

5. Condensatoare

Cuprinsul capitolului:

- Proprietate esențială, model analitic simplificat, unitate de măsură, simbol
- Circuit echivalent, condensatorul în regim permanent sinusoidal
- Mărimi caracteristice
- Marcare
- Tipuri de condensatoare fixe și variabile
- Tehnologii de fabricație

5.1 Proprietăți și model analitic

Caracteristica esențială a condensatorului este capacitatea electrică (condensatorul este fabricat special pentru această proprietate). Scopul în care sînt folosite condensatoarele poate fi:

- acumularea de energie;
- crearea unei comportări a circuitului dependente de frecvență (filtre, circuite de defazare etc.).

Constructiv, condensatorul este compus din doi electrozi, separați de un dielectric. Evaluarea aproximativă a capacității, pentru un condensator cu două armături plane, paralele, situate față în față, la distanță mică față de dimensiunile armăturilor: $C = \frac{\varepsilon \cdot S}{d}$. Evaluarea intensității cîmpului electric în condensator: $E = \frac{U}{d}$.

De obicei, electrozii și dielectricul au forma de benzi cu suprafața mare, înfășurate sau împachetate în mai multe straturi, la care sînt atașate cele două terminale. Există și alte variante tehnologice, care vor fi descrise în acest capitol.

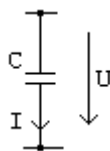


Figura 5.1: Simbolul condensatorului și mărimile măsurabile la borne

Modelul analitic al funcționării condensatorului în circuit este:

$$Q(t) = C \cdot u(t) \text{ sau } Q = C \cdot u.$$

$$i(t) = C \cdot \frac{du(t)}{dt},$$

mărimile fiind cele din figura 5.1. (În acest model au fost neglijate elementele reactive și disipative parazite și caracterul neliniar.)

Unitatea de măsură este 1 farad (1F), care reprezintă – prin definiție – capacitatea care acumulează o sarcină suplimentară de 1C, cînd tensiunea la borne crește cu 1V.

Timpul intervine în mod explicit în cea de a doua ecuație, ca expresie a fenomenului de acumulare de energie. Se zice că această componentă are caracter reactiv. Ecuația este o ecuație diferențială ordinară, liniară, de ordinul I. Nu ne este suficientă soluția generală a ecuației (care este o familie de funcții), ci dorim soluția problemei Cauchy.

Problema Cauchy:

$$i(t) = C \cdot \frac{du(t)}{dt}$$

$$u(0) = \text{cunoscută},$$

unde $t = 0$ este un moment arbitrar, în care cunoaștem valoarea tensiunii pe condensator.

Soluția:

$$u(t) = \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i(\tau) \cdot d\tau + u(0).$$

Ecuția de mai sus arată că putem determina tensiunea la borne (funcție de timp), dacă cunoaștem modul de variație a curentului și valoarea inițială a tensiunii. În sens invers, putem determina curentul (funcție de timp), dacă cunoaștem modul de variație a tensiunii (fără valoarea inițială). În analiza circuitelor, cel mai adesea nu cunoaștem aceste mărimi, ci mărimile de la intrările circuitului, ceea ce face ca ecuația diferențială să conțină mai multe variabile și mai mulți parametri (se va trata în partea afectată circuitelor).

În cazurile simple, când condensatorul descărcat este cuplat la o sursă de tensiune constantă, curentul de încărcare variază brusc: la început are valoare mare (limitată de rezistențele din circuit), apoi scade rapid spre 0, când tensiunea pe condensator a devenit egală cu cea a sursei. Se spune că condensatorul se încarcă pe durata regimului tranzitoriu (curentul variază) și că rămâne într-o stare constantă (neschimbată), pe durata regimului staționar (curentul este constant). Forma de variație a curentului de încărcare este cea din figura 5.2. Nu se neglijează rezistența internă a sursei, deoarece ea este cea care limitează valoarea de vîrf a curentului.

Cuplarea unui condensator cu dielectric de bună calitate la o sursă de curent constant ideală ar duce la creșterea nemărginită a tensiunii. În realitate, sursa de curent funcționează pînă la o tensiune maximă, după care iese din regimul ideal de funcționare.

N.B. Tensiunea pe condensator nu poate varia cu discontinuități (este integrala unei mărimi finite – curentul).

N.B. Nimic nu se întîmplă instantaneu, în circuitele electronice! Orice regim staționar este precedat de unul tranzitoriu (vezi graficele din figura 5.2).

N.B. Cuplarea condensatorului descărcat la o sursă de tensiune ideală determină curenți foarte mari, în regimul tranzitoriu. Sursa sau condensatorul se pot defecta. Decuplarea condensatorului încărcat de la sursă nu prezintă probleme, dar el rămîne încărcat cu energie (vezi paragraful 5.2).

N.B. Scurtcircuitarea condensatorului încărcat determină curenți foarte mari, condensatorul se poate defecta.

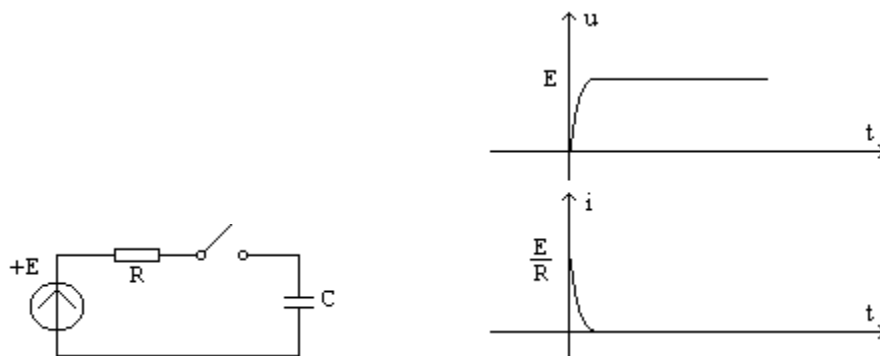


Figura 5.2: Circuit de încărcare a condensatorului. Forma tensiunii și curentului în regim tranzitoriu și în regim staționar

5.2 Condensatorul în regim permanent sinusoidal

Presupunem un condensator ideal (fără pierderi, adică fără disipare de energie activă), deci caracterizat numai prin capacitatea C . Dacă $u(t)$ este semnal sinusoidal, în regim permanent: $u(t) = U \cdot \sin(\omega t)$, unde frecvența,

perioada și pulsația sînt legate prin relațiile: $f = \frac{1}{T}$ și $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$.

Atunci curentul este: $i(t) = C \cdot \frac{du(t)}{dt} = C \cdot U \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) = C \cdot U \cdot \omega \cdot \sin(\omega t + \pi/2)$.

Se observă că cele două mărimi sînt de aceeași formă, dar defazate cu un sfert de perioadă (curentul defazat înaintea tensiunii, ca în figura 5.3). În figură, semnalul sinusoidal are perioada 1,25 ms (frecvența 800 Hz).

Defazajul se poate exprima și în timp: $\sin(\omega t + \pi/2) = \sin(\omega(t + T/4))$. Se mai spune că tensiunea este defazată în urma curentului cu un sfert de perioadă.

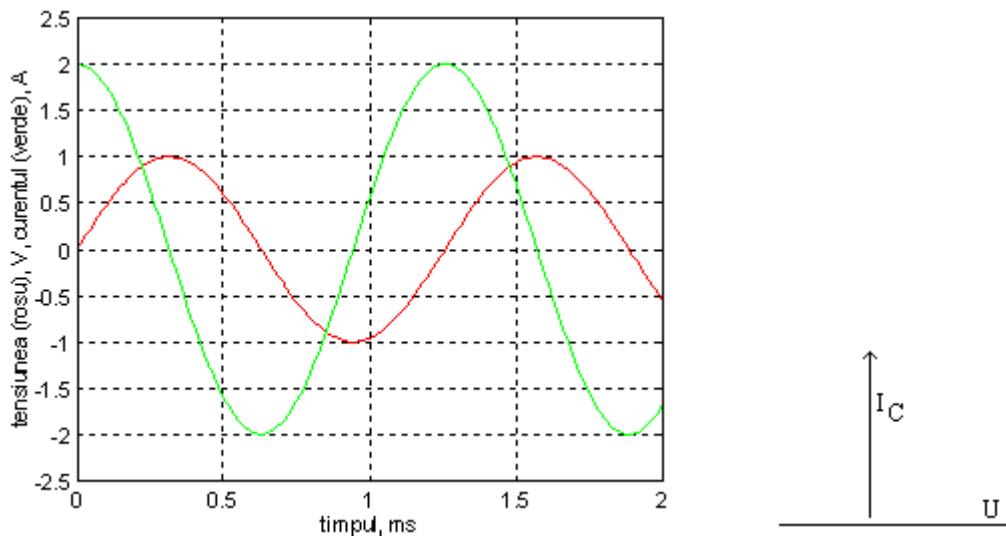


Figura 5.3: Forma tensiunii pe condensator și a curentului prin el, în regim permanent sinusoidal

Raportul dintre amplitudinile tensiunii și curentului are dimensiunea unei impedanțe și poartă numele de reactanță capacitivă:

$$|Z| = \frac{U}{UC\omega} = \frac{1}{\omega C}.$$

Pentru a exprima ambele proprietăți (modul și defazaj), se folosește reprezentarea în numere complexe:

$$Z = \frac{1}{j\omega C} = -j \cdot \frac{1}{\omega C}, \text{ unde } j \text{ este unitatea imaginară.}$$

Condensatorul înmagazinează energie:

$$W(t) = \frac{Q(t) \cdot u(t)}{2} = \frac{C \cdot u^2(t)}{2}.$$

(Pentru justificarea acestei relații, se poate presupune că tensiunea inițială pe condensator este nulă, după care el este încărcat la curent constant, pînă la tensiunea U . Tensiunea variază liniar, iar încărcarea durează timpul

$$t = \frac{CU}{I}. \text{ Atunci, energia înmagazinată este: } W = \int_0^t u(\tau) \cdot i(\tau) \cdot d\tau = \int_0^t \frac{U}{t} \cdot \tau \cdot I \cdot d\tau = \frac{UI}{t} \cdot \frac{t^2}{2} = \frac{CU^2}{2}$$

5.3 Un model mai amănunțit

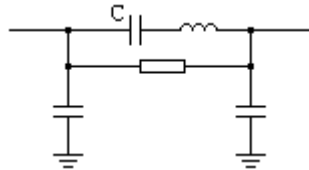


Figura 5.4: Un circuit echivalent al condensatorului real

În figura 5.4 este prezentat un circuit echivalent al condensatorului real. Elementele parazite:

- inductanță parazită (este semnificativă la condensatoarele înfășurate)
- capacități parazite între terminale și masă
- rezistența de pierderi, în paralel cu capacitatea.

Condensatorul ideal nu disipă energie. Condensatorul real presupune și efect disipativ, datorită pierderilor în dielectric, prin conducție și prin repolarizare (la cele care prezintă histerezis). Pierderile prin conducție sînt independente de frecvență. Energia pierdută prin repolarizare (dielectric cu caracter piezoelectric) este proporțională cu frecvența și cu aria ciclului de histerezis. Majoritatea condensatoarelor nu prezintă caracter piezoelectric, deci se poate aprecia că funcționează liniar. Pentru ele, rezistența de pierderi este o rezistență echivalentă, care cumulează efectele disipative (în figură apare în paralel cu capacitatea). Parametrul care descrie raportul dintre componenta disipativă și cea reactivă este tangenta unghiului de pierderi ($\tan \delta$) al dielectricului (vezi figura 5.5).

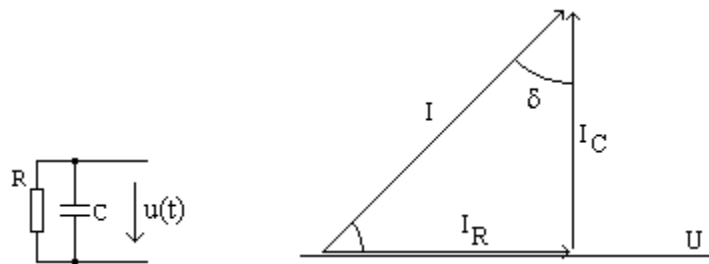


Figura 5.5: Reprezentarea fazorială pentru condensatorul cu pierderi

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega RC} \quad Z = \frac{R}{1 + j\omega RC} \quad |Z| = \frac{1}{\omega C} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \delta}}$$

Inductanța și capacitățile parazite au efect important la frecvențe mari.

În general, nu există condensatoare cu caracter neliniar al capacității, altele decît caracterul piezoelectric, deoarece efectul mărimilor externe asupra dielectricului nu se manifestă gradual.

5.4 Limitări în funcționare

Ca și în cazul rezistoarelor, condensatoarele au limitări în funcționare și depozitare. Fiecare dintre acestea este în legătură cu un parametru, specificat de producător în catalog sau în documentele tehnice interne.

Limite de funcționare:

- tensiunea instantanee (limitată de tensiunea de străpungere a dielectricului)
- temperatura de depozitare (valoare maximă și valoare minimă)
- temperatura internă la funcționare. În cazul condensatoarelor fără disipație importantă, această limită este nerelevantă, deoarece temperatura internă rămâne egală cu cea a mediului, deci se va respecta temperatura maximă de depozitare. Pentru dielectricul cu disipație importantă, temperatura internă va fi mai mare decât cea externă, deci va trebui limitată puterea maximă disipată. Producătorul nu menționează, ca parametru, limita de temperatură în funcționare, ci puterea disipată, tensiunea efectivă aplicată (în regim alternativ) și frecvența
- curentul instantaneu maxim (în regim tranzitoriu)
- frecvența de lucru (datorită disipației sau inductanței proprii).

Exercițiu de evaluare a efectului inductanței parazite a unui condensator înfășurat (se neglijează pierderile):

$C = 1000 \text{ pF}$, $L = 0,01 \text{ mH}$, la frecvențele $0,1 \text{ MHz}$, 1 MHz , 10 MHz .

$$Z = \frac{1}{j\omega C} + j\omega L = -j\left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)$$

Regim sinusoidal permanent (figura 5.6): determinarea frecvenței la care nu se manifestă caracterul reactiv.

Regim tranzitoriu: altă comportare (oscilant amortizat).

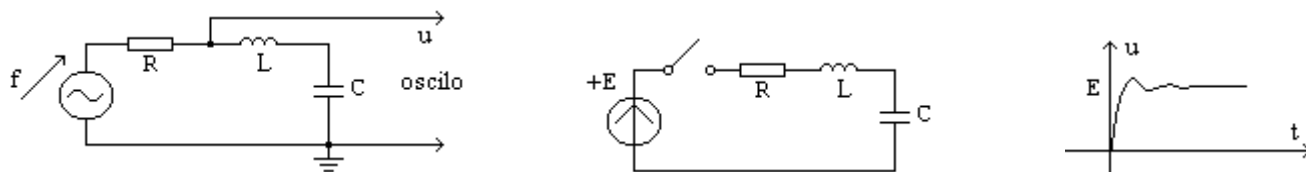


Figura 5.6: Circuit pentru a pune în evidență limitarea în frecvență

5.5 Mărimi caracteristice ale condensatorului

Capacitatea nominală este valoarea marcată pe condensator.

Tensiunea nominală este tensiunea continuă maximă ce poate fi aplicată pe terminalele condensatorului, pe durată nelimitată, la temperatura de referință ($20^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}$, în funcție de producător).

Toleranța este abaterea maximă admisibilă a capacității, în raport cu valoarea nominală, la temperatura de referință. La majoritatea tipurilor constructive, dispersia parametrică este mare, în comparație cu cea de la rezistoare (toleranță peste $\pm 5\%$), de aceea se întâlnesc cel mai des seriile E6, E12 și E24. Există și tipuri constructive la care se ajunge la $\pm 1\%$ (cele cu mică, cu polipropilenă).

Tangenta unghiului de pierderi ($\text{tg} \delta$) este raportul dintre puterea activă și cea reactivă, pentru o tensiune alternativă de frecvență precizată. Acest parametru depinde de calitatea dielectricului. Puterea activă înglobează toate mecanismele prin care are loc disipație.

Coeficientul de temperatură al capacității este raportul dintre variația relativă a capacității și variația corespunzătoare a temperaturii. Relația de definiție:

$$\beta = \frac{1}{C} \cdot \left. \frac{dC}{dT} \right|_{U=const}$$

Rezultă capacitatea calculată la alte temperaturi decât cea de referință: $C = C_0[1 + \beta(\theta - \theta_0)]$.

Valori uzuale ale modulului coeficientului: între 30 și 500 ppm/K. Ambele semne ale coeficientului sînt posibile, pentru diferite variante constructive.

Gama temperaturilor ambiante de funcționare.

Rezistența de izolație a dielectricului este rezistența măsurată în curent continuu, după 1 minut, la temperatura de referință. **Curentul de fugă** este curentul măsurat în aceeași încercare (tensiunea nominală).

Alți parametri privesc gabaritul, regimul climatic, încercarea mecanică, parametrii de fiabilitate ai lotului.

5.6 Tipuri de condensatoare, după destinație

- Condensatoare fixe, nepolarizate, înfășurate (au inductanță proprie)
- Condensatoare fixe, nepolarizate, neînfășurate, care au inductanță proprie mică (pentru frecvențe mai mari și pentru circuite de impulsuri)
- Condensatoare fixe, polarizate (electrolitice)
- Condensatoare variabile (cu ax sau semireglabile). Există și condensatoare variabile, cuplate două sau trei pe același ax, pentru variația simultană a capacităților.

Simbolurile pentru condensator variabil cu ax, două condensatoare cuplate pe același ax, condensator semireglabil și condensator polarizat sînt prezentate în figura 5.7 (în această ordine).



Figura 5.7: Simboluri pentru condensator variabil cu ax, două condensatoare cuplate pe același ax, condensator semireglabil și condensator electrolitic (electrodul pozitiv marcat)

N.B. În legătură cu funcționarea condensatoarelor polarizate, este necesară o precizare importantă: ele nu suportă decât tensiune cu polaritatea indicată (vezi ultimul simbol din figura 5.7). Ca urmare, nu pot fi folosite în tensiune alternativă. Totuși, ele sînt folosite în circuite în care componenta alternativă a tensiunii este mai mică decât cea statică, iar polarizarea statică respectă semnul menționat mai sus, ca în figura 5.8. Sensul curentului poate fi oricare, cît timp polaritatea tensiunii este respectată.

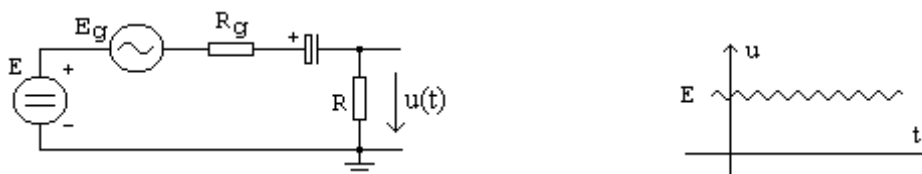


Figura 5.8: Exemplu de circuit în care este folosit un condensator electrolitic și diagrama tensiunii la bornele lui

5.7 Marcarea valorilor parametrilor

Pe condensator se marchează capacitatea nominală, tensiunea nominală, toleranța și coeficientul de temperatură. Marcarea se poate face:

- în clar;
- printr-un cod numeric;
- prin codul culorilor.

La marcarea în clar, există similitudine cu marcarea rezistoarelor, cu diferența că literele folosite pentru a marca ordinul de multiplicare provin de la submultipli unității de măsură (1F). Exemple: 5.6, 15, 470, 1n0, 220n, 0μ68, 470μ, pentru valorile: 5,6pF, 15pF, 470pF, 1nF, 220nF, 680nF=0,68μF, 470μF. De remarcat că majoritatea producătorilor folosește punctul zecimal (convenție din scrierea engleză). În figurile 5.15 și 5.16 se observă condensatoare marcate în clar.

Marcarea în cod numeric este similară cu cea de la rezistoare, considerînd că unitatea de bază este pF. Exemple: 150, 471, 102, 224, 684, pentru valorile: 15pF, 470pF, 1nF, 220nF, 680nF=0,68μF. În figura 5.9 condensatorul mai mare este marcat 103, adică 10nF. În figura 5.10, condensatorul din mijloc este marcat 221, adică 220pF. În fine, în figura 5.13, condensatorul din dreapta este marcat 474, adică 470nF.

Marcarea în codul culorilor este mai puțin folosită la condensatoare și diferă de la producător la producător. Dacă se folosesc doar trei benzi, semnificația este ca cea de la rezistoare. Dacă se folosesc patru, cea de a patra bandă are semnificația de toleranță. Dacă se folosește și a cincea bandă, ea semnifică tensiunea nominală.

5.8 Tehnologii de realizare și de montare a condensatoarelor

- Condensatoare cu dielectric ceramic, nepolarizate, construite în formă de disc (figura 5.9). Electrozii metalici depuși sub formă de film subțire pe dielectric. Terminalele lipite de electrozi. Valori mici ale capacității (maxim 100nF), inductanță proprie neglijabilă. Utilizare tipică: decuplarea frecvențelor mari în tehnica radio, circuite digitale.
- Condensatoare cu dielectric din mică, nepolarizate (figura 5.10). Dielectricul din mică, stabilitate bună cu temperatura, tensiune de străpungere mare, valori mici ale capacității (sub 10nF), inductanță proprie neglijabilă. Sînt mai scumpe. Utilizare tipică: circuite rezonante la frecvențe mari, filtre, oscilatoare, circuite în care se cere precizie foarte bună.
- Condensatoare cu polistiren (stiroflex), nepolarizate (figura 5.11). Dielectric din polistiren, calitate foarte bună la frecvențe joase. Nu este folosit la frecvențe înalte, din cauză că este înfășurat, deci are inductanță proprie mare. Electrozi din aluminiu, terminale fixate mecanic, la înfășurare. Utilizare tipică: filtre pe frecvențe joase, circuite de temporizare.
- Condensatoare cu poliester metalizat, nepolarizate (figura 5.12). Ieftini, toleranță 5-10%, inductanță proprie mare (electrozi înfășurați). Tensiune nominală 100-500 V, rezistența de izolație > 30 GΩ, $\text{tg } \delta < 0,01$, la frecvența de 1kHz.
- Condensatoare cu polipropilenă metalizată, nepolarizate (figura 5.13). Ieftini, stabilitate foarte bună a capacității (la frecvențe sub 100 kHz), toleranța începe de la 1%, dependență slabă de temperatură. Inductanță proprie mare (electrozi înfășurați).
- Condensatoare multistrat, nepolarizate (figura 5.14). Special concepute pentru inductanță proprie neglijabilă și raportul capacitate/volum mai mare decât precedentele. Dielectric ceramic sau plastic. Foarte bună stabilitate cu temperatura, lucrează la frecvențe mari, sînt mai scumpe. Utilizare tipică: decuplarea frecvențelor mari în circuite digitale.
- Condensatoare electrolitice în aluminiu, polarizate (figura 5.15). Dielectricul este un strat de oxid, creat pe suprafața aluminiului. Capacitate mare (0,47μF - 4700 μF). Toleranță mare, realizare înfășurată (nu au efect la frecvențe mari). Prezintă fenomenul de erodare a dielectricului, dacă sînt folosite timp îndelungat la tensiuni prea mici (sau nu sînt folosite de loc). Depășirea tensiunii maxime sau inversarea polarității pot

duce la explozia condensatorului. Semnul „-”, în dreptul electrodului negativ. Utilizare tipică: filtrarea tensiunii redresate, cuplare între etaje (la frecvențe audio).

- Condensatoare electrolitice cu electrozi din tantal, polarizate (figura 5.16). Volum mai mic decât cele în aluminiu, la aceeași capacitate. Inductanță proprie mult mai mică, stabilitate mai bună a capacității, zgomot mai mic, mai scumpe. Marcat electrodul pozitiv. Utilizare tipică: decuplare la frecvențe mai mari, intrare în circuite audio, decuplare circuite digitale.
- Condensatoare polarizate „double layer” („supercondensatoare”) (figura 5.17). Capacitate foarte mare (până la 1F), în volum mic. La încărcarea din surse de tensiune, cu rezistență internă mică, trebuie prevăzută limitarea curentului, deoarece regimul tranzitoriu durează mult, cu tensiune aproape zero pe condensator. Inductanță proprie mare. Utilizare tipică: rezervă de energie pentru salvare de date sau alimentarea circuitelor de protecție, când s-a întrerupt accidental sursa de alimentare.
- Condensatoare variabile cu ax, dielectric aer sau dielectric poliester, nepolarizate (figura 5.18). Capacități 10pF – 500 pF. Gabarit mai mare la condensatorul cu aer. Utilizare tipică: acord pe post în tehnica radio (în circuite rezonante).
- Condensatoare variabile semireglabile („trimmer”), dielectric ceramic, nepolarizate (figura 5.19). Capacități 3pF – 40 pF. Utilizare tipică: reglarea fină a benzii în tehnica radio, ajustarea frecvenței în oscilatoare.
- Capacitate imprimată pe circuit (capacități mici, în circuite de frecvență mare, aparate de gabarit mic).

Tehnologia de montare pe cablaj este similară cu cea a rezistoarelor.

<http://www.hobby-elec.org/>



Figura 5.9: Condensatoare ceramice

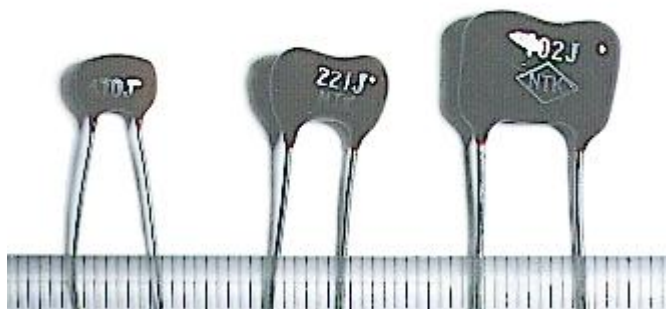


Figura 5.10: Condensatoare cu mică

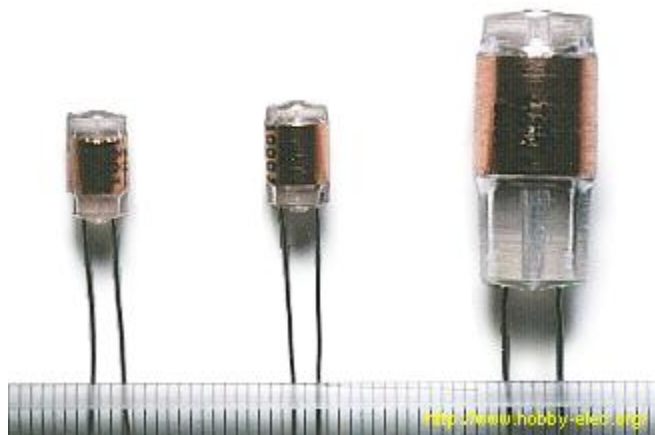


Figura 5.11: Condensatoare stiroflex



Figura 5.12: Condensatoare cu polipropilenă metalizată

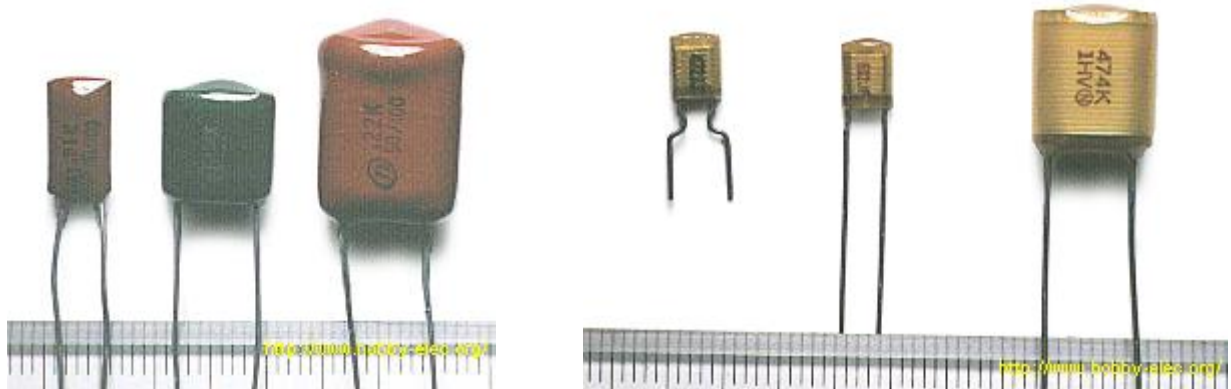


Figura 5.13: Condensatoare cu poliester

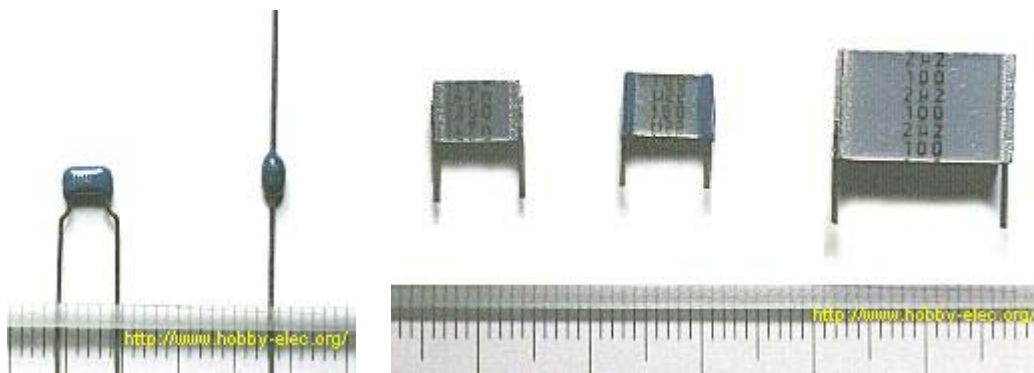


Figura 5.14: Condensatoare multistrat

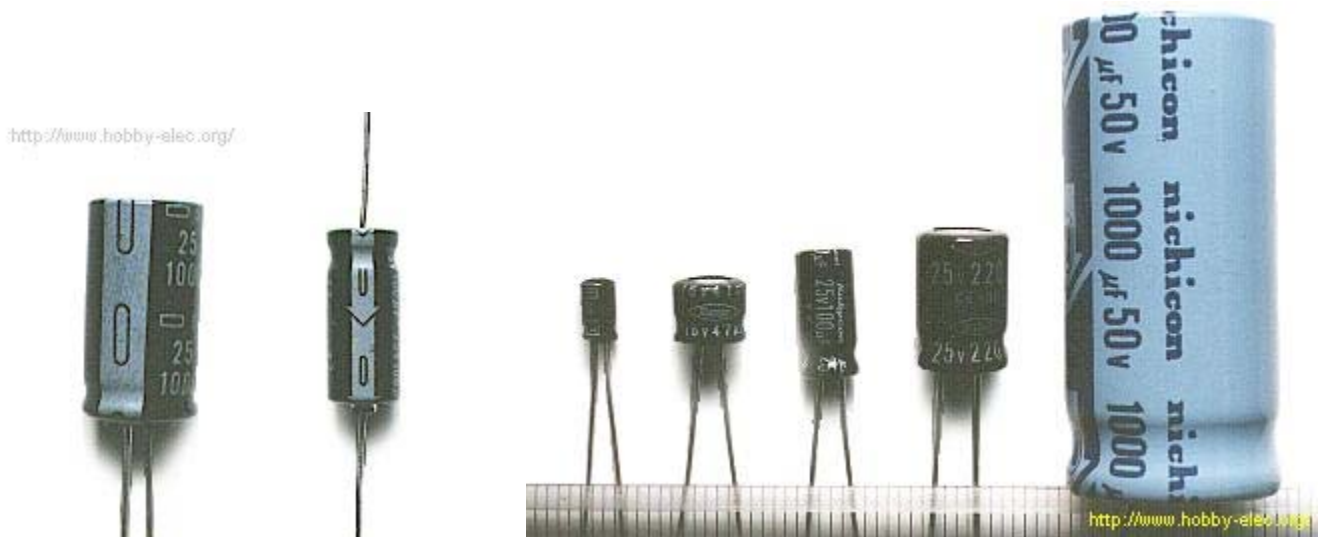


Figura 5.15: Condesatoare electrolitice în aluminiu

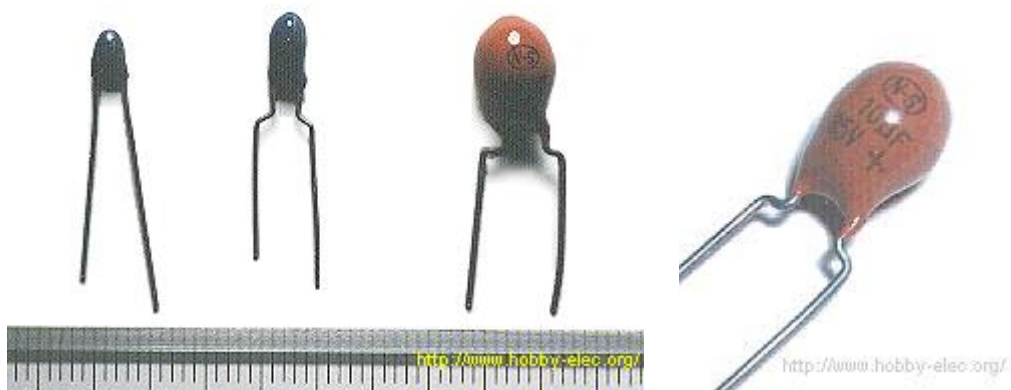


Figura 5.16: Condensatoare electrolitice cu tantal



Figura 5.17: Condensator “double layer”

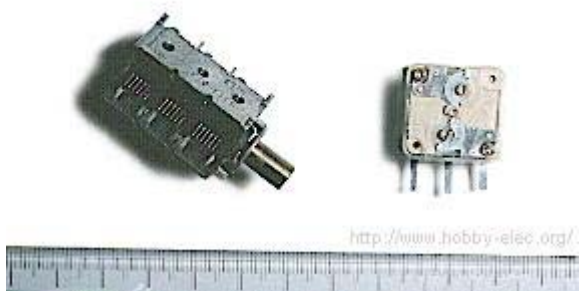


Figura 5.18: Condensatoare variabile cu ax



Figura 5.19: Condensatoare variabile semireglabile

Tehnologia de montare pe cablaj este similară cu cea a rezistoarelor.