

## LUCRAREA 1

# Materiale dielectrice. Condensatoare

### Permitivitatea complexă și tangenta unghiului de pierderi

Interacțiunea substanței cu câmpul electric este caracterizată în domeniul liniar de *permitivitatea complexă relativă*:

$$\underline{\varepsilon} = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \frac{\underline{D}}{\varepsilon_0 \underline{E}} \quad (1.1)$$

unde  $\underline{D}$  - inducția câmpului electric;

$\underline{E}$  - intensitatea câmpului electric;

$\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \text{ F/m}$  - permitivitatea vidului

Un material dielectric cu permitivitatea complexă relativă  $\varepsilon$  se introduce între armăturile unui condensator având în vid capacitatea  $C_0$ . Cu aproximația că liniile câmpului electric se închid în întregime prin material, admitanța la bornele condensatorului are expresia:

$$\underline{Y} = j\omega \underline{\varepsilon} C_0 = \omega \varepsilon'' C_0 + j\omega \varepsilon' C_0 \quad (1.2)$$

După cum se observă din relația de mai sus, există o componentă reală a conductivității, ceea ce e echivalentul unei rezistențe  $R_{ech}$  în paralel cu condensatorul, și o componentă imaginară ce dă capacitatea  $C_{ech}$  fără pierderi a condensatorului.

$$R_{ech} = \frac{1}{\omega \varepsilon'' C_0} \quad (1.3)$$

$$C_{ech} = \varepsilon' C_0 \quad (1.4)$$

Se definește ca *tangentă a unghiului de pierderi a materialului* raportul:

$$\text{tg} \delta_\varepsilon = \frac{I_{R_{ech}}}{I_{C_{ech}}} = \frac{1}{\omega C_{ech} R_{ech}} = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (1.5)$$

Inversul tangentei unghiului de pierderi se numește *factor de calitate al materialului dielectric*:

$$Q_\varepsilon = \frac{1}{\text{tg} \delta_\varepsilon} = \omega C_{ech} R_{ech} = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon''} \quad (1.6)$$

Permitivitatea complexă relativă se poate rescrie în forma:

$$\underline{\varepsilon} = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon' (1 - j \text{tg} \delta_\varepsilon) \quad (1.7)$$

Din expresia de mai sus (1.7) se observă că partea reală a permitivității complexe relative caracterizează materialul din punct de vedere al polarizării sale, iar partea imaginară din punct de vedere al pierderilor de material.

### Tipuri de polarizare și tipuri de pierderi în dielectrici

Un material este polarizat electric dacă, fără a avea densitate de sarcină electrică, produce un câmp electric și este supus unor acțiuni ponderomotoare când este introdus în câmp electric exterior (evident că în același timp corpurile polarizate electric pot fi încărcate și cu sarcină electrică adevărată).

Starea de polarizație electrică poate fi *temporară*, dacă depinde de intensitatea locală a câmpului electric în care este situat materialul și *permanentă*, dacă nu depinde de intensitatea locală a câmpului electric.

*Polarizarea temporală* se obține prin deplasarea limitată sub acțiunea câmpului electric a sarcinilor electrice legate sau orientarea dipolilor electrici existenți în material. În acest fel polarizarea temporară poate fi: polarizare de deplasare (electronică, ionică), polarizare de orientare (dipolară, electronică, ionică), polarizare rezonantă, polarizare structurală. Aceste moduri de polarizare diferă de la un grup de material la altul, cele mai frecvente cazuri fiind însă acelea în care un același material își datorează starea de polarizație acțiunii simultane a două sau mai multe procese de polarizare.

**Polarizarea electronică** reprezintă deplasarea limitată, elastică, sub acțiunea câmpului electric a învelișurilor electronice a atomilor și ionilor. Timpul de stabilire a polarizării electronice este de aproximativ  $10^{-15}$ s (foarte mic în comparație cu perioadele semnalelor uzuale în electronică).

Acest mod de polarizare se observă la toate tipurile de dielectrici, indiferent de starea de agregare.

**Polarizarea ionică** se datorează deplasării ionilor legați elastic fiind tipică pentru corpurile solide cu structură ionică. Timpul de stabilire este de ordinul  $10^{-13}$ s, puțin mai mare decât în cazul polarizării electronice, dar suficient de mic în comparație cu perioadele semnalelor uzuale.

**Polarizarea dipolară de orientare (relaxare)** este tipică substanțelor cu molecule polare care în absența câmpului sunt orientate haotic sub influența energiei termice a rețelei cristaline, iar în prezența câmpului electric se orientează parțial. Moleculele polare, sunt caracteristice anumitor gaze și lichide. Polarizarea dipolară de orientare apare și în cazul unor substanțe solide organice la care nu molecula ci anumiți radicali polari se orientează în câmpul electric.

**Polarizarea ionică de orientare (relaxare)** se constată la unele substanțe solide cu legături ionice slabe și constă în deplasări suplimentare în direcția câmpului a ionilor în timpul mișcării termice haotice.

**Polarizarea electronică de relaxare** se datorează orientării sub acțiunea câmpului a electronilor suplimentari sau a „golurilor” fiind caracteristică unor dielectrici solizi cu indice de refracție ridicat în care prezența unor ioni străini creează electroni suplimentari sau „goluri”.

**Polarizarea rezonantă** se constată în dielectrici pentru radiații cu frecvențe de ordinul de mărime a radiațiilor luminoase și este legată de frecvența proprie de rezonanță a electronilor sau ionilor substanței.

**Polarizarea structurală** apare în corpurile solide cu structură macroscopic neomogenă și constă în deplasarea sarcinilor electrice în limitele fiecărei incluziuni, ceea ce echivalează unei polarizări a materialului.

*Polarizarea permanentă* se datorează acțiunilor mecanice (polarizare piezoelectrică), efectelor termice (polarizare piroelectrică), unor tratamente termice prealabile în câmp electric (efect de electret) sau poate fi spontană. Polarizarea spontană se caracterizează prin existența unor domenii de polarizare spontană în interiorul cărora dipolii electrici sunt orientați paralel, domeniile având orientări diferite, astfel încât, pe ansamblu materialul poate să nu prezinte polarizație. În prezența câmpului electric domeniile se orientează, ajungându-se la saturație pentru o anumită valoare a câmpului exterior.

Prin introducerea în câmp electric a unui material dielectric o parte din energia câmpului se disipă în substanță, în majoritatea cazurilor transformându-se în căldură. Energia disipată în unitatea de timp în material, sub influența și pe seama câmpului electric, constituie *pierderile în dielectric*. Ele sunt caracterizate din punct de vedere al proprietăților substanței de  $\epsilon''$ , partea imaginară a permitivității complexe relative. Principalele tipuri de pierderi în dielectrici se pot clasifica după cum urmează:

- **Pierderi prin polarizare.** Cu excepția polarizărilor de deplasare (electronică și ionică care nu sunt însoțite de pierderi întrucât deplasările particulelor încărcate sunt elastice, toate celelalte mecanisme de polarizare au loc cu consum de energie din partea câmpului electric. Această energie este cheltuită pentru a învinge rezistențele întâmpinate în orientarea dipolilor din partea rețelei în agitație termică (în cazul polarizărilor de orientare și în cazul polarizării spontane) sau pentru a întreține oscilațiile proprii ale electronilor sau ionilor substanței (în cazul polarizării rezonante). Pierderile prin polarizare sunt proporționale cu suprafața ciclului inducție-intensitate a câmpului electric aplicat).
- **Pierderi prin conducție electrică,** apar la dielectricii care au conductibilitate volumetrică sau superficială mare.
- **Pierderi prin ionizare** sunt caracteristice dielectricilor în stare gazoasă sau dielectricilor solizi cu incluziuni gazoase, în prezența unor câmpuri a căror intensitate depășește valoarea corespunzătoare începutului ionizării în gaz.
- **Pierderi condiționate de neomogenitatea structurală** apar la dielectricii în a căror compoziție se întâlnesc adaosuri întâmplătoare sau componente adăugate intenționat pentru variația necesară a proprietăților materialului de bază.

Pentru majoritatea dielectricilor polarizarea este însoțită nu numai de unul ci de mai multe tipuri de pierderi (din cele enumerate înainte), ceea ce complică un studiu teoretic detaliat al pierderilor și justifică folosirea unor formule empirice. O oarecare ușurare intervine însă datorită faptului că pe anumite domenii de frecvență, temperatură sau valoare a intensității câmpului electric, anumite tipuri de pierderi sunt preponderente, ceea ce permite un studiu al lor prin neglijarea tuturor celorlalte.

### **Rigiditatea dielectrică**

În câmpuri electrice puternice densitatea curentului de conducție în materialul dielectric nu mai depinde liniar de intensitatea câmpului și, corespunzător, materialul își pierde proprietățile sale izolante. Fenomenul se numește străpungerea dielectricului, iar valoarea intensității câmpului la care se produce acest fenomen poartă numele de *rigiditate dielectrică*.

**Rigiditatea materialelor dielectrice gazoase.** În dielectricii gazoși străpungerea se datorează în majoritatea cazurilor ionizărilor prin ciocnire. Prin acest mecanism străpungerea se produce atunci când energia cinetică a purtătorilor de sarcină liberi (electroni și ioni) este suficientă pentru a produce ionizarea prin ciocnire a moleculelor gazului. În condiții normale

de temperatură și presiune gazele au o rigiditate de 3MV/m. Creșterea presiunii gazului conduce la creșterea rigidității, iar o micșorare a presiunii duce la același efect, mărirea rigidității. Rigiditatea gazelor în câmp omogen variază în funcție de frecvență. Pentru frecvențe joase se constată o scădere a rigidității datorită acumulării de sarcini de volum, pentru frecvențe înalte rigiditatea crește deoarece durata procesului de ionizare prin ciocnire devine comparabilă cu semiperioada câmpului electric alternativ.

Un alt tip de străpungere este efectul corona care apare în câmpurile neomogene. La contactul dintre gaze și dielectricii solizi apare „conturnarea superficială”, mici descărcări datorate câmpurilor neomogene.

**Rigiditatea materialelor dielectrice lichide.** În cazul dielectricilor lichizi cu grad înalt de puritate, străpungerea se datorează ionizării prin ciocnire. Rigiditatea poate ajunge la 100MV/m. Pentru dielectricii lichizi de puritate tehnică rigiditatea este însă mult mai mică datorită adaosurilor: apă, bule de gaz, particule mecanice mărunte. Rigiditatea dielectricilor lichizi depinde de tipul și cantitatea adaosurilor, încadrându-se în majoritatea cazurilor în zona 20-25MV/m. Pentru câmpuri de frecvență ridicată, în special în cazul lichidelor polare, pierderile dielectrice conduc la o încălzire a lichidului ceea ce favorizează străpungerea, deci rigiditatea scade cu creșterea frecvenței. Restabilirea rigidității dielectrice a lichidelor după ce a avut loc străpungerea nu mai este perfectă, dar cazurile de formare a scurtcircuitelor permanente în urma străpungerii sunt rare și cu totul particulare.

**Rigiditatea materialelor dielectrice solide.** Rigiditatea la aceste materiale se ridică până la sute de MV/m. Are o valoare mai mare în cazul dielectricilor polari, însă scade foarte mult cu temperatura. În cazul dielectricilor nepolari rigiditatea are o valoare mai mică, însă aproape independentă de temperatură până la acele valori ale temperaturii care conduc la pierderea proprietăților de corp solid. Străpungerea este distructivă, de scurtă durată.

### Utilizările materialelor dielectrice

În funcție de proprietăți, materialele dielectrice sunt folosite în special în următoarele scopuri:

- a) dielectrice pentru condensatoare; în acest caz sunt esențiale proprietățile dielectrice ale materialului (valoarea permitivității complexe relative și dependența acesteia de frecvență și temperatură, rigiditatea dielectrică) dar, în anumite cazuri, sunt importante și rezistența mecanică, conductivitatea termică, higroscopicitatea;
- b) materiale pentru fabricarea pieselor electroizolante de cele mai diverse tipuri utilizate în aparatura electronică (casete, socluri, comutatoare, clape, etc.); pentru această utilizare sunt foarte importante valorile rezistenței mecanice, a higroscopicității, a rigidității dielectrice și a rezistivității volumetrice și superficiale ca și proprietatea de prelucrabilitate comodă și posibilitatea de obținere a unor forme constructiv complicate printr-un număr mic de operații tehnologice;
- c) materiale pentru realizarea unor suporturi dielectrice în tehnologia cablajelor imprimate și în tehnologia microelectronică peliculară; proprietățile dielectrice trebuie să fie însoțite de bune proprietăți mecanice, de nehigroscopacitate și, în special în ultimul caz, de o conductivitate termică ridicată;
- d) materiale de impregnare, de umplere sau de protecție pentru componente; în acest scop se folosesc atât materiale dielectrice lichide sau solide în stare pură cât, mai ales, compoundinguri și lacuri;
- e) materiale pentru dispozitive dielectrice numerice, care utilizează rectangularitatea ciclului de polarizare;

- f) materiale pentru amplificatoare și modulatori dielectrice utilizând neliniaritatea ciclului de polarizare;
- g) materiale pentru transductoare piezoelectrice.

### Clasificare

- a) dielectrici gazoși
  - gaze naturale: heliu, hidrogen, oxigen, azot, argon, bioxid de carbon, etenă, aer uscat, aer umed;
  - gaze sintetice: hexaclorură de sulf, diclorodiflormetan, hexafloretan, octoflorciclobutan, tetraclorură de carbon;
- b) dielectrici lichizi:
  - uleiuri minerale: ulei de condensator, ulei de transformator;
  - uleiuri sintetice: hidrocarburi aromatice clorurate, uleiuri siliconice, dibutylsebacat;
- c) dielectrici solizi:
  - organici: celuloza, cauciucul, polimerii, monomerii, materiale sintetice termoplastice nepolare, materiale sintetice termoplastice polare, materiale sintetice termorigide, materiale dielectrice celulozice,
  - anorganici: mica și materiale pe bază de mică, sticla, materiale ceramice, materiale dielectrice cu polarizare spontană, materiale piezoelectrice, pelicule dielectrice din oxizi ai metalelor

### Condensatoare

Condensatorul este componenta electronică pasivă pentru care, în mod ideal, există următoarea relație între tensiunea la borne și curentul care o străbate

$$u = \frac{1}{C} \int i dt \quad (1.8)$$

unde C este capacitatea condensatorului.

Din punct de vedere constructiv condensatoarele pot fi:

- **condensatoare fixe**, a căror capacitate se stabilește la fabricație și rămâne constantă pe întreaga durată de funcționare;
- **condensatoare variabile**, a căror valoare se poate modifica în limite stabilite în timpul funcționării.

Din punct de vedere al dielectricului utilizat condensatoarele se clasifică în:

- condensatoare cu dielectric gazos;
- condensatoare cu dielectric lichid;
- condensatoare cu dielectric anorganic solid (mică, ceramică, sticlă, pelicule oxidice, etc.);
- condensatoare cu dielectric organic solid (hârtie, pelicule plastice, etc.)

### Normarea condensatoarelor fixe

Din punct de vedere funcțional condensatoarele fixe sunt caracterizate de următoarele mărimi:

**Capacitatea nominală  $C_n$  și toleranța acesteia.** Capacitatea nominală a condensatorului se specifică pentru temperatura normală (20 sau 25°C) și o anumită frecvență (800 sau 1000 Hz). Pentru condensatoarele cu capacitate nominală până la 1μF valorile nominale sunt normalizate conform seriilor internaționale E<sub>6</sub>, E<sub>12</sub> și E<sub>24</sub> cu toleranțe de ±20%, ±10% și ±5%. Peste 1 valorile capacităților nu sunt normalizate existând numai anumite valori uzuale pentru care toleranțele sunt mult mai mari, variind între -40% și +100%.

**Tensiunea nominală  $U_n$**  reprezintă cea mai mare tensiune continuă, sau cea mai mare valoare eficace a tensiunii alternative, care se poate aplica condensatorului în regim de funcționare îndelungată. Tensiunea nominală depinde esențial de rigiditatea dielectricului și de construcția condensatorului. Ea se definește de obicei la temperatura maximă de lucru. Pentru tensiunea nominală nu există valori normalizate, fabricile constructoare ghidându-se după cereri sau după o serie de valori devenite uzuale: 6, 12, 25, 50, 100, 125, 250, 400, 500, 1000 V, etc. În unele cazuri se specifică și tensiunea de probă  $U_p$  la care a fost încercat condensatorul în procesul de fabricație. Valoarea sa este cuprinsă aproximativ între (1,5...3) $U_n$ . Dacă  $U_p$  se alege prea mic nu există siguranța eliminării condensatoarelor cu defecte ascunse; în schimb dacă este prea mare ies din uz prea multe condensatoare în timpul probei sau se micșorează rigiditatea dielectrică a acelor care au rezistat.

**Rezistența de izolație  $R_z$**  măsurată la temperatură normală, reprezintă raportul dintre tensiunea continuă aplicată la borne și curentul continuu ce se stabilește după 1 min de la aplicarea tensiunii. Întrucât rezistența de izolație și capacitatea nominală sunt mărimi ce variază invers proporțional pentru același dielectric, se obișnuiește ca, pentru condensatoarele cu  $C_n > 0,1\mu\text{F}$  să se indice constanta de timp  $\tau = R_z C_n$  care depinde numai de proprietățile materialului dielectric ( $\epsilon', \epsilon''$ ) și nu sunt dimensiunile acestuia. Pentru condensatoarele electrolitice în locul rezistenței de izolație se indică curentul de conducție.

**Tangenta unghiului de pierderi  $\text{tg}\delta_c$**  reprezintă raportul dintre pierderile de putere activă în condensator și puterea lui reactivă, măsurate la aceeași frecvență ca și capacitatea nominală.

**Intervalul temperaturilor de lucru** este intervalul de temperatură în limitele căruia se asigură funcționarea de lungă durată a condensatorului.

**Coefficientul de temperatură al capacității**, care se definește ca:

$$\alpha_c = \frac{1}{C} \frac{dC}{dT} \left[ \frac{1}{\text{K}} \right] \quad (1.9)$$

### Condensatoare variabile

**Normarea condensatoarelor variabile.** Condensatoarele variabile sunt utilizate pe scară largă în aparatul electronic fie sub forma condensatoarelor pentru care variația capacității este necesară pe durata funcționării aparatului. În timpul funcționării acestea au rolul de condensatoare fixe. Variația capacității condensatoarelor variabile se obține sau prin variația suprafeței armăturii prin variația poziției lor relative (cel mai frecvent caz) sau prin variația distanței dintre armături. Din punct de vedere funcțional condensatoarele variabile sunt caracterizate de mărimi similare condensatoarelor fixe. În afară de acestea, condensatoarelor variabile le mai sunt specifice următoarele mărimi:

**Capacitatea minimă  $C_{min}$**  definită ca valoare minimă a capacității care se poate obține la bornele condensatorului variabil.

**Legea de variație a capacității.**

Momentul de rotație al armăturii mobile caracterizează ușurința și siguranța reglării capacității. Obișnuit valoarea capacității acestuia nu depășește  $500\mu\text{N}\cdot\text{m}$ .