

Capitolul 7. Condensatoare

7.1 Parametrii condensatoarelor

Condensatoarele sunt elemente de circuit caracterizate prin capacitate. Condensatoarele se pot clasifica - din punct de vedere al posibilității de modificare a capacității, în condensatoare fixe și variabile. Legea de variație a capacității condensatoarelor variabile în funcție de deplasarea unghiulară a unei armături față de cealaltă armatură, poate fi liniară, pătratică - pentru realizarea circuitelor acordate, sau exponențială - pentru aparate de măsurare. Din punct de vedere funcțional, condensatoarele se pot clasifica în: nepolarizate și polarizate, sau electrolitice. Celor polarizate - de capacitate ridicată, li se aplică o tensiune continuă, a cărei valoare este superioară valorii maxime a tensiunii alternative suprapuse peste tensiunea continuă. Capacitatea nominală a condensatoarelor fixe C_n , este normalizată, sau standardizată, pentru valori inferioare valorii de $1\mu F$. Valoarea capacității unui condensator polarizat, utilizat pentru filtrarea unor tensiuni variabile, cuplarea sau decuplarea unor circuite electronice, poate fi diferită de valoarea înscrisă în clar pe condensator, cu $-10\% \div 50\%$, întrucât scopul urmarit prin introducerea condensatorului în circuit, nu este afectat de creșterea valorii capacității. În circuite a caror comportare este influențată de valoarea capacității, se utilizează condensatoarele nepolarizate, cu toleranțe până la valoarea $t = \pm 1\%$. Tensiunea nominală U_n , continuă sau alternativă, înscrisă pe condensator, este tensiunea maxima, care poate fi aplicată condensatorului, fără riscul străpungerii dielectricului dintre armături. Rezistența de izolație a condensatoarelor, este foarte mare, atingând valori de sute de Mohm - pentru condensatoare nepolarizate, ceea ce presupune curenți de conducție și pierderi prin conducție extrem de reduse. Tangenta unghiului de pierderi nu scade sub valoarea: $tg \delta_\epsilon = n \times 10^{-4}$, chiar și pentru condensatoare nepolarizate de foarte bună calitate și reprezintă o limitare a performanțelor unui condensator cu dielectric solid (sau lichid), în care apar pierderi prin polarizare, în comparație cu un condensator cu dielectric gazos, în care pierderile prin polarizare sunt ne semnificative. Intervalul temperaturilor de funcționare este cuprins între $-40^\circ C \div 85^\circ C$, sau $-55^\circ C \div 105^\circ C$. Influența factorilor externi, dar mai ales îmbătrânirea dielectricului, conduce la modificarea capacității și performanțelor condensatorului. Pentru obținerea unor capacități specifice ridicate: $C = C_n / V$, unde V este volumul condensatorului, se utilizează materiale cu rigidități dielectrice și permitivități ridicate, sub formă de straturi cu grosimi micrometrice.

7.2 Schema echivalentă și comportarea cu frecvența [Căt]

În fig. 7.1 sunt reprezentate schemele echivalente ale unui condensator nepolarizat. Rezistența terminalelor și armăturilor s-a notat cu r_s , iar rezistența de pierderi în învelișul de protecție al condensatorului, cu r_p .

Pierderile în dielectricul dintre armături, sunt cuprinse în schema echivalentă, care conține rezistența corespunzătoare de pierderi :

$$\Delta = \frac{1}{\omega C tg \delta_\epsilon} .$$

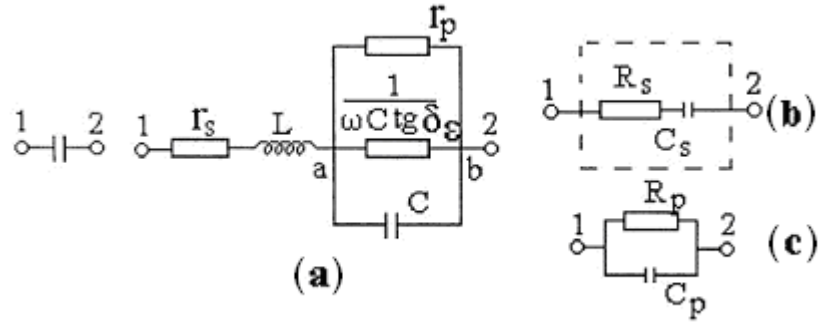


Fig. 7.1 Schema echivalentă completă (a) și simplificată (b; c) a unui condensator nepolarizat.

Inductivitatea parazită L , este datorată conexiunilor, cât și formei constructive a armăturilor. Intre componentele schemelor echivalente serie (fig. 7.1b) și paralel (fig. 7.1c), există relațiile :

$$R_s = R_p \sin^2 \delta \quad , \quad (7.1)$$

$$C_s = \frac{C_p}{\cos^2 \delta} = C_p \quad , \quad (7.2)$$

Prin urmare, capacitatea schemei echivalente serie C_s , este superioară valorii capacității schemei echivalente paralel C_p , inegalitate care este cu atât mai pronunțată, cu cât tangenta unghiului de pierderi $tg \delta$, are valoare mai ridicată.

Notăm tangenta unghiului de pierderi în materialul de protecție al condensatorului, sau datorată rezistenței r_p , cu :

$$tg \delta_p = \frac{1}{Q_p} = \frac{1}{\omega \cdot r_p C} \quad , \quad (7.3)$$

Considerând pierderile atât în dielectricul dintre armături cât și în învelișul de protecție al condensatorului, tangenta unghiului de pierderi, este:

$$tg \delta_{p+\varepsilon} = \frac{1}{\omega R_e C} \quad , \quad (7.4)$$

unde rezistența echivalentă de pierderi se obține din expresia:

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{r_p} + \omega C tg \delta_\varepsilon \quad . \quad (7.5)$$

Cu relația (7.6), relația (7.5) obține forma :

$$tg \delta_{p+\varepsilon} = \frac{1}{\omega r_p C} + \frac{\omega r_p C tg \delta_\varepsilon}{\omega r_p C} = tg \delta_p + tg \delta \quad (7.6)$$

Capacitatea dintre nodurile a și b ale schemei echivalente, care reprezintă capacitatea echivalentă serie a condensatorului, conform relației (7.2), este :

$$C_{ab} = C' = C [1 + (tg \delta_p + tg \delta_\varepsilon)^2] \quad (7.7)$$

Tangenta unghiului de pierderi în rezistența r_s , este :

$$tg \delta_s = \frac{1}{Q_s} = \omega r_s C' \quad (7.8)$$

Impedanța schemei echivalente din fig.7.1a, are expresia :

$$\underline{Z}_{1,2} = r_s + j\omega L + \frac{1}{1/r_p + \omega C \operatorname{tg} \delta_\varepsilon + j\omega C}. \quad (7.9)$$

Utilizând relațiile (7.4) ÷ (7.9), în relația (7.10), aceasta devine :

$$\underline{Z}_{1,2} = \frac{\operatorname{tg} \delta_p + \operatorname{tg} \delta_\varepsilon + \operatorname{tg} \delta_s}{\omega C'} + \frac{1 - \omega^2 C'}{j\omega C'}. \quad (7.10)$$

Din relația (7.10) rezultă componentele schemei echivalente serie (fig 7.1b):

$$R_s = \frac{\operatorname{tg} \delta_c}{\omega C'}, \quad (7.11)$$

$$C_s = \frac{C'}{1 - (\omega/\omega_r)^2}, \quad (7.12)$$

unde : $\operatorname{tg} \delta_c = \operatorname{tg} \delta_p + \operatorname{tg} \delta_\varepsilon + \operatorname{tg} \delta_s$, iar $\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC'}}$ reprezintă pulsația de rezonanță a

condensatorului. Se constată că: $C < C' < C_s$. Capacitatea serie C_s crește cu creșterea frecvenței (fig.7.2a), iar din expresia tangentei unghiului de pierderi :

$$\operatorname{tg} \delta_c = \frac{1}{\omega r_p C} + \operatorname{tg} \delta_\varepsilon + \omega r_s C', \quad (7.13)$$

rezultă că pierderile în rezistențele r_p și r_s au pondere crescută la frecvențe joase, respectiv înalte, în timp ce la frecvențe medii, pierderile în dielectric sunt preponderente (fig 7.2b).

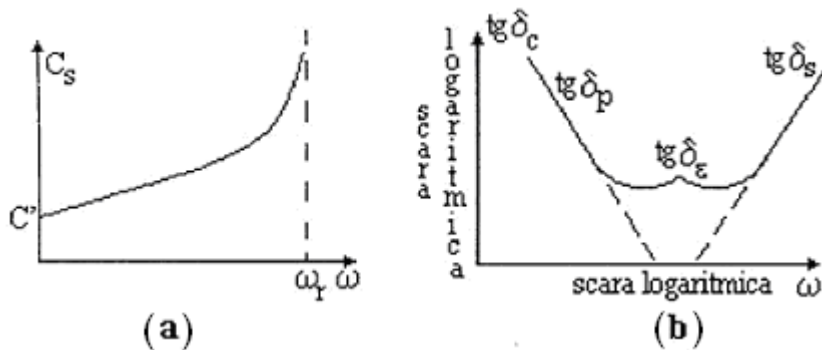


Fig. 7.2 Dependențele de frecvență ale capacității serie (a) și tangentei unghiului de pierderi (b), pentru un condensator nepolarizat.

La condensatoarele electrolitice, o armatură este metalul pe care se formează oxidul dielectric, iar cealaltă armatură, este constituită dintr-un electrolit lichid (sau solid), în contact cu o folie metalică. Electrolitul poate lipsi, armătura fiind depusă direct pe stratul de oxid. Pentru mărirea suprafeței efective (sau echivalente), suprafața metalului pe care se formează oxidul, este asperizată.

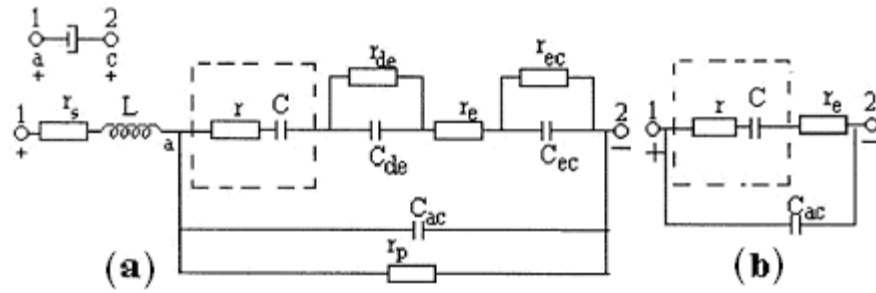


Fig. 7.3 Schema echivalentă completă (a) și simplificată (b) a condensatorului electrolitic polarizat.

În schema echivalentă a condensatorului electrolitic, reprezentată în fig. 7.3a, sunt incluse : rezistența electrolitului r_e , grupurile (r_{de}, C_{de}) ; (r_{ec}, C_{ec}) , care reprezintă contactul dielectric - electrolit, respectiv electrolit - catod, precum și capacitatea C_{ac} între anod și catod. Schema simplificată este reprezentată în fig. 7.3b.

7.3 Tipuri de condensatoare

Din punct de vedere constructiv, condensatoarele nepolarizate sunt de tip planar - monostrat sau multistrat (fig.7.5a), sau de tip axial, cilindric sau bobinat (fig. 7.5b). Condensatoarele electrolitice se realizează frecvent în varianta a doua.

Inductivitatea parazită a condensatoarelor monostrat sau multistrat, este extrem de redusă, iar inductivitatea condensatoarelor bobinate se micșorează substanțial prin bobinarea foliilor dielectrice cu suprafețe metalizate astfel încât forma condensatorului să rezulte plată (fig. 7.5c). Atașarea electrozilor se realizează prin presiune (sau termo- presiune), astfel încât contactul electric cu suprafețele metalizate sau foliile metalice, să fie asigurat.

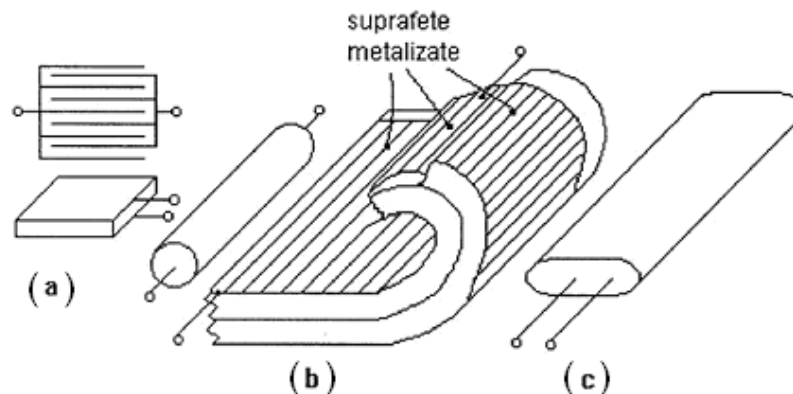


Fig. 7.5 Condensatoare de tip planar multistrat (a), bobinate cilindric (b) și plat (c).

Dielectricii utilizați pentru realizarea condensatoarelor nepolarizate pot fi: pelicule plastice polare sau nepolare, materiale ceramice sau mica muscovit.

Dielectricii polari (polietilentereftalat sau policarbonat), posedă permitivități ridicate, permițând obținerea unor capacități specifice mari. Cei nepolari (polistiren), au stabilitate cu temperatura și frecvența, dar permitivități scăzute. Condensatoarele cu pelicule plastice, se realizează sub forma bobinată, în timp ce condensatoarele ceramice și cele cu mică, se realizează sub formă mono sau multistrat. În compoziția materialului ceramic poate intra titanatul de bariu, care prezintă valori extrem de ridicate ale permitivității.

Condensatoarele multistrat au inductivități parazite extrem de reduse, tensiuni nominale și capacități specifice extrem de ridicate, grosimea straturilor dielectrice –care pot fi din dioxid de siliciu și a celor conductoare –din cupru , fiind sub-micronică.

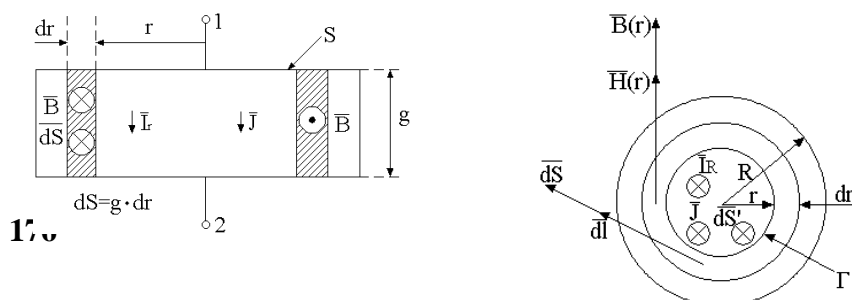
Condensatoarele electrolitice utilizează ca material dielectric, oxizi de aluminiu (Al_2O_3), tantal (Ta_2O_5) sau titan (TiO_2), care posedă permitivități ridicate, având de asemenea grosimi submicronice, ceea ce crează posibilitatea obținerii unor capacități de valori mari la dimensiuni mici ale condensatorului. Condensatorul cu oxid de aluminiu utilizează ca electrolit acidul boric, hidroxidul de amoniu sau glicoletilena impregnată în folii de celuloză. Tensiunea nominală poate atinge valoarea : $U_n=500$ V. Condensatorul cu tantal, are anodul sinterizat din pulbere din tantal, iar electrolitul este o peliculă solidă semiconductoare din bioxid de mangan (MnO_2). Tensiunea nominală este mai redusă: $U_n=10 \div 100V$, iar inductivitatea parazită este considerabil mai redusă decât cea a condensatoarelor cu oxid de aluminiu. Supus impulsurilor de tensiune, oxidul de tantal cristalizează, rezistivitatea lui se micșorează și condensatorul se poate distruge prin încălzire datorită pierderilor de putere prin conducție.

7.4 Întrebări

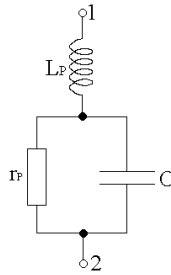
1. Enumerați parametri electrici a condensatoarelor nepolarizate și precizați condițiile în care acestea pot funcționa;
2. Analizați comportarea cu frecvența a unui condensator, pe baza schemei echivalente și stabiliți condițiile în care acesta poate funcționa ca și capacitate;
3. Arătați schematic structurile diferitelor tipuri de condensatoare;

7.5 Probleme

1. Se considera un condensator circular cu armaturi plane paralele, cu secțiunea $S=20$ cm², dielectricul dintre armaturi având grosimea $g=0.17$ mm , $\epsilon_r=5$, $\rho=10^8 \Omega m$, $E_{str}=15$ MV/m . Sa se determine tensiunea maxima U_{max} , care poate fi aplicata condensatorului si valorile componentelor schemei echivalente a condensatorului.



Rezolvare:



Tensiunea maxima care poate fi aplicata condensatorului are valoarea:

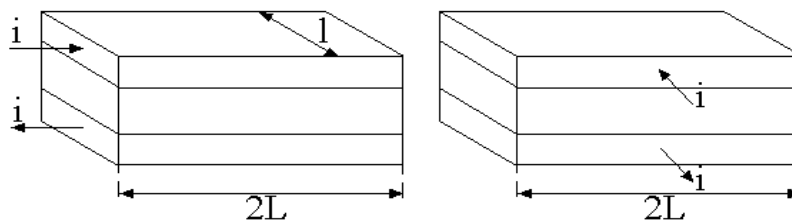
$$U_{\max} = E_{\text{str}} \cdot g = 2.55 \text{ kV}.$$

Pentru determinarea inductivitatii parazite L_p se aplica legea circuitului magnetic pentru o curba inchisa Γ :

$$\oint_{\Gamma} \vec{H} d\vec{l} = \int_{S_{\Gamma}} \vec{J} \cdot d\vec{s},$$

de unde rezulta expresia fluxului magnetic corespunzator densitatii de current J , presupusa constanta in volumul materialului dielectric:

$$\Phi = \int_0^R B(r) ds = \int_0^R \mu_0 \frac{J}{2} r g dr = \mu_0 \frac{J}{2} g \frac{R^2}{2}.$$



Inductivitatea parazita are expresia:

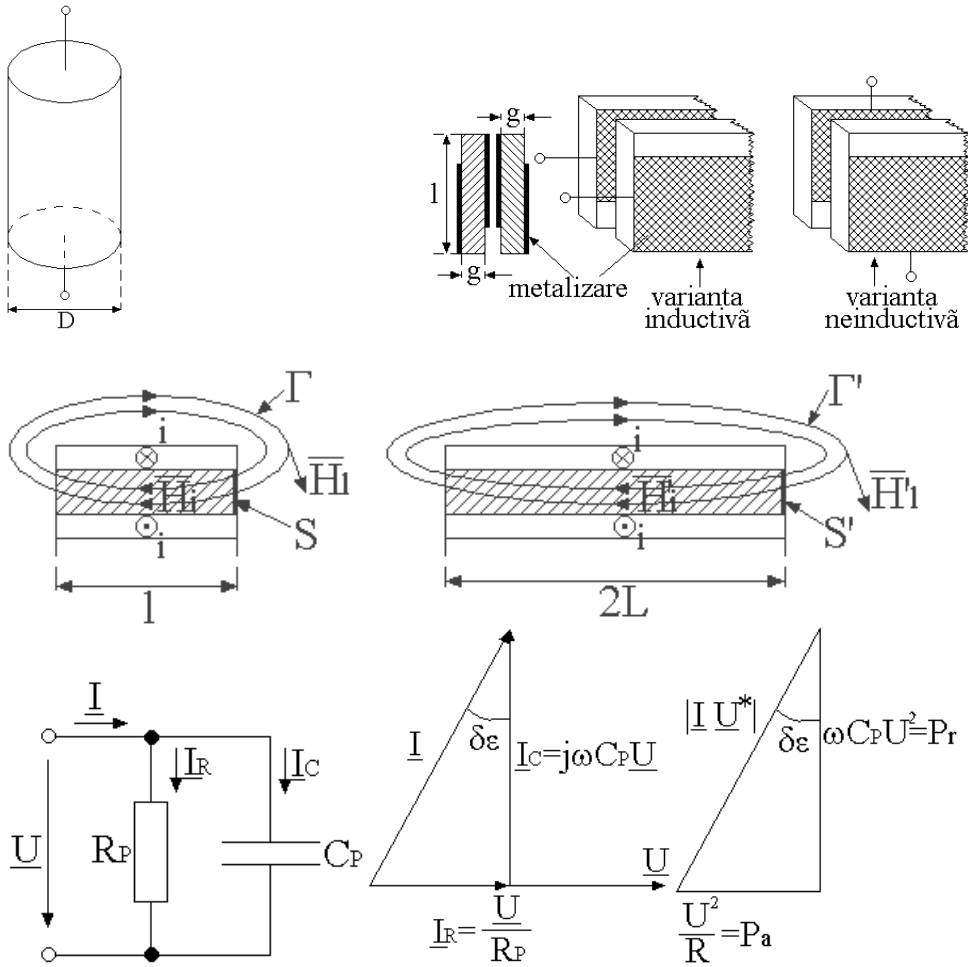
$$L_p = \frac{\Phi}{I} = \frac{\mu_0 g}{4\pi} = 0.17 \cdot 10^{-10} \text{ H}.$$

Rezistenta echivalenta de pierderi prin conductie are valoarea: $r_p = \rho g / S = 8.5 \text{ M}\Omega$, iar capacitatea condensatorului este: $c = \epsilon_0 \epsilon_r' S / g = 520 \text{ pF}$.

In curent alternativ, apar si pierderi prin polarizare, iar schema echivalenta a condensatorului este mai complexa.

2. Un condensator este realizat prin bobinarea a doua folii din hostafan metalizate pe ambele fete, cu grosimi $g = 8 \mu\text{m}$; stratul metalizat prin evaporare in vid avand grosimea de $1 \mu\text{m}$. Latimea foliilor este: $l = 50 \text{ mm}$, iar diametrul exterior al condensatorului este: $D = 1.4 \text{ cm}$. Materialul dielectric se caracterizeaza prin: $\epsilon_r' = 2.85, \text{tg} \delta_{\epsilon} = 4.5 \cdot 10^{-4}$ la frecventa: $f = 10 \text{ kHz}$, $E_{\text{str}} = 100 \text{ MV/m}$. Sa se calculeze :

- capacitatea condensatorului;
- inductivitatea parazita in varianta inductiva, caracterizata prin atasarea electrozilor doar la cele doua straturi metalizate si in varianta neinductiva, care presupune metalizari decalate pe cele doua fete ale foliilor, care se scurtcircuiteaza la extremitatiile latimii foliilor;
- pierderile de putere activa pentru o tensiune egala cu 10% din tensiunea maxima admisa.



Rezolvare:

Prin bobinarea celor doua folii metalizate se formeaza doua condensatoare conectate in paralel. Lungimea L a celor doua folii determina suprafata armaturilor. Condensatorul astfel realizat este echivalent cu un condensator format dintr-o singura folie, cu lungime dubla.

O spira medie are lungimea :

$$l_1 = 2\pi R_{med} = 2\pi \frac{D}{4} ,$$

iar numarul spirelor rezultate prin bobinarea foliilor , este :

$$n_1 = \frac{D}{4g} .$$

Lungimea totala este :

$$L = n_1 l_1 = \frac{\pi D^2}{8g} ,$$

iar suprafata armaturilor , are expresia :

$$S_1 = 2 \cdot L \cdot l = \frac{\pi D^2}{4g} .$$

Capacitatea condensatorului este :

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{g} = 3 \mu F .$$

Aplicam legea circuitului magnetic pentru varianta inductiva :

$$\oint_{\Gamma} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_{int} \vec{H}_i \cdot d\vec{l} + \int_{ext} \vec{H}_e \cdot d\vec{l} \cong H_i \cdot l = i .$$

Fluxul magnetic prin suprafata S este de forma :

$$\Phi = B \cdot S = \mu_0 \frac{i}{l} (2L \cdot g) ,$$

iar inductivitatea parazita, are valoarea :

$$L = \frac{\Phi}{i} = \frac{\mu_0}{l} 2L \cdot g = 3.86 \cdot 10^{-9} H .$$

Pentru varianta neinductiva, legea circuitului magnetic este de forma :

$$\oint_{\Gamma'} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_{int} \vec{H}_i \cdot d\vec{l} + \int_{ext} \vec{H}_e \cdot d\vec{l} \cong H_i' \cdot 2L = i .$$

Fluxul magnetic prin suprafata S' este de forma :

$$\Phi' = \mu_0 \frac{i'}{2L} (l \cdot g) ,$$

iar inductivitatea parazita are valoarea :

$$L' = \frac{\Phi'}{i'} = \frac{\mu_0}{2L} l \cdot g = 3.3 \cdot 10^{-14} H .$$

Raportul inductivitatilei parazite corespunzatoare celor doua variante este :

$$\frac{L}{L'} = 1.17 \cdot 10^5 .$$

Pentru schema echivalenta paralela a condensatorului sunt valabile relatiile:

$$\operatorname{tg} \delta_\varepsilon = \frac{P_a}{P_r} = \frac{1}{\omega R_p C_p} ,$$

$$P_a = \frac{U^2}{R_p} = U^2 \omega C_p \operatorname{tg} \delta_\varepsilon .$$

Tensiunea limita maxima care poate fi aplicata condensatorului corespunde strapungerii dielectricului :

$$U_{\max} = E_{str} \cdot g = 800 V .$$

Pierderile active de putere corespunzatoare unei tensiuni $U=80V$, sunt : $P_a=0.543W$. Desi valoarea tangentei unghiului de pierdere este redusa, pierderile de putere activa sunt relativ mari datorita frecventei ridicate .

3. Sa se determine valorile limita ale duratei impulsului de iesire a unui circuit monostabil : $T=RC/2$, stiind ca $R=1M\Omega$, $t_1=\pm 2.5\%$, $\alpha_1=\pm 50 ppm/^\circ C$, $t_2=\pm 5\%$, $\alpha_2=100 ppm/^\circ C$, $C=100pF$. Circuitul functioneaza intr-un mediu cu temperatura θ cuprinsa in intervalul $[-30^\circ C \div 100^\circ C]$.

Rezolvare :

Toleranta duratei impulsului este de forma :

$$t_T = |h_1| t_1 + |h_2| t_2 ,$$

unde :

$$h_1 = \frac{R}{T} \frac{\partial T}{\partial R} = 1,$$

$$h_2 = \frac{C}{T} \frac{\partial T}{\partial C} = 1 .$$

Prin urmare : $t_T = t_1 + t_2 = 7.5\%$.

Coeficientul de variatie cu temperatura are expresia :

$$\alpha_T = h_1 \alpha_1 + h_2 \alpha_2 = \alpha_1 + \alpha_2 ,$$

iar valoarea coeficientului este cuprinsa intre limitele $50 \div 150 \text{ppm}/^\circ\text{C}$.

Valoarea nominala a duratei impulsului este :

$$T_0 = RC/2 = 50 \mu\text{s} ,$$

iar valorile limita sunt :

$$T_{\min} = T_0 (1 - t_T) [1 - \alpha_T (\theta_0 - \theta_{\min})] = 45.9 \mu\text{s},$$

$$T_{\max} = T_0 (1 + t_T) [1 + \alpha_T (\theta_{\max} - \theta_0)] = 54.4 \mu\text{s},$$

Expresiile duratelor limita ale impulsului s-au determinat cu valoarea maxima a coeficientului de variatie cu temperatura, considerand temperatura normala de functionare: $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$.

4. Sa se determine tipurile condensatoarelor C_1 , C_2 conectate in paralel si sa se calculeze capacitatile lor, astfel incat capacitatea echivalenta sa fie 25pF , iar coeficientul de variatie cu temperatura sa fie nul.

Rezolvare :

Capacitatea echivalenta este :

$$C_p = C_1 + C_2 .$$

Coeficientul de variatie cu temperatura al capacitatii echivalente, are expresia :

$$\alpha_p = h_1 \alpha_1 + h_2 \alpha_2 = \frac{C_1}{C_p} \frac{\partial C_p}{\partial C_1} \alpha_1 + \frac{C_2}{C_p} \frac{\partial C_p}{\partial C_2} \alpha_2 = \frac{C_1 \alpha_1 + C_2 \alpha_2}{C_1 + C_2} ,$$

unde : α_1, α_2 sunt coeficientii de variatie cu temperatura ai condensatoarelor C_1 , C_2 .

Ansamblul celor doua condensatoare este caracterizat prin relatiile :

$$C_p = C_1 + C_2 ,$$

$$C_1 \alpha_1 + C_2 \alpha_2 = 0 .$$

Din conditia a doua, rezulta semne opuse pentru α_1 si α_2 . Solutia problemei nu este unica. Una din solutii consta in alegerea unui condensator C_1 , cu $\alpha_1 = 100 \text{ppm}/^\circ\text{C}$ si a unui condensator C_2 , cu $\alpha_2 = -33 \text{ppm}/^\circ\text{C}$.

Rezulta valorile celor doua capacitati, din relatiile :

$$C_1 = -C_2 \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{33}{100} C_2 ,$$

$$C_2 + \frac{33}{100} C_2 = 25 .$$

Valorile celor doua condensatoare sunt :

$$C_1 = 6.2 \text{pF} ; C_2 = 18.8 \text{pF} .$$

Sa se studieze aceeasi problema in cazul in care cele doua condensatoare se conecteaza in serie.

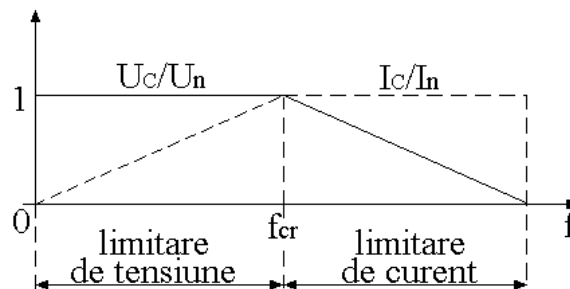
5. Sa se analizeze solicitarea electrica a condensatorului cu urmatoorii parametri: $C_n=12\text{nF}$, $U_n=25\text{V}$, $I_n=0.05\text{A}$, $P_n=2\text{mW}$, $\text{tg}\delta=5\cdot 10^{-4}$. Puterea maximă disipată de condensator depinde de frecvență -ca și $\text{tg}\delta$ și are valoarea: $P_{d\text{max}} = U_n \cdot I_n \cdot \text{tg}\delta = 0.625\text{mW} < P_n$.

Prin urmare nu există limitare în putere, rămânând posibilitatea depășirii tensiunii nominale sau a curentului nominal. Frecvența critică care delimitează regiunile în care limitarea este de tensiune sau curent, se determină din relațiile corespunzătoare limitării de tensiune sau curent care sunt identice:

$$I_n = \omega_{cr} \cdot C_n \cdot U_n,$$

$$U_n = \frac{I_n}{\omega_{cr} \cdot C_n},$$

rezultând:



$$f_{cr} = \frac{I_n}{2\pi \cdot C_n \cdot U_n} = 26.5\text{kHz}.$$

Pentru: $f \leq f_{cr}$, $U_c = U_n = 25\text{V}$, $I_c = \omega \cdot C_n \cdot U_n$ și $P_d = U_c \cdot I_c \cdot \text{tg}\delta = \omega \cdot C_n \cdot U_n^2 \cdot \text{tg}\delta$,

iar pentru $f \geq f_{cr}$, $I_c = \hat{I}_n = 0.05\text{A}$, $U_c = I_n / (\omega \cdot C_n)$, și $P_d = U_c \cdot I_c \cdot \text{tg}\delta = \frac{I_n^2}{\omega \cdot C_n} \cdot \text{tg}\delta$.

Să se studieze aceeași problemă pentru un ansamblu format din două condensatoare cu parametri diferiți, conectate în paralel.

6. Să se analizeze solicitarea electrică a unui condensator cu parametri: $C_n=100\text{nF}$, $U_n=50\text{V}$, $\hat{I}_n=0.2\text{A}$, $P_n=10\text{mW}$, $\text{tg}\delta=10^{-2}$.

Rezolvare:

Puterea maximă disipată de condensator, are valoarea:

$$P_{d\text{max}} = U_n \cdot \hat{I}_n \cdot \text{tg}\delta = 0.1\text{W} > P_n.$$

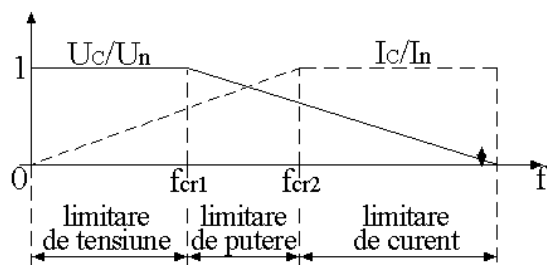
Prin urmare există posibilitatea depășirii puterii nominale, sau există limitare în putere, după cum există limitare în tensiune și curent. În acest caz sunt definite două frecvențe critice, care corespund limitării în tensiune, respectiv în curent. Condiția limitării în tensiune corespunde situației în care la bornele condensatorului se aplică tensiunea U_n , iar puterea disipată este P_n , sau:

$$P_n = U_n \cdot I_c \cdot \text{tg}\delta = U_n \cdot \omega_{1cr} \cdot C_n \cdot U_n \cdot \text{tg}\delta,$$

rezultând:

$$f_{cr1} = \frac{P_n}{2\pi U_n^2 \cdot C_n \cdot \text{tg}\delta} = 637\text{Hz},$$

iar din condiția limitării în curent, care corespunde situației în care curentul prin condensator este \hat{I}_n și puterea disipată este P_n , sau:



$$P_n = I_n U_c \operatorname{tg} \delta = I_n \frac{I_n}{\omega_{cr2} C_n} \operatorname{tg} \delta ,$$

rezultă:

$$f_{cr2} = \frac{I_n^2}{2\pi C_n P_n} \operatorname{tg} \delta = 637 \text{ kHz} .$$

Pentru cele trei domenii de frecvență sunt valabile relațiile:

$$f < 637 \text{ Hz}: U_c = U_n = 50 \text{ V};$$

$$I_c = \omega \cdot C_n \cdot U_n;$$

$$P_d = U_c \cdot I_c \cdot \operatorname{tg} \delta = \omega C_n \cdot U_n^2 \cdot \operatorname{tg} \delta ;$$

$$f \in [637 \text{ Hz}, 637 \text{ kHz}]: P_d = P_n = 10 \text{ mW};$$

$$U_c = \sqrt{\frac{P_n}{\omega \cdot C_n \cdot \operatorname{tg} \delta}} ;$$

$$I_c = \sqrt{\frac{P_n \cdot \omega \cdot C_n}{\operatorname{tg} \delta}} ;$$

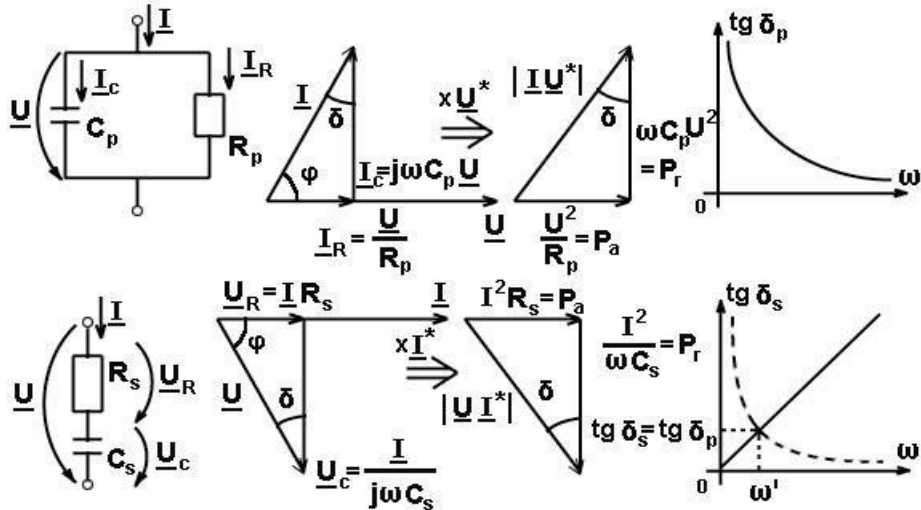
$$f > 637 \text{ kHz}: I_c = \hat{I}_n = 0.2 \text{ A};$$

$$U_c = \frac{I_n}{\omega \cdot C_n} ;$$

$$P_d = \frac{I_n^2 \cdot \operatorname{tg} \delta}{\omega \cdot C_n} .$$

Să se studieze aceeași problemă pentru două condensatoare conectate în paralel, care au una, respectiv două frecvențe critice.

7. Sa se determine relatiile de legatura între componentele schemelor echivalente paralel si serie ale unui condensator.



Rezolvare :

Din egalitatea admitantelor celor doua scheme echivalente, rezulta:

$$(1) \omega R_p C_s = \frac{1}{\sin \delta \cos \delta},$$

iar din egalitatea tangentelor unghiurilor de pierderi, rezulta:

$$(2) \operatorname{tg} \delta = \frac{P_a}{P_r} = \frac{1}{\omega C_p R_p} = \omega C_s R_s = \frac{\sin \delta}{\cos \delta} .$$

Daca se considera componentele schemelor echivalente serie si paralel independente de frecventa, relatia (2) este valabila doar pentru frecventa: $\omega = \sqrt{R_s C_s R_p C_p}$. Pentru ca relatia (2) sa fie adevarata pentru toate frecventele, trebuie sa admitem dependenta de frecventa a componentelor.

Din sistemul de relatii:

$$(1') C_s = \frac{1}{\omega R_p} \cdot \frac{1}{\sin \delta \cos \delta},$$

$$(2') C_s = \frac{1}{\omega R_s} \cdot \frac{\sin \delta}{\cos \delta},$$

rezulta:

$$(3) R_s = R_p \cdot \sin^2 \delta .$$

Din sistemul de relatii:

$$(1'') R_p = \frac{1}{\omega C_s} \cdot \frac{1}{\sin \delta \cos \delta} ,$$

$$(2'') R_p = \frac{1}{\omega C_p} \cdot \frac{\cos \delta}{\sin \delta} ,$$

rezulta:

$$(4) C_p = C_s \cos^2 \delta ,$$

sau:

$$(5) C_s = C_p (1 + \operatorname{tg}^2 \delta) .$$

Conform relatiilor (3) si (4) expresia tangentei unghiului de pierderi este:

$$(6) \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{P_a}{P_r} = \frac{\sin \delta}{\cos \delta} = \sqrt{\frac{R_s C_s}{R_p C_p}} = \sqrt{\frac{\tau_s}{\tau_p}},$$

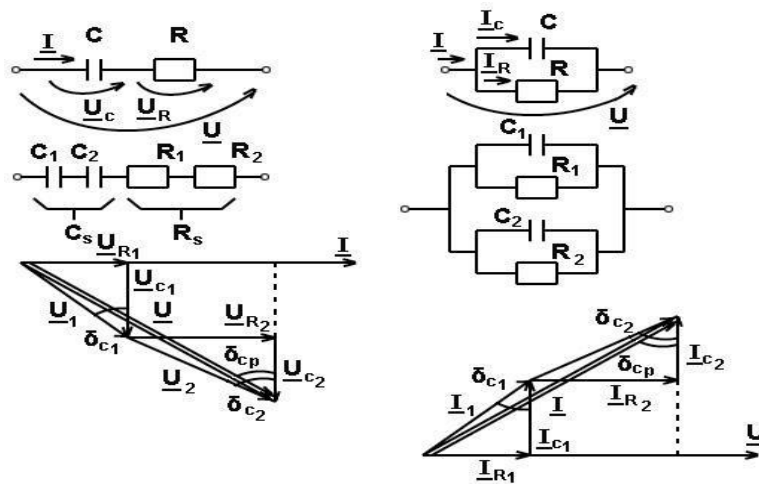
unde: τ_s, τ_p sunt constantele de timp ale celor doua circuite echivalente.

Intrucât tangenta unghiului de pierderi este prin definitie raportul puterilor, iar puterea aparenta S , este suma dintre puterea activa si reactiva, rezulta ca ipotenuzele triunghiurilor puterilor sunt egale cu puterea aparenta, sau:

$$(7) \quad (\underline{U} \cdot \underline{I}^*) \times (\underline{U}^* \cdot \underline{I}) = U^2 I^2 = S^2.$$

8. Sa se determine tangenta unghiului de pierderi pentru conexiunea serie si paralel a doua condensatoare cunoscând valorile capacitativelor si ale tangentelor unghiurilor de pierderi.

Rezolvare:



Este recomandabil - datorita facilitatilor de scriere a relatiilor ca pentru conexiunea serie sau paralel, sa se utilizeze schemele echivalente serie respectiv paralel ale condensatoarelor.

Pentru schema echivalenta serie a condensatorului, tangenta unghiului de pierderi este:

$$\operatorname{tg} \delta_c = U_R / U_C = \omega CR,$$

de unde rezulta : $R = \operatorname{tg} \delta / \omega C$.

Pentru conexiunea serie, tangenta unghiului de pierderi este :

$$\operatorname{tg} \delta_{C_s} = (U_{R_1} + U_{R_2}) / (U_{C_1} + U_{C_2}) = \frac{C_2 \operatorname{tg} \delta_{c_1} + C_1 \operatorname{tg} \delta_{c_2}}{C_1 + C_2}.$$

Pentru schema echivalenta paralel a condensatorului, tangenta unghiului de pierderi este:

$$\operatorname{tg} \delta_p = I_R / I_C = 1 / (\omega CR),$$

de unde rezulta : $1/R = \operatorname{tg} C$.

Pentru conexiunea paralel, tangenta unghiului de pierderi este :

$$\operatorname{tg} \delta_{C_p} = (I_{R_1} + I_{R_2}) / (I_{C_1} + I_{C_2}) = \frac{C_1 \operatorname{tg} \delta_{c_1} + C_2 \operatorname{tg} \delta_{c_2}}{C_1 + C_2}.$$

Metoda grafica de rezolvare adoptata - remarcabila prin simplitatea ei, se poate aplica conexiunilor serie-paralel ale mai multor condensatoare, diagramele

construite pentru un anumit tip de conexiune compunându-se într-o singura diagrama, în care se poate aplica relatii metrice în triunghi.

9. Pentru doua condensatoare se cunosc valorile capacitatilor : C_1, C_2 si ale coeficientilor de variatie cu temperatura : $\alpha_{C_1}, \alpha_{C_2}$. Sa se determine coeficientii de variatie cu temperatura : $\alpha_{C_p}, \alpha_{C_s}$, pentru conexiunea paralel si serie ale celor doua condensatoare.

Rezolvare :

Prin definitie, coeficientul de variatie cu temperatura este :

$$\alpha_C = \frac{1}{C} \frac{\partial C_p}{\partial \theta}.$$

Pentru conexiunea paralel, coeficientul de variatie cu temperatura este de forma :

$$\alpha_{C_p} = \frac{1}{C_p} \frac{\partial C_p}{\partial \theta} = \frac{1}{C_1 + C_2} \left(\frac{\partial C_1}{\partial \theta} + \frac{\partial C_2}{\partial \theta} \right) = \frac{\alpha_{C_1} C_1 + \alpha_{C_2} C_2}{C_1 + C_2}.$$

Pentru conexiunea serie, expresia coeficientului de variatie cu temperatura, este :

$$\alpha_{C_s} = \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \right) = \frac{\alpha_{C_1} C_2 + \alpha_{C_2} C_1}{C_1 + C_2}.$$

10. Presupunem cunoscuti coeficientii de variatie ai capacitatii cu temperatura : $\alpha_{C_1}, \alpha_{C_2}$ precum si valorile capacitatilor C_1, C_2 . Sa se determine coeficientii echivalenti de variatie cu temperatura ai permitivitatilor relative : $\alpha_{\epsilon_{rS}}, \alpha_{\epsilon_{rP}}$ pentru conexiunea serie si paralel ale celor doua condensatoare.

Rezolvare :

Din expresiile capacitatilor celor doua condensatoare :

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r_1}' S_1}{d_1} = k_1 \epsilon_{r_1}'$$

$$C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r_2}' S_2}{d_2} = k_2 \epsilon_{r_2}'$$

rezulta :

$$\frac{dC_1}{d\theta} = k_1 \frac{d\epsilon_{r_1}'}{d\theta}; \quad \frac{dC_2}{d\theta} = k_2 \frac{d\epsilon_{r_2}'}{d\theta},$$

iar din expresiile coeficientilor de variatie a capacitatii cu temperatura, rezulta :

$$\alpha_{C_1} = \frac{1}{C_1} \frac{dC_1}{d\theta} = \frac{1}{k_1 \epsilon_{r_1}'} k_1 \frac{d\epsilon_{r_1}'}{d\theta} = \alpha_{\epsilon_{r_1}'},$$

$$\alpha_{C_2} = \frac{1}{C_2} \frac{dC_2}{d\theta} = \frac{1}{k_2 \varepsilon'_{r_2}} k_2 \frac{d\varepsilon'_{r_2}}{d\theta} = \alpha_{\varepsilon'_{r_2}}.$$

Pentru conexiunea serie, coeficientul de variație a capacității cu temperatura, are forma :

$$\alpha_{C_s} = \frac{1}{C_s} \frac{dC_s}{d\theta} = \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} \frac{dC_2}{d\theta} C_1^2 + \frac{dC_1}{d\theta} C_2^2 = \frac{\alpha_{C_2} C_1 + \alpha_{C_1} C_2}{C_1 + C_2}$$

Se observa ca $\alpha_{\varepsilon'_{r_s}}$ are o expresie similară :

$$\alpha_{\varepsilon'_{r_s}} = \frac{\alpha_{\varepsilon'_{r_2}} C_1 + \alpha_{\varepsilon'_{r_1}} C_2}{C_1 + C_2}$$

Pentru conexiunea paralel, expresia coeficientului de variație a capacității cu temperatura, este :

$$\alpha_{C_p} = \frac{1}{C_p} \frac{dC_p}{d\theta} = \frac{1}{C_1 + C_2} \left(\frac{dC_1}{d\theta} + \frac{dC_2}{d\theta} \right) = \frac{1}{C_1 + C_2} \left(C_1 \frac{1}{C_1} \frac{dC_1}{d\theta} + C_2 \frac{1}{C_2} \frac{dC_2}{d\theta} \right) = \frac{\alpha_{C_1} C_1 + \alpha_{C_2} C_2}{C_1 + C_2}$$

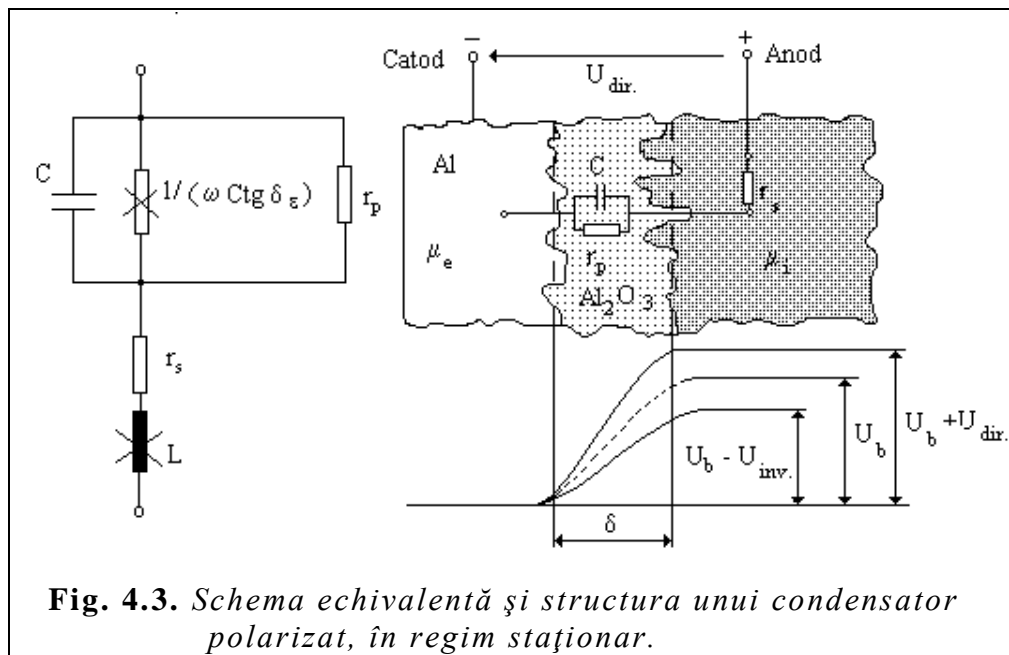
iar coeficientul de variație $\alpha_{\varepsilon_{r_p}}$ are forma :

$$\alpha_{\varepsilon_{r_p}} = \frac{\alpha_{\varepsilon_{r_1}} C_1 + \alpha_{\varepsilon_{r_2}} C_2}{C_1 + C_2}$$

7.6. Anexa

Aspecte teoretice cu privire la condensatoarele polarizate

În regim staționar sau cvasistaționar, schema echivalentă a unui condensator polarizat sau electrolitic se poate simplifica, după cum se ilustrează în fig. 4.3. În această schemă echivalentă, intervin cu pondere crescută atât rezistența terminalelor condensatorului și a electrolitului, cât și rezistența de pierderi prin conducție, în dielectricul format din oxid de aluminiu: Al_2O_3 . Un electrod (catodul), este alcătuit din aluminiu, iar celălalt (anodul), este conectat la electrolit. Din schema echivalentă pot fi excluse la pulsații reduse: $\omega \approx 0$, atât inductivitatea "L", cât și componenta: $1/(\omega C \text{tg} \delta_\varepsilon)$.



Catodul este alcătuit dintr-o folie din aluminiu, cu conductivitate electronică, electronii având mobilitate “ μ_e ” ridicată, iar anodul este un electrolit cu acțiune oxidantă asupra aluminiului și cu conductivitate ionică, ionii având mobilitate “ μ_i ” redusă, ceea ce justifică introducerea în schema echivalentă a rezistenței serie “ r_s ”. Capacitatea condensatorului depinde de grosimea “ δ ” a stratului dielectric din oxid de aluminiu, precum și de suprafața efectivă a armăturilor, care depinde de gradul de rugozitate al stratului de oxid și al foliei din aluminiu. În absența unei tensiuni aplicate între electrozi, între folia din aluminiu și electrolit există o barieră de potențial electrochimic “ U_b ”, care nu permite purtătorilor de sarcină: electroni sau ioni, să străbată joncțiunea.

Aplicând între electrozi o tensiune crescătoare de polarizare directă “ $U_{dir.}$ ”, numărul purtătorilor de sarcină se mărește pe de o parte, iar pe de altă parte, înălțimea barierei de potențial se mărește, având ca rezultat micșorarea numărului purtătorilor de sarcină care străbat joncțiunea. Întrucât primul efect este preponderent, curentul continuu prin condensator se mărește, dar în măsură relativ redusă, datorită celui de al doilea efect. Aceste concluzii, precum și cele expuse în continuare, s-au obținut pe baza rezultatelor experimentale, corelate cu studiul teoretic al proceselor care au loc.

La polarizare inversă, înălțimea barierei de potențial se micșorează, iar numărul purtătorilor de sarcină care străbat joncțiunea se mărește semnificativ pentru valori ale tensiunii: $U_{inv.} > 1V$, iar condensatorul se poate distruge prin încălzire excesivă datorită puterii disipate, dacă curentul prin condensator nu este limitat printr-o rezistență.

Cu creșterea temperaturii, reactivitatea electrolitului față de aluminiu se mărește, având ca urmare micșorarea grosimii “ δ ” a stratului dielectric, care devine mai uniform sau mai puțin rugos, determinând micșorarea suprafeței efective a armăturilor. Întrucât primul efect este preponderent, capacitatea condensatorului se mărește. Reactivitatea crescută a electrolitului determină creșterea înălțimii barierei de potențial electrochimic, ceea ce este echivalent cu îmbunătățirea proprietăților dielectrice ale oxidului de aluminiu. Astfel, rezistența de pierderi în materialul dielectric “ r_p ” se mărește, iar tangenta unghiului de pierderi “ $tg\delta_\epsilon$ ” se micșorează. În același timp, mobilitatea ionilor se mărește considerabil, ceea ce este echivalent cu scăderea pronunțată a rezistenței “ r_s ”. Întrucât acest ultim efect este preponderent, pentru tensiune aplicată constantă, cu creșterea temperaturii curentul continuu prin condensator se mărește.

Aplicând condensatorului o tensiune inversă la care apare procesul de străpungere, care nu este distructiv datorită prezenței în circuitul de măsurare a unei rezistențe de limitare a curentului invers, canalele din stratul de oxid se refac mai rapid la temperaturi crescute, datorită reactivității sporite a electrolitului. Astfel folia din aluminiu se oxidează mai rapid în regiunea în care a existat un canal de străpungere, prin care electrolitul a ajuns în contact direct cu folia din aluminiu, iar numărul și contribuția canalelor de străpungere la curentul invers se micșorează. Aceeași comportare se obține și la polarizare directă în regim de străpungere, curentul prin condensator fiind limitat în același mod, prin intermediul unei rezistențe conectate în serie cu condensatorul. Refacerea stratului dielectric se poate efectua prin două procedee. Primul procedeu constă în încălzirea condensatorului într-o incintă termostată, iar al doilea procedeu presupune aplicarea unei tensiuni de polarizare directă, care se mărește treptat, controlând în permanență curentul prin condensator, care este de asemenea limitat printr-o rezistență. Dacă prin creșterea tensiunii aplicate, curentul se mărește substanțial, se va micșora tensiunea astfel încât valoarea curentului să se încadreze în limite reduse, de ordinul câtorva zeci de μA . Condensatorul se menține în această stare o perioadă de timp, în care curentul se va micșora datorită refacerii stratului de oxid, după care se crește tensiunea directă aplicată, astfel încât curentul să se încadreze în aceleași limite reduse.