се течни, **суспензии** при кои имаме цврсти честички во течност, и **аеросоли** кои се составени од цврсти честички и гас. Во електрично поле молјоните се

движат и оваа појава се вика електрофореза. При тоа фазите се одделуваат, но не настанува промена на материјалот како кај електролизата. Електрофоретска проводливост постои кај изолационите масла кои содржат емулгирана вода и кај органски течности кои содржат смоли.

Табела 4.8: Специфичен ел. отпор и  $\epsilon_r$  на некои течни диелектрици.

течност	вид	$\rho / \Omega\text{m}$	$\epsilon_r$
бензол	неполарен	$10^{11}-10^{12}$	2,2
трансф. масло	неполарно	$10^{11}-10^{12}$	2,3
бензин	неполарен	$10^{10}-10^{13}$	2,0
совол (вид синтет. масло)	поларно	$10^8 - 10^{10}$	4,5
рицинусово масло	поларно	$10^8 - 10^{10}$	4,6
ацетон	многу поларен	$10^4-10^5$	22
етил алкохол	многу поларен	$10^4-10^5$	33
дестилирана вода	многу поларна	$10^3-10^4$	81

#### 4.3.4 Проводливост кај цврстите диелектрици

Проводливоста кај цврстите диелектрици причинета е со движење на слободните јони кои потекнуваат било од самиот диелектрик, било од непожелни примеси - нечистотии, а во извесни случаи се присутни и слободни електрони како носители на проводливоста. Електронската проводливост е присутна при силни електрични полиња. При движење на јоните настанува пренос и на материјал, па и овде како и кај течностите со тек на времето под напон може да се забележи кај некои материјали и повишување на специфичниот отпор (електрично очистување)

Кај цврстите материјали со **јонска структура** проводливоста главно е предизвикана со движење на јоните ослободени од топлински причини. При ниски температури се движат јоните кои потекнуваат од примесите, а при високи - се ослободуваат и сопствени јони од јазлите на кристалната решетка.

Кај материјалите со **атомска или молекуларна** решетка (ковалентна врска), проводливоста е резултат само на присутните примеси и нивната специфична електрична проводливост е многу мала.

Во секој конкретен случај електричната проводливост зависи и од енергијата на активирање на носителите на товарите. Секогаш подвижноста на електроните е многу поголема од подвижноста на јоните.

За специфичната ел. проводливост може да се напише:

$$\sigma = n_o q \mu = n_o q \frac{v}{E} \quad (4.60)$$

каде  $n_o$  е концентрацијата на носители,  $q$  е нивниот товар, а  $\mu$  е подвижноста.

Сметајќи дека при јонска проводливост бројот на дисоцираните јони и нивната подвижност зависат од температурата по експоненцијален закон, може да се напише:

$$n = n_{0,\max} e^{-\frac{W_0}{kT}}; \quad \mu = \mu_{\max} e^{-\frac{W_p}{kT}} \quad (4.61)$$

каде  $n_{0,\max}$  и  $\mu_{\max}$  се вредности за  $T = \infty$ ,  $W_0$  е енергија на ослободување на јоните а  $W_p$  е енергија на придвижување на јоните, која дефинира преод од една неравнотежна положба во друга. Ако се искористат равенките (4.60) и (4.61), и константите се обединат во една заедничка константа  $A$ , ќе се добие:

$$\sigma = A e^{-\frac{b}{T}} \quad b = \frac{W_0 + W_p}{k} \quad (4.62)$$

и оваа зависност по форма е идентична со зависноста (4.55) за течните диелектрици, само што таму коефициентот  $\dagger a^\circ$  ја изразуваше подвижноста на јоните која зависи од вискозноста, а овде коефициентот  $b$  зависи во прв ред од зависноста на бројот  $n_0$  на слободните јони од температурата. Величината “ $b^\circ$ ” овде се движи од 10000 до 22000К.

Равенката (4.62) покажува дека колку е поголема  $W_0 + W_p$ , толку е посилна зависноста на  $\sigma$  од  $T$ . Коефициентот  $b$  се добива по експериментален пат ако се измери зависноста на  $\sigma$  од  $\frac{1}{T}$ .

Ако во диелектрикот струјата е предизвикана од повеќе видови јони, равенката (4.62) ќе гласи:

$$\sigma = \sum_i A_i e^{-\frac{W_i}{kT}} \quad (4.63)$$

и ако оваа зависност се претстави во дијаграм  $\ln \sigma = f\left(\frac{1}{T}\right)$ , се добива искршена линија, сл.4.26.

Кога во материјалот на диелектрикот се присутни примеси со различна концентрација, проводливоста се зголемува при поголеми концентрации на примеси, сл. 4.26. Јоните на примесите се слободни веќе на ниски температури, за разлика од јоните на основниот материјал, и затоа проводливоста на ниски температури е дефинирана од примесите, а сопствената проводливост е занемарлива. Но со порастот на температурата, примесите ќе се “исцрпат” како извор на јони за проводливост, а ќе започне проводливост причинета од дисоцијација на основниот материјал. Затоа, кај зависноста на проводливоста од температурата може да се појави накршување, сл. 4.26.

Сузбивањето на проводливоста од примесите може да се постигне со заштита од навлажување. И најмалото количество на влага многукратно ја зголемува проводливоста на диелектрикот. При сушењето на изолационите материјали во почетокот на процесот на сушењето проводливоста се зголемува заради зголемувањето на температурата, но потоа проводливоста намалува, бидејќи се намалуваат примесите (влагата исто така е примеса, но

помага и во дисоцијацијата на другите примеси) и зависноста од температурата зема друг тек.

Диелектриците треба да се произведуваат и експлоатираат со запазување на голем степен на чистота. Ова особено важи за течните диелектрици. Секое онечистување ја зголемува проводливоста дури и ако нечистотиите се присутни во толку мали количини, кои тешко се докажуваат со хемиска анализа.

За приближна пресметка на специфичната електрична проводливост на цврстите диелектрици може да се користи и равенката (4.57). ( $\sigma = \sigma_0 e^{\alpha\theta}$ )

Ако во равенката (4.62)  $\sigma$  се замени со  $\rho$ , се добива:

$$\rho = B e^{\frac{b}{T}} \quad (4.64)$$

$$\text{или} \quad \rho = \rho_0 e^{-\alpha\theta} \quad (4.65)$$

според тоа температурниот коефициент на специф. отпор е  $TK\rho = -\frac{b}{T^2}$ , или, од (4.65),

$$TK\rho = -\alpha. \quad (4.66)^i$$

Кај тела со јонска кристална решетка проводливоста зависи од валентноста на јоните, при што проводливоста е поголема при едновалентни јони а помала при повеќевалентни. Кај кристалите исто така проводливоста не е иста во сите правци., На пример, кај кварцот проводливоста во правец на главната оска е 1000 пати поголема одошто во правец нормално на неа. Кај аморфните тела специф. проводливост е иста во сите правци и зависи само од составот и примесите. Кај високомолекуларните органски полимери проводливоста зависи и од степенот на полимеризацијата (пр. кај фенолформалдехидната смола) и степенот на вулканизација (на пример кај ебонитот). Кај органските неполярни аморфни диелектрици проводливоста е многу мала (на пример кај полистиролот).

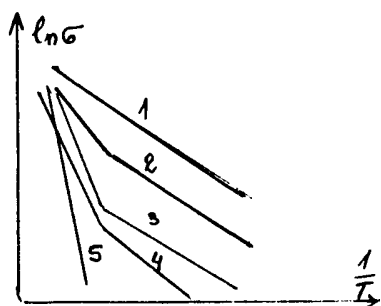
Неорганските стакла спаѓаат во квазиаморфни тела. Нивната проводливост зависи од хемискиот состав и во голема мерка може да се управува. Кварцното стакло (топен кварц) покажува многу мала проводливост. Температурниот коефициент на спец. проводливост е голем, бидејќи  $b = 18000\text{K}$  што покажува дека енергијата потребна за ослободување на јоните е голема.

---

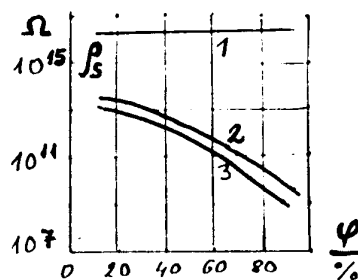
<sup>i</sup> Се добива на следниот начин: На пример, од (4.64):  $TK\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} = \frac{1}{B e^{\frac{b}{T}}} B \frac{b}{-T^2} e^{\frac{b}{T}} = -\frac{b}{T^2}$ . Слично се

добива и од равенката (4.65)





сл.4.26: Зависност на  $\sigma$  од  $1/T$  за примесна и сопствена проводливост:  $n_1 > n_2 > n_3 > n_4$  -примесна, 5-сопствена проводливост



сл.4.27: Зависност на  $\rho_s$  на некои материјали од релативната влажност на воздухот: 1-церезин (неполарен диелектрик) 2-алкално стакло, 3-фенолпласт

Ако во стаклата се додадат оксиди, проводливоста различно се понесува. Додавањето на оксиди на алкалните метали (I група на периодниот систем) специфичната проводливост се зголемува, и тоа дотолку повеќе, доколку радијусот на атомот на металот е помал (на пример Na има помал радијус од K). Коефициентот  $b$  кај стакла со алкални јони е околу 10000K. Оксидите на тешки метали (Ba, Pb) делуваат поволно - го неутрализираат влијанието на алкалните оксиди и ја намалуваат проводливоста.

Електротехничкиот порцелан е систем кој содржи и стаклеста фаза. Со додавање на оксиди на Ba проводливоста опаѓа (радиопорцелан).

Порозните цврсти диелектрици и при мали содржини на влага нагло ја наголемуваат проводливоста. Со сушење проводливоста може да опадне на појдовната вредност. Овие материјали не смеат да се чуваат во влажна атмосфера.

При делување на посилни електрични полиња во цврстите диелектрици можна е појава на слободни електрони и при појаки полиња омовиот закон не важи. Ако полето има јачина  $E = 10-100 \text{ MV/m}$  зависноста на  $\sigma$  се опишува со равенката:

$$\sigma_E = \sigma e^{\beta E} \quad (4.67)$$

каде  $\sigma$  е специф. проводливост при која важи омовиот закон а  $\beta$  е коефициент карактеристичен за самиот материјал.

Кај цврстите диелектрици присутна е и **површинска проводливост** Таа е предизвикана од присуството на влага и нечистотии на површината од цврстиот диелектрик. Водата сама за себе има голема проводливост. И најтенкиот слој влага многу силно делува на зголемување на површинската проводливост. Но крајниот резултат од присуството на влагата сепак зависи од видот на диелектрикот кој е во прашање, па затоа површинската проводливост се разгледува како својство на самиот диелектрик.

Присуството на влага во површинскиот слој многу зависи од релативната влажност на воздухот каде се наоѓа тој диелектрик, и за ова треба да се води сметка. Особено нагло се намалува  $\rho_s$  при релативна влажност на воздухот над 70-80%.

Специфичната површинска проводливост е толку помала, колку е помала поларноста на материјалот и колку е почиста површината на диелектрикот, а исто така колку е површината помазна (полирана). Најголема површинска отпорност имаат неполарните диелектрици чија површина не се кваси (ја “одбиваат” водата).

Поларните диелектрици имаат мал  $\rho_s$ , кој многу зависи од релативна влажност на воздухот. Особено се неповолни во овој смисол диелектрици кои покрај својството да се поларни, делумно и се раствораат во водата образувајќи површински слој од електролит. Освен тоа, поларните диелектрици врзуваат на својата површина и туѓи честички - нечистотии, кои со водата исто така образуваат површински проводен слој. Во овој смисол се неповолни и оние материјали кои имаат порозна структура.

На сл.4.27 дадени се некои примери на зависност на  $\rho_s$  од влажноста, а во табелата 4.9 податоци за  $\rho_s$  на чисти и нечисти површини.

Табела 4.9: $\rho_s$ кај некои материјали		
диелектрик	$\rho_s$ нечистено, $\Omega$	$\rho_s$ , чистено, $\Omega$
алк. стакло	$2 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{11}$
топен кварц	$2 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{13}$
микалекс	$1 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{13}$

За повишување на  $\rho_s$  кај цврстите диелектрици се применуваат разни методи на чистење и миење со вода (ако материјалот не ја впива водата) или растворувачи, калење на 600-700°C (применливо кај неоргански диелектрици кои издржуваат висока температура), препокривање со други материјали, лакирање и слично.

## 4.4. Диелектрични загуби

### 4.4.1 Увод

Диелектричните загуби ја претставуваат моќноста која се развива во диелектрикот при делувањето на електричното поле. Овие загуби предизвикуваат загревање на диелектрикот.

Загубите на моќност во диелектрикот најчесто се непожелни бидејќи доведуваат често и до недопуштено загревање на истиот со можни несакани последици: - пораст на проводливоста, промена на својствата, топлотен пробив, и друго.

Загубите во диелектрикот постојат и при еднонасочна и при наизменична струја (ел. поле). При еднонасочно поле постои проводна струја која создава загуби, кои може целосно да се карактеризираат со величините  $\rho_v$ ,  $\rho_s$ ,  $R_{iz}$ .

При наизменичен напон потребна е друга величина за карактеризирање на загубите, бидејќи освен проводната струја сега има и други појави кои причинуваат енергетски загуби (поларизацијата).

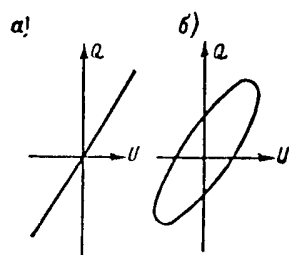
Понекогаш загубите во диелектрикот ги изразуваме преку поимот развиена моќност по единица волумен (**специфични загуби**), но најчесто преку поимот **агол на диелектричните загуби** и **тангенс на аголот на диелектричните загуби**, ( $\tan \delta$ ). Кај нас за

$\tan \delta$  се користи и изразот **фактор на диелектричните загуби**. Диелектрикот се карактеризира со  $\tan \delta$  само при наизменично простопериодично електрично поле, односно, ако кондензаторот од кој е направен диелектрикот е подвргнат на наизменичен напон.

Агол на диелектрични загуби е аголот кој го дополнува до  $90^\circ$  аголот на фазното поместување  $\varphi$  меѓу струјата и напонот во едно коло со кондензатор (диелектрик) при делување на наизменично електрично поле. При идеален кондензатор (и диелектрик) без загуби, векторот на струјата ќе предиде на векторот на напонот за  $90^\circ$ , а аголот на диелектрични загуби  $\delta = 0$  и  $\tan \delta = 0$ .

Природата на загубите во диелектриците е различна и зависи од видот на материјалот кој е во прашање. Покрај струјата на проводливоста (при еднонасочно ел. поле), во создавањето на активните загуби учествуваат и активните компоненти на струјата на поларизацијата (при наизменично ел. поле).

Ако се посматра зависноста  $Q-U$ , за еден кондензатор со даден диелектрик, можни се 2 принципиелно различни случаи (сл.4.28):



сл.4.28: Зависност на товарот од напонот; а)-диелектрик без загуби, б)-диелектрик со загуби.

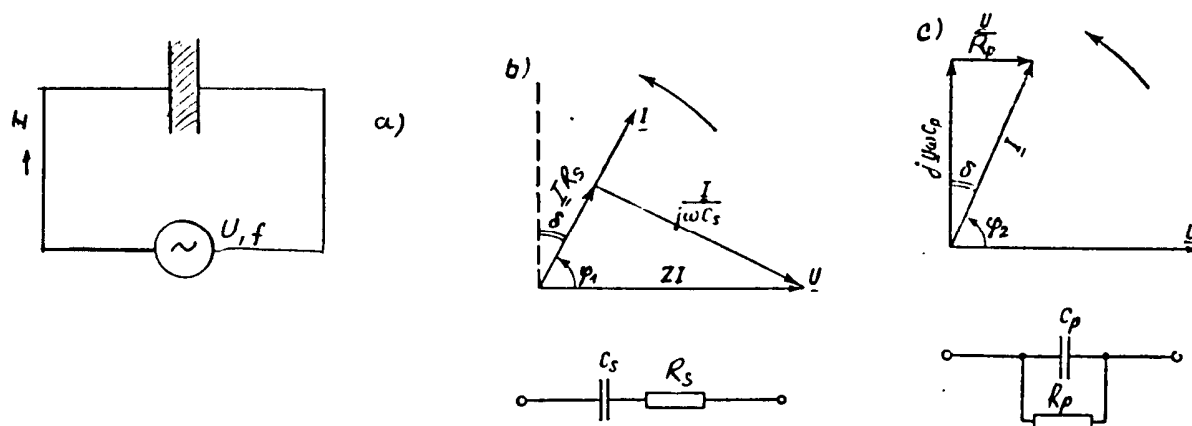
а)-Отсуство на загуби предизвикани од поларизацијата, сл.4.28а. Товарот зависи линеарно од напонот (постои само електронска и јонска поларизација).

б)-Во диелектрикот постојат спори - релаксациони поларизации и загуба на енергија. Зависноста е во вид на елипса, сл.4.28б. Површината на елипсата е пропорционална на количеството на енергија која се апсорбира во диелектрикот во еден период на наизменичниот напон.

Но, во техничките диелектрици има и други причини за развивање на загуби. Тоа може да бидат и разни проводни и полупроводни примеси, гасни шуплини во кои при високи јачини на ел. поле настанува електрично гасно празнење (јонизација) и други.

Да посматраме еден кондензатор со загуби во коло со наизменичен синусоидален напон, сл.4.29а. Ја бараме еквивалентната шема. Таа треба да биде таква, што активната моќност која се развива во неа да биде еднаква на моќноста во реалниот кондензатор. Според тоа, струјата и напонот треба да се со исто фазно поместување  $\varphi$ .

Можни се две еквивалентни шеми - идеален кондензатор  $C_s$  со сериски сврзан отпорник  $R_s$ , или паралелна врска на идеален кондензатор  $C_p$  со паралелно сврзан отпорник  $R_p$ , сл.4.29а и б. Овие шеми се идеализации и не даваат слика за механизмот на настанување на загубите во диелектрикот (физички најреална е шемата според сл.4.1б).



сл.4.29: Диелектрични загуби: а) - симбол на диелектрик со загуби, б) -сериска еквивалентна шема и векторски дијаграм на струјата и напоните, с)-паралелна еквиввалентна шема и векторски дијаграм на напонот и струите.

И двете еквивалентни шеми може успешно да ја извршат зададената задача и при двете може да се постигне еднаквост на привидниот отпор  $Z_1 = Z_2 = Z$  и  $\text{Re } Z_1 = \text{Re } Z_2$  и  $\text{Im } Z_1 = \text{Im } Z_2$ . Притоа е  $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$  и  $P_1 = P_2 = P_a = UI \cos \varphi$ .

За сериската шема важи:

$$P_a = UI \cos \varphi = \frac{U}{Z} \frac{U}{Z} R_s = \frac{U^2 R_s}{X_s^2 + R_s^2} = \frac{U^2 R_s}{X_s^2 \left(1 + \frac{R_s^2}{X_s^2}\right)} = \frac{U^2 \omega C_s \tan \delta}{1 + \tan^2 \delta}, \quad \text{бидејќи} \quad \cos \varphi = \frac{R_s}{Z} \quad (4.68)$$

$$\tan \delta = \omega C_s R_s \quad \text{и} \quad X_s = \frac{1}{\omega C_s}$$

За паралелната шема е:

$$P_a = UI_a = U U \omega C_p \tan \delta = U^2 \omega C_p \tan \delta, \quad \tan \delta = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (4.69)$$

$$\text{бидејќи} \quad I_a = I_c \tan \delta = U \omega C_p \tan \delta$$

Со изедначување на вредностите за  $P_a$  и  $\tan \delta$  од двете шеми се добива:

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \tan^2 \delta}, \quad R_p = R_s \left(1 + \frac{1}{\tan^2 \delta}\right) \quad (4.70)$$

Ако диелектрикот е квалитетен и има мали загуби,  $\tan^2 \delta \ll 1$ , и во таков случај се добива  $C_p \approx C_s \approx C$ . Моќноста во двете шеми сега се изразува со ист израз

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta = S_c \operatorname{tg} \delta \quad (4.71)$$

каде  $S_c$  е привидната реактивна моќност. Меѓу отпорите не постои еднаквост, напротив според (4.32) излегува  $R_p \neq R_s$ . Равенката 4.71 дава оправдување на името “фактор на загубите”. Имено, **загубите се пресметуваат со множење на привидната моќност  $S_c$  со факторот  $\operatorname{tg} \delta$ .**

Специфичните загуби (загуби по единица волумен) се (се искористува (4.69) и  $V = Sd$ ):

$$p = \frac{P_a}{V} = \frac{U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta}{Sd} = \frac{d^2 E^2}{Sd} \omega \epsilon_o \epsilon_r \frac{S}{d} \operatorname{tg} \delta = \omega \epsilon_o \epsilon_r \operatorname{tg} \delta E^2 = \sigma_a E^2 \quad (4.72)$$

каде се користи замената  $\sigma_a = \omega \epsilon_o \epsilon_r \operatorname{tg} \delta$  и каде  $p$  ( $=$ )  $\text{W/m}^3$  се специфичните загуби,  $f$  е фреквенцијата,  $\text{s}^{-1}$ ,  $E$  е јачината на електричното поле,  $\text{V/m}$ .

Бидејќи капацитетот на коцка од диелектрик со раб  $1\text{m}$  е  $C_1 = \epsilon_o \epsilon_r$ , реактивната ( $\sigma_c = \omega C_1$ ) и активната компонента  $\sigma_a = \omega \epsilon_o \epsilon_r \operatorname{tg} \delta$  на специфичната проводливост се:

$$\sigma_c = \omega C_1 = \omega \epsilon_o \epsilon_1 = 2\pi f \epsilon_1 \frac{1}{36\pi} 10^{-9} = \frac{\epsilon_r f}{1,8 \cdot 10^{10}}, \quad \sigma_a = \sigma_c \operatorname{tg} \delta = \frac{\epsilon_r f \cdot \operatorname{tg} \delta}{1,8 \cdot 10^{10}} \quad (4.73)$$

Треба да се забележи дека капацитетот на диелектрикој кој има големи загуби е неодредена величина, бидејќи зависи од видот на еквивалентната шема. Затоа, и диелектричната пропусливост на материјали со поголеми загуби при наизменичен напон исто така е условна величина. Но, аголот  $\delta$  не зависи од изборот на шемата, таб.4.10.

Табела 4.10:  $\operatorname{tg} \delta$  и  $\epsilon_r$  на диелектрик со големи загуби

карактеристика	влажен материјал	
	фенолпласт	кабелска хартија
$\operatorname{tg} \delta$	0,66	0,35
$\epsilon_r$ , сериска шема	28	4,8
$\epsilon_r$ парал. шема	19,5	4,3

Параметрите на еквивалентната шема  $R_s$ ,  $C_s$ ,  $R_p$ ,  $C_p$  одредени при некоја фреквенција не важат и при друга, многу различна од првата. Најправилно е тие да се одредат (измерат) при онаа фреквенција која не интересира.

Од равенките (4.71) и (4.72) согледуваме дека диелектричните загуби се од голема важност за материјали кои се користат при јаки полиња (висок напон) или при високи фреквенции, или при обата услови заедно. Тоа е затоа што загубите се пропорционални на  $E^2$  и на  $\omega$ . За такви примени треба да се одберат материјали со мала вредност на аголот на загубите  $\delta$  и  $\epsilon_r$ , со цел загубите да бидат мали.

#### 4.4.2. Видови диелектрични загуби во диелектричните материјали

Според некои својства обусловени од физичката природа, диелектричните загуби можеме да ги поделиме на типови:

1. Диелектрични загуби каде главна улога игра поларизацијата,
2. Диелектрични загуби каде главна улога игра проводливоста,

3. Јонизациони диелектрични загуби,

4. Диелектрични загуби обусловени со нехомогената структура на диелектрикот.

Диелектричните загуби обусловени од **поларизацијата** се јавуваат кај материји каде доминира релаксационата поларизација. Тоа се диелектрици со диполна структура и диелектрици со јонска структура, но со недоволно густо пакување на јоните. Кај овие материјали  $tg\delta$  зависи и од температурата и од фреквенцијата.

При некоја дадена температура  $tg\delta$  достигнува максимум. Ова се објаснува со фактот, што при таа температура времето на релаксацијата на честичките се совпаѓа со времето на периодата од наизменичното ел. поле (ова доаѓа преку зависноста на вискозноста од температурата).

Кај фероелектричните материјали загубите се многу интензивни при температури пониски од Кириевата температурна точка, додека над неа тие се многу помали.

Во оваа група спаѓаат и т.н. “резонантни загуби” кои се набљудуваат при високи фреквенции кај некои гасови. При тие фреквенции настанува силна апсорпција на енергијата на електричното поле. Исто така, резонантни загуби настануваат и во некои цврсти материјали ако фреквенцијата на принудните осцилации предизвикани од ел. поле се совпадне со сопствената фреквенција на честичките од материјалот.

**Диелектрични загуби каде доминира струјата на проводливоста** се јавуваат кај диелектрици кои имаат поголема волуменска или површинска проводливост. Кај нив  $tg\delta$  може да се пресмета по формулата

$$tg\delta = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{\varepsilon_r f \rho} \quad (4.74)$$

Загубите  $P_a$  кај овие материјали не зависат од фреквенцијата, а  $tg\delta$  се намалува со фреквенцијата по хиперболичен закон ( $\sim \frac{1}{\omega}$ ): ( $P_a = U^2 \omega C tg\delta$ ).

Овој вид загуби зависи од температурата по експоненцијален закон:

$$P_{aT} = A e^{-\frac{b}{T}} \quad (4.75)$$

каде што  $A$  и  $b$  се константи за дадениот материјал. Претходната формула може да се препише во формата:

$$P_{a\theta} = P_{a0} e^{\alpha\theta} \quad (4.76)$$

каде  $P_{a\theta}$  се загубите при температура  $\theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), а  $P_{a0}$  се загубите при  $0^{\circ}\text{C}$ , “ $\alpha$ ” е константата на материјалот. Кај овие материјали  $tg\delta$  се менува со температурата на ист начин како и  $P_a$ , бидејќи  $C$  не се менува со температурата.

**Јонизационите загуби** се карактеристични за гасните диелектрици. Тие се јавуваат во нехомогени ел. полиња каде јачината на полето  $E$  ќе ја надмине критичната вредност  $E_j$

при која почнува самостојно празнење на гасот (јонизација). Овие загуби можеме да ги пресметаме по формулата:

$$P_{aj} = A_1 f (U - U_j)^3 \quad (4.77)$$

каде  $A_1$  е константа,  $f$  е фреквенцијата,  $U$  е приложениот напон, а  $U_j$  е напонот при кој почнува јонизацијата. Притоа е  $U > U_j$ , а  $U_j$  исто така зависи од притисокот на гасот.

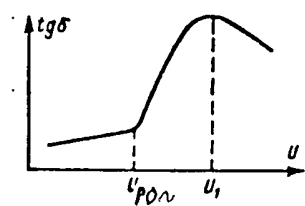
**Диелектрични загуби предизвикани со нехомогена структура.** Овие загуби се присутни кај слоевидните диелектрици од импрегнирана хартија или платно, пластични маси со полнители, порозна керамика, миканити и други. Бидејќи се многу различни по структурата и составот, не постои општо правило за пресметка на диелектричните загуби кај овие материјали.

#### 4.4.3. Диелектрични загуби во гасови

Ако ел. поле е помало од критичното при кое настанува ударна јонизација, диелектричните загуби во гасовите се многу мали. Затоа гасовите можеме да ги сметаме за идеални диелектрици. Причина за диелектричните загуби во гасот може да биде само ел. проводливост, бидејќи поларизацијата се одвива без загуби. Вредноста на  $\tan \delta$  кај гасовите може да се пресмета по (4.74). Ако се усвои  $\rho = 10^{16} \Omega m$ ,  $\epsilon_r = 1$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ , се добива  $\tan \delta = 4 \cdot 10^{-8}$ .

При повисоки јачини на полето (во нехомогено поле) кога во некои места настанува јонизација на гасот, загубите се зголемуваат но ова сега се јонизациони загуби.

Кај цврстата изолација која има гасни шуплини и е наменета за работа во јако ел. поле (техника на висок напон), појавата на овој вид загуби јасно се детектира ако се сними зависноста  $\tan \delta = f(U)$ . Оваа зависност се вика крива на јонизација, сл.4.30. Оваа појава е многу штетна за тврдата изолација наменета за јаки ел. полиња, бидејќи доведува до електро-хемиско разрушување и проширување на шуплините, особено ако тврдата изолација е од органски карактер. Тоа е затоа што при оваа појава се ослободуваат штетни гасови во шуплините (озон, азотни оксиди) кои хемиски го разрушуваат диелектрикот). Појавата се смета за една од главните причини за стареење и испад на овој вид изолација.



При  $U_{\rho 0}$  настанува почеток на појавата јонизација, а при  $U_1$  гасните шуплини масовно се пробиваат. Најдобро е работните напони на изолацијата да бидат под  $U_{\rho 0}$ .

сл.4.30: Зависноста на  $\tan \delta$  од  $U$  при високонапонска изолација со шуплини (крива на јонизација)

#### 4.4.4. Диелектрични загуби кај течни диелектрици

Кај неполарните течни диелектрици загубите се присутни само заради проводливоста. Бидејќи проводливоста кај овие материјали е мала, мали се и загубите. Нив ги пресметуваме според (4.74).

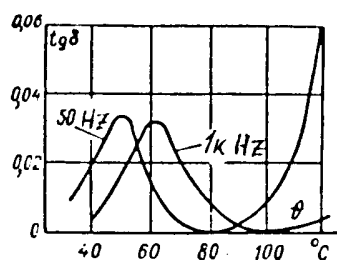
Кај поларните течни диелектрици покрај загубите заради диполно-релаксационата поларизација, постојат загуби и заради проводливоста. На сликата 4.31 дадени се зависности на  $tg\delta$  од температурата кај маслено-калафониски компаунд кој претставува поларна течност со диполно-релаксациона поларизација. Обликот на зависноста со максимумите при дадени температури се објаснува со самиот карактер на диполно-релаксационата поларизација. Со промената на температурата всушност се менува вискозноста на течниот диелектрик.

При голема вискозност и пониска температура, диполите тешко се ориентираат и загубите се мали. При многу мала вискозност (и висока температура), диполите многу лесно се ориентираат (без големо триење) па загубите одново се мали. Натомошниот пораст на  $tg\delta$  при уште повисоки температури, се должи на порастот на проводливоста која доминира како механизам на диелектричните загуби при повисоки температури. При повисоки фреквенции максимумот се поместува кон повисоки температури, бидејќи при повисоки фреквенции потребно е помало време на релаксација за да се добие максимум на  $tg\delta$ .

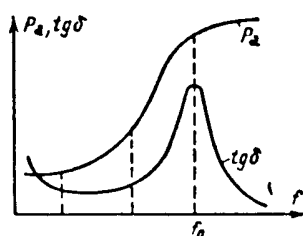
Што се однесува до зависноста од фреквенцијата, сл.4.32, кај поларните течни диелектрици забележуваме пак еден максимум во вредноста на  $tg\delta$ . При таа фреквенција диполите тешко успеваат да ги следат промените на полето.

Се до таа фреквенција моќноста на загубите расте, а исто така и  $tg\delta$ . Над таа вредност  $P_a$  останува иста, а  $tg\delta$  опаѓа.

При ниски фреквенции (50Hz) кај поларните течни диелектрици, во создавањето на загубите доминира проводливоста, па  $tg\delta$  е многу поголем одошто кај неполарните. На пример за трансформаторско масло е  $\epsilon_r=2,3$  и  $tg\delta=0,001$ , додека за поларното вештачко изолационо масло совол е  $\epsilon_r = 4,5$  и  $tg\delta = 0,02$ .



сл.4.31: Зависност на  $tg\delta$  од  $\theta$  при разни фреквенции за маслено калафониски компаунд (раствор).



сл.4.32: Зависност на  $tg\delta$  од  $f$  при течен поларен диелектрик

#### 4.4.5. Диелектрични загуби кај цврстите диелектрици

И кај цврстите диелектрици кога ги посматраме диелектричните загуби треба да водиме сметка за нивната градба. За посистематско проучување, добро е сите цврсти диелектрици од аспект на диелектричните загуби да ги поделиме на неколку групи:

1. Диелектрици со молеку-



ларна структура, напр. природни или вештачки смоли,

2. Диелектрици со јонска структура,
3. Фероелектрични материјали
4. Нехомогени диелектрици.

Кај диелектриците со **молекуларна структура** треба да разликуваме неполярни и поларни. **Неполярните** диелектрици имаат занемарливо мали диелектрични загуби. Такви се церезин, неполярните полимери полиетилен, политетрафлуоретилен (тефлон), полистирол и други. Овие спаѓаат во најквалитетните диелектрици.

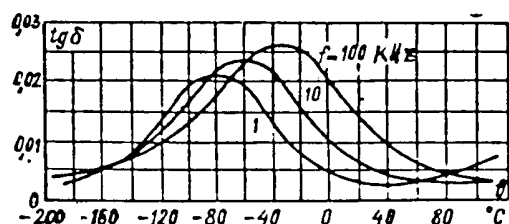
Во **поларните** диелектрици со молекуларна структура спаѓаат многу органски материјали, многу користени во електротехниката: целулозни производи, хартија, картон, поларни полимери: полиметилметалкрилат (органско стакло - плексиглас), полиамиди, полиуретани, каучукови производи (ебонит), фенолформалдехидни смоли (бакелит), ацетилцелулоза. Сите овие супстанции имаат поголеми загуби кои уште зависат и од температурата. При одредени температури се појавуваат минимум и максимум на загубите. После минимумот обично загубите одново растат заради зголемена проводна струја. На слика 4.33 даден е пример за хартијата.

Кај диелектричните **материјали со јонска структура** својствата зависат од начинот на пакување на јоните во решетката. Ако јоните се густо пакувани и без примеси кои ја деформираат решетката, диелектричните загуби се мали. При повишени температури кај таквите материјали загубите растат заради зголемена проводливост. Во овие материјали спаѓаат многу кристални неоргански соединенија, кои се важни во производството на ел. техничка керамика, например корунд ( $Al_2O_3$ ) кој влегува во составот на ултрапорцеланот.

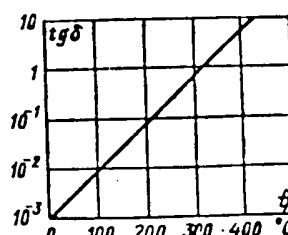
Други кристални супстанции имаат недоволно густо пакувани јони. Кај нив е присутна релаксационата поларизација и тие имаат зголемени загуби. Таков е мулитот кој влегува во состав на електропорцеланот, кордиеритот, компонента на керамиката со мал темп. коефициент на ширење и други. Бидејќи кај мнозинството керамики бројот јони кои учествуваат во релаксационата поларизација постепено расте со порастот на температурата, не се јавува максимум во зависноста на  $tg\delta$  од температурата, и температурната зависност на  $tg\delta$  е слична на температурната зависност на  $\rho$  и има експоненцијален карактер, сл.4.34.

Диелектричните загуби во **аморфни супстанции со јонска структура** во кои спаѓаат стаклата и порцеланот поврзани се со појавите на поларизација и електрична проводливост. Кај стаклата се можни два механизми на загуби:

- загубите малку зависат од температурата и растат право пропорционално со фреквенцијата ( $tg\delta$  не зависи од фреквенцијата),
- загубите многу зависат од температурата (експоненцијално), а малку зависат од фреквенцијата (со пораст на фреквенцијата  $tg\delta$  опаѓа).



сл.4.33: Зависност на  $\text{tg}\delta$  од температурата за сува хартија при разни фреквенции



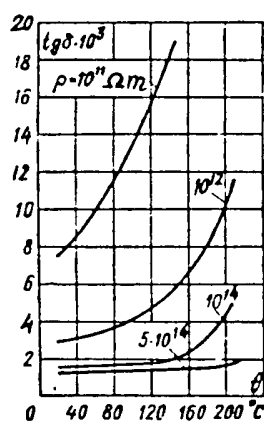
сл.4.34: Зависност на  $\text{tg}\delta$  од температурата за керамика која содржи титанови оксиди при фреквенција 50 Hz.

Првиот механизам е присутен кај сите технички стакла и обусловен е од релаксационата поларизација. Чистото кварцно стакло во овој поглед е најдобро, има мали релаксациони загуби. Вториот механизам е предизвикан од движењето на слободните јони и треба да се посматра како загуби предизвикани од проводливоста. Тие се особено изразени при температури над 50-100°C.

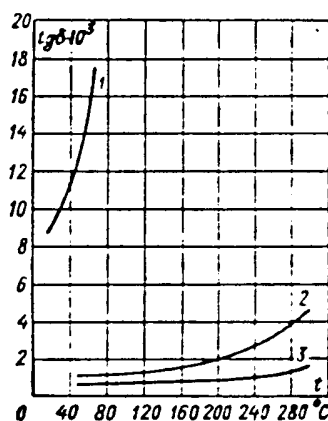
На сл.4.35 дадени се примери од кои се гледа дека загубите се многу поголеми ако проводливоста е поголема. Факторот на загубите  $\text{tg}\delta$  кај  $\text{Al}_2\text{O}_3$  е многу мал и не зависи од температурата, а  $\text{tg}\delta$  на електротехничкиот порцелан е голем и силно зависи од температурата. Диелектричните загуби во неорганските стакла зависат од видот на металните оксиди. Присуството на алкални оксиди ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  при отсуство на тешките оксиди ( $\text{BaO}$ ,  $\text{PbO}$ ) дава големи загуби, а со присуството на тешките оксиди,  $\text{tg}\delta$  на алкалните стакла се намалува.

Цврстите материјали со **нехомогена структура** обично се составени од две механички размешани компоненти. Ова се пред сè керамиките. Керамиката е сложен повеќефазен систем. Обично е присутна кристална фаза, стакловидна фаза и гасна фаза (шуплини), сл.4.36.

За влијанието на гасната фаза речено е во врска со јонизационите криви и тука загубите растат при силните електрични полиња. Загубите во керамиката растат ако во неа има полупроводни примеси кои даваат електронска проводливост, а исто така ако порозната керамика апсорбира влага. Во овие материјали спаѓа и лискунот кој има слоеста структура. Ако во него има примеси, загубите се поголеми во однос на чист монокристален лискун.

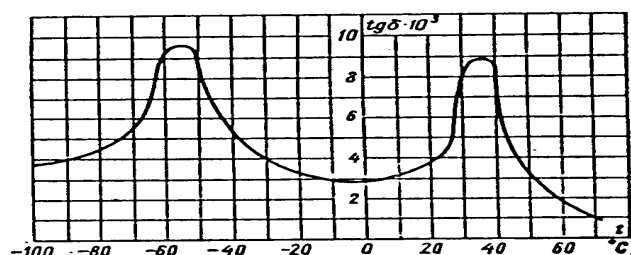


сл.4.35: Зависност на  $\text{tg}\delta$  од температурата при  $f=1\text{MHz}$  за алкални стакла при различно  $\rho$ . ( $\rho$  мерено при  $20^\circ\text{C}$ )



сл. 4.36: Зависност на  $\text{tg}\delta$  од температурата при  $f=1\text{MHz}$ : 1- ел. техн. порцелан; 2- ултрапорцелан; 3 - алум. оксид.

првиот при ниски температури кој зависи од диполно-радикалните релаксациони поларизации на самата целулоза, и вториот при повисока температура, кој е зависен од диполно-релаксационите загуби на импрегнациското средство, сл.4.37.



сл.4.37: Зависност на  $\text{tg}\delta$  од температурата за кондензаторска хартија импрегирана со маслено – калофониски компаунд.

Импрегнираната хартија исто така спаѓа во нехомогени изолации. Тука е присутна хартијата со влакната од целулоза и импрегнантското средство од различен вид. Диелектричните загуби на импрегираната хартија зависат од својствата на двете компоненти, нивното процентуално учество, степенот на импрегнацијата (дали се заостанати воздушни меурчиња) и слично. Во зависноста  $\text{tg}\delta$  - температура кај импрегираната хартија присутни се два максимума; -

Во електротехниката се користат голем број композитни материјали кои спаѓаат во нехомогени диелектрици. Понекогаш причината за нивното користење е постигање на потребната механичка цврстина (додаток на влакна), а во други случаи добивање на потребните својства со избор на полнителите (смоли, пластични маси) или за искористување на драгоцените отпадоци (на пример, некои производи на лискунот).