

Nella **tabella 3** è riportato il valore della *costante dielettrica relativa* di alcuni isolanti di uso più comune.

Tabella 3
Valori della
costante
dielettrica
di alcuni
materiali

Materiale	ϵ_r	Materiale	ϵ_r
Acqua distillata	80	Gomma	3
Aria secca	1	Mica in foglio continuo	4,5 ÷ 5,5
Bachelite	5,5 ÷ 8,8	Porcellana	4,5 ÷ 6,5
Carta impregnata con dielettrici clorurati	5,5 ÷ 6,5	PVC per cavi (polietilene)	2,2 ÷ 2,4
Film plastici di prolipropilene	2,2	Vetro	3,8 ÷ 9,5
Film plastici di polietilene	2,8	Vuoto	1

**Costante
dielettrica
relativa**

La **costante dielettrica relativa** ϵ_r di un materiale isolante è il rapporto fra la capacità C di un condensatore che ha quel materiale come dielettrico e la capacità C_0 dello stesso condensatore avente l'aria, o il vuoto, come dielettrico:

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0}$$

e rappresenta, quindi, la proprietà di un isolante a immagazzinare l'energia elettrostatica. Il suo valore, per la maggior parte dei materiali isolanti commerciali, varia da circa 2 a 10; in alcuni particolari materiali, come ad esempio le ceramiche al titanato di bario, può assumere valori molto elevati, fino a circa 9000.

Dal punto di vista applicativo si utilizzano materiali con bassi valori di costante dielettrica in alta frequenza mentre i valori più elevati sono da preferirsi per le applicazioni nei condensatori.

Il valore della *costante dielettrica dell'aria*, o del vuoto, vale:

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$$

3

La **rigidità dielettrica** di un isolante è l'intensità del campo elettrico necessario per provocare l'annullamento dell'equilibrio tra le forze del campo elettrico e le forze di attrazione che tengono legati gli elettroni periferici al loro nucleo.

In tale situazione il materiale isolante assume il carattere di un materiale conduttore e in esso si forma una corrente elettrica istantanea e violenta che costituisce la scarica distruttiva attraverso l'isolante.

Nei liquidi e nei gas la scarica provoca la volatilizzazione di parte delle molecole, comunque al cessare della scarica il materiale si ricostituisce riacquistando le sue proprietà isolanti.

Nei materiali solidi la scarica determina la distruzione del dielettrico che resta perforato nelle zone di minor resistenza alla scarica.

La rigidità dielettrica viene normalmente definita come il rapporto tra la tensione di perforazione e lo spessore del materiale nel punto in cui avviene la perforazione; si esprime in [kV/cm] o anche in [kV/mm] e diminuisce all'aumentare dello spessore dell'isolante. Se, ad esempio, un foglio di bachelite dello spessore di 0,2 cm viene perforato da una tensione di 25 kV, si dirà che esso presenta una rigidità dielettrica di 125 kV; tuttavia un foglio di bachelite della stessa qualità e dello spessore di 1 cm normalmente non sopporta una tensione di 125 kV ma viene perforato da una tensione nettamente inferiore. La rigidità dielettrica, inoltre, diminuisce all'aumentare della temperatura, dipende dal tempo di applicazione della tensione ed è maggiore per tensioni continue.

**Rigidità
dielettrica**

C.E. necessario
a rompere i
legami degli
elettroni al nucleo
↓
perforazione
dell'isolante

125 kV/cm

Per tensioni alternate la rigidità dielettrica diminuisce all'aumentare della frequenza. Nelle applicazioni pratiche le sollecitazioni dielettriche a cui i materiali isolanti sono soggetti devono essere contenute entro limiti inferiori ai rispettivi valori di rigidità dielettrica.

Normalmente viene adottato un coefficiente di sicurezza che varia da 3 a 5; gli isolanti vengono quindi proporzionati in maniera tale che in servizio continuativo la sollecitazione massima che essi devono sopportare sia contenuta entro i limiti da 1/3 a 1/5 della rigidità dielettrica.

La **tabella 4** riporta i valori di rigidità dielettrica di alcuni isolanti di uso più comune.

Tabella 4

Valori della rigidità dielettrica di alcuni materiali a $f = 50 \text{ Hz}$

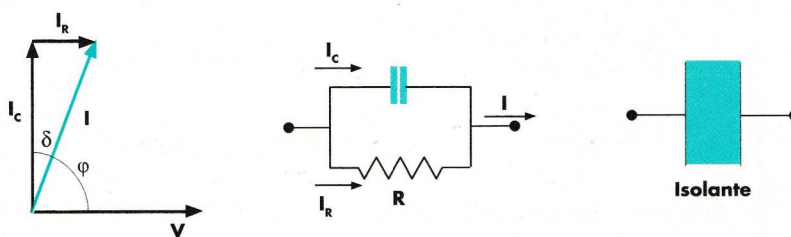
RIGIDITÀ DIELETTRICA A $f = 50 \text{ Hz}$

Materiale	ϵ_r	Materiale	ϵ_r
Acqua distillata	50 ÷ 100	Film plastici di polietilene	250 ÷ 300
Aria secca	20	Gomma	160 ÷ 500
Bachelite	100 ÷ 120	Mica in foglio continuo	600 ÷ 2000
Carta impregnata con dielettrici clorurati	1000 ÷ 2000	Porcellana	200 ÷ 400
Ebanite	300 ÷ 1100	PVC per cavi (polietilene)	1000 ÷ 1300
Film plastici di polipropilene	3000 ÷ 4000	Vetro	0050 ÷ 3000

L'**angolo di perdita**, normalmente indicato per mezzo della sua tangente $\tan \delta$, rappresenta la bontà di un isolante che risulta tanto migliore quanto più esso è piccolo. L'angolo di perdita tiene conto del fatto che un campo variabile produce delle perdite per dissipazione. Questo fenomeno è evidente quando si interpone un isolante tra le armature di un condensatore.

Con riferimento alla **figura 1** le perdite per dissipazione possono essere espresse mediante una corrente fittizia I_R in quadratura con la corrente ideale del condensatore I_C ; sommando queste due componenti si ottiene la corrente totale I ; l'angolo di sfasamento tra la corrente totale I e la corrente ideale I_C rappresenta l'angolo di perdita.

Figura 1
Schema dell'angolo di perdita di un isolante



I valori dell'angolo di perdita dipendono dalla temperatura e dalla frequenza.

In corrente alternata la corrente relativa a un generico conduttore omogeneo, massiccio, di lunghezza infinita e infinitamente distante da altri conduttori, non si distribuisce uniformemente nella sezione del conduttore stesso, come avviene in corrente continua, ma tende a concentrarsi prevalentemente in superficie.

Tale effetto, detto **effetto pelle**, è dovuto al fatto che l'impedenza delle parti di sezione del conduttore abbracciate da un maggior flusso magnetico, e cioè quelle più interne, è più elevata e pertanto risulta minore il valore della corrente.

Si può pensare a una conduzione della corrente attraverso tanti filetti elementari, uniformemente distribuiti, ognuno dei quali è dotato di una sua resistenza (*costante*) e di una induttanza (*variabile con la distanza dal centro*), come schematicamente indicato nella **figura 2** a pagina successiva.

Condensatori

CONTENUTI

- 1 Generalità
- 2 Comportamento in transitorio
- 3 Comportamento in regime sinusoidale
- 4 Parametri caratteristici
- 5 Codici di identificazione
- 6 Tecnologie costruttive
- 7 Condensatori elettrolitici
- 8 Condensatori variabili

OBIETTIVI

Conoscenze

- Comportamento di un condensatore in regime transitorio e in regime sinusoidale
- Parametri caratteristici di un condensatore
- Tecniche costruttive per i condensatori
- Comportamento dei condensatori elettrolitici
- Comportamento reale dei condensatori

Abilità

- Leggere i parametri di un condensatore sia dal codice alfanumerico sia dal codice a colori
- Calcolare la tensione in regime transitorio
- Saper utilizzare i condensatori elettrolitici

1 Generalità

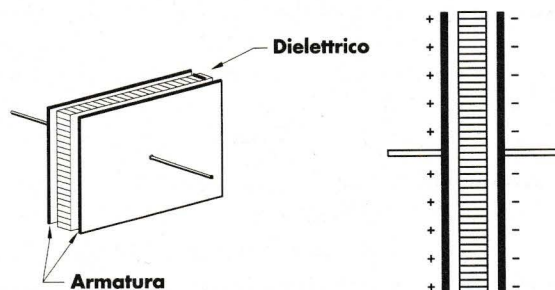


Il **condensatore** è un dispositivo costituito da due superfici metalliche denominate *armature*, fra le quali è interposto un materiale isolante chiamato *dieletrico* (vedi **figura 1**).

Alle due armature sono collegati due fili conduttori detti "terminali" (*leads*), che servono per il collegamento al circuito.

Figura 1
Struttura di un condensatore piano

La corrente nel condensatore



La presenza del dielettrico non consente un passaggio di corrente all'interno del condensatore.

La funzione essenziale del condensatore è di immagazzinare carica elettrica in alcuni momenti per cederla poi in momenti successivi.

Capacità del condensatore

Da questo punto di vista, il condensatore può essere pensato come un serbatoio di carica elettrica; quando esso contiene carica si dice *carico*, quando non ne contiene si dice *scarico*. Quando il condensatore è carico, contiene su una armatura una quantità di carica Q (espressa in coulomb, C) di segno positivo mentre sull'altra armatura contiene la stessa quantità di carica ma di segno negativo.

La quantità di carica immagazzinata arriva sulle armature attraverso i terminali; pertanto, sia durante la carica che durante la scarica, i terminali sono percorsi da corrente. È opportuno ricordare che la corrente che percorre i terminali non attraversa il condensatore ma trasporta le cariche per caricare o scaricare il condensatore.

Quando il condensatore è carico, presenta fra le sue armature una differenza di potenziale V_C che dipende dalla quantità di carica immagazzinata e dalla capacità C espressa in farad (F).

$$V_C = \frac{Q}{C}$$

1



La **capacità** di un condensatore rappresenta l'attitudine del componente ad accumulare carica elettrica.

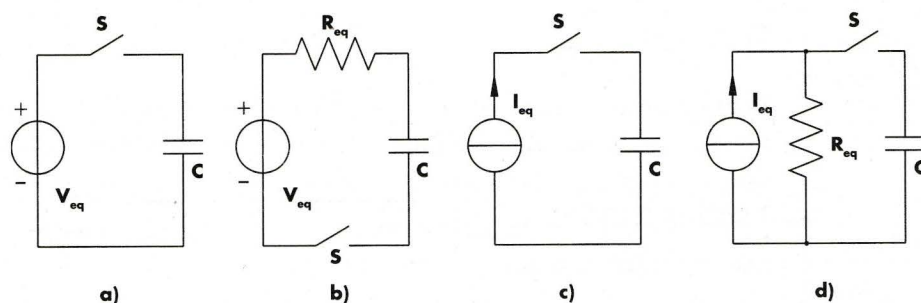
Durante la carica e la scarica le variazioni di carica ΔQ e la variazione della tensione ΔV_C sono legate dalla relazione seguente:

$$\Delta Q = C \cdot \Delta V_C \quad \text{da cui si può ricavare} \quad \frac{\Delta Q}{\Delta t} = C \cdot \frac{\Delta V_C}{\Delta t}$$

2

Il comportamento di un condensatore all'interno di un circuito può essere studiato riducendo il circuito in una delle quattro situazioni riportate nella **figura 2**. A esse si può giungere applicando i teoremi di Thevenin o di Norton.

Figura 2
Tipiche
situazioni
circuitali di un
condensatore

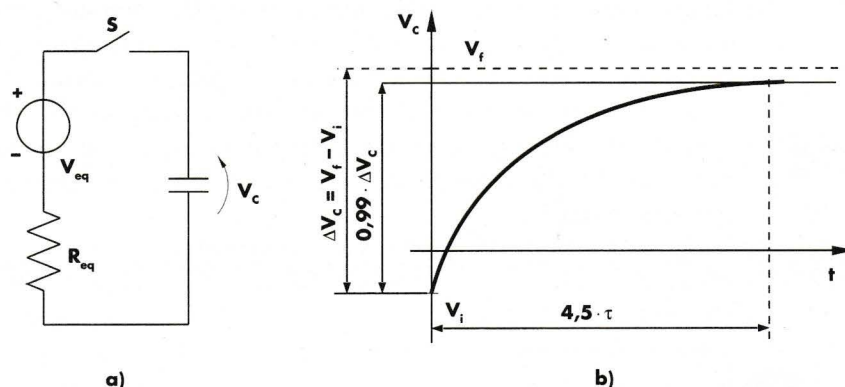


Fra le armature del condensatore nella **figura 2a** si stabilisce una tensione pari a quella del generatore ($V_C = V_{eq}$) istantaneamente appena viene chiuso l'interruttore S , e sulle armature si accumula una quantità di carica $Q = C \cdot V_C$. Nella **figura 2b** il condensatore si carica esponenzialmente nel tempo e la sua tensione raggiunge, praticamente, quella del generatore dopo un tempo pari a $4,5 \cdot \tau$ a partire dal momento in cui viene chiuso l'interruttore ($\tau = R_{eq} \cdot C$). Nel caso della **figura 2c** il condensatore è interessato da una corrente costante nel tempo per cui la sua quantità di carica, e quindi la sua tensione, aumenta linearmente nel tempo ($Q = I \cdot t$). Nel caso della **figura 2d** il comportamento è simile al caso della **figura 2b** e la tensione aumenta esponenzialmente, tendendo al valore limite $V_{eq} = R_{eq} \cdot I_{eq}$.

2 Comportamento in transitorio

Analizziamo ora il comportamento di un condensatore quando viene sottoposto a una brusca variazione di tensione mediante il circuito della **figura 3a**.

Figura 3
Transitorio di carica di un condensatore



Carica e scarica

Facciamo le seguenti ipotesi di partenza:

- $t = 0$ = inizio del transitorio = chiusura dell'interruttore;
- V_i = tensione sul condensatore prima della chiusura dell'interruttore;
- V_C = tensione sul condensatore (quando l'interruttore è chiuso) (V_C non può cambiare istantaneamente);
- V_f = tensione sul condensatore dopo un tempo infinito, sufficiente a far finire il transitorio.

Sulla base delle precedenti ipotesi, la tensione V_C sul condensatore è espressa dalla seguente relazione:

$$V_C(t) = V_f + (V_i - V_f) e^{-t/\tau}$$

3

in cui: $\tau = R_{eq} \cdot C$

Il suo grafico è rappresentato nella **figura 3b**. Se indichiamo con $\Delta V_C = V_f - V_i$ la variazione che subisce la V_C nel corso del transitorio, con semplici considerazioni si dimostra che V_C subisce una variazione pari al 90% di ΔV_C in un tempo pari a $4,5 \cdot \tau$ (vedere esercizio svolto 1).

3 Comportamento in regime sinusoidale

Quando il condensatore è inserito in un circuito contenente un generatore sinusoidale, esso è sottoposto a una tensione il cui valore varia nel tempo e, quindi, a un processo di continua carica e scarica. Ciò produce all'interno dei suoi terminali un passaggio di corrente, che varia nel tempo in modo sinusoidale come la tensione e con la stessa frequenza. La tensione \bar{V}_C ai capi del condensatore ha andamento sinusoidale e la stessa frequenza della corrente, ma è sfasata di 90° in ritardo rispetto a essa.

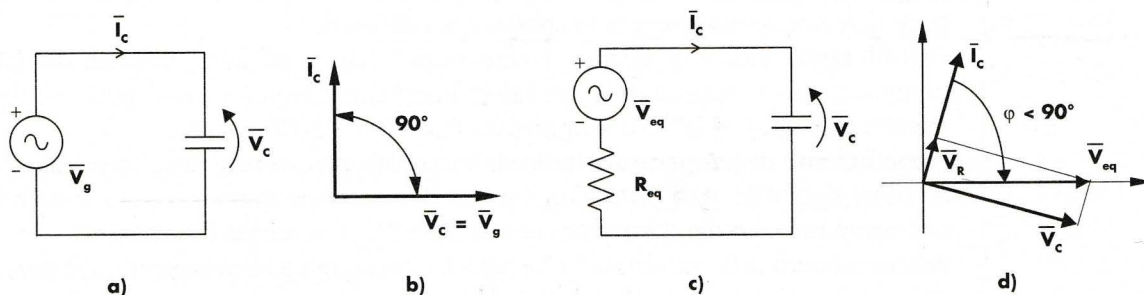
Ricordiamo che una tensione sinusoidale può essere rappresentata con il vettore (\bar{V}). Nella **figura 4a** il condensatore è collegato a un generatore ideale di tensione sinusoidale; in tal caso $\bar{V}_C = \bar{V}_g$ e la corrente è in anticipo rispetto alla tensione, come

Sfasamento
fra tensione e
corrente

evidenziato nel diagramma vettoriale della **figura 4b**. La **figura 4c** riporta il caso in cui il condensatore è collegato a un generatore con resistenza e il relativo diagramma vettoriale, riportato nella **figura 4d**, mostra come la tensione del condensatore e la corrente sono sfasati di 90° mentre lo sfasamento φ fra \bar{V}_{eq} ed \bar{I}_C è inferiore a 90° .

Figura 4

Condensatore in regime sinusoidale: circuito capacitivo (a); sfasamento in un circuito capacitivo (b); circuito ohmico-capacitivo (c); sfasamento in un circuito ohmico-capacitivo (d).



Quando un condensatore è inserito all'interno di un circuito in regime sinusoidale, il suo comportamento è definito mediante una impedenza espressa dalla seguente formula:

$$\bar{Z}_C = \frac{1}{j\omega C}$$

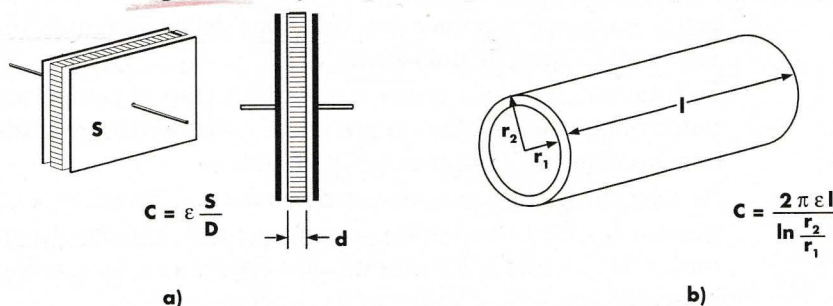
4

4 Parametri caratteristici

I principali parametri che caratterizzano il comportamento di un condensatore sono:

- capacità nominale;
- tolleranza;
- coefficiente di temperatura;
- tensione nominale;
- resistenza di isolamento;
- angolo di perdita.

La **capacità nominale** è il valore capacitivo del componente determinato in fase di fabbricazione ed è stampigliato sul contenitore mediante un opportuno codice. Tale valore è espresso in farad [F]. I valori di capacità disponibili in commercio vanno dai [pF] ai [mF]. Il valore dipende dal tipo di materiale utilizzato come *dielettrico* e dalla geometria costruttiva. Per la costruzione dei condensatori vengono adoperate quasi esclusivamente due geometrie: quella piana e quella cilindrica, riportate nella **figura 5**.

Figura 5
Condensatore piano (a); condensatore cilindrico (b)


Importanza del dielettrico

Nel condensatore piano le armature sono costituite da due fogli di materiale conduttore disposti parallelamente e separati da uno strato di dielettrico. Dalla formula della capacità del condensatore piano si vede che, per avere valori di capacità elevati, occorre scegliere un dielettrico con elevata costante dielettrica, realizzare armature con grande superficie, e rendere il dielettrico molto sottile.

Analoghe considerazioni valgono per il condensatore cilindrico, in cui si vede che, per rendere piccolo il denominatore della formula, è necessario rendere i due raggi poco diversi e quindi piccolo lo spessore del dielettrico.

La **tolleranza** indica di quanto il vero valore della capacità si discosta dal valore nominale; essa è espressa in % del valore nominale, e rispetto a esso può essere simmetrica (esempio: $\pm 20\%$) o asimmetrica (esempio: $-20\% \div +50\%$).

Il **coefficiente di temperatura** indica la variazione percentuale della capacità rispetto al valore nominale a 25 °C per ogni grado di variazione di temperatura. Esso è normalmente indicato dal costruttore con la sigla **TC** (*Temperature Coefficient*).

Per tener conto delle variazioni della capacità introdotte dalla temperatura, è possibile ricavare il nuovo valore utilizzando la formula seguente:

$$C = C_0 \cdot [1 + TC \cdot (T - T_0)] \quad 5$$

La **tensione nominale** è la massima tensione che può essere applicata al condensatore senza che avvenga la perforazione del dielettrico. Il suo valore dipende dallo spessore e dalla rigidità dielettrica del materiale isolante utilizzato come dielettrico. È facile dedurre che la riduzione dello spessore, per aumentare la capacità, comporta una diminuzione della tensione nominale.

La **resistenza di isolamento** rappresenta la resistenza fra un'armatura e l'altra introdotta dal dielettrico. La sua presenza nasce dal fatto che il dielettrico non è un isolante perfetto e quindi con resistività infinita. In realtà, come già visto in precedenza, gli isolanti hanno una resistività molto alta ma non infinita; perciò anche il dielettrico ha una sua resistenza. Il valore della resistenza di isolamento è dato dalla relazione seguente, analoga a quella dei conduttori:

$$R_p = \rho \cdot \frac{d}{S} \quad 6$$

in cui:

- R_p = resistenza di isolamento;
- ρ = resistività di massa;
- d = spessore del dielettrico;
- S = superficie del dielettrico.

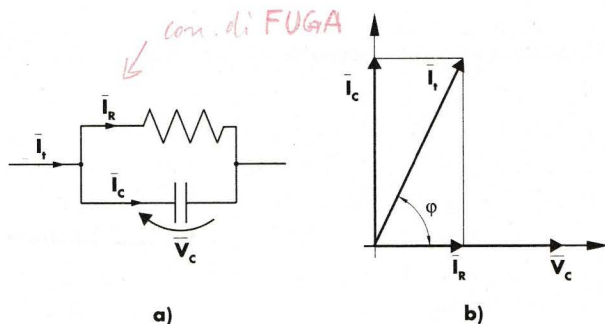
Resistenza di isolamento e capacità

È il caso di notare che la resistenza di isolamento è inferiore nei condensatori di capacità elevate; infatti, per avere grandi capacità, occorrono spessori piccoli e superfici grandi e tale scelta porta a una riduzione della resistenza di isolamento. Il suo valore va dai $M\Omega$ a qualche migliaio di $M\Omega$.

Se si tiene conto della resistenza di isolamento, il comportamento del condensatore non è più quello descritto in precedenza, ma può essere studiato sostituendolo con il circuito equivalente riportato nella **figura 6a**.

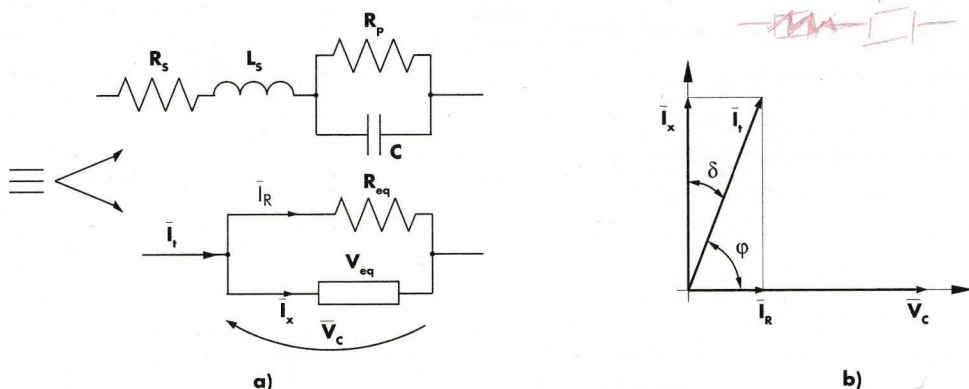
La corrente \bar{I}_t , che scorre nei terminali del condensatore, è composta dalle due componenti \bar{I}_R e \bar{I}_C . La corrente \bar{I}_R è costituita dalle cariche che attraversano il dielettrico, mentre la corrente \bar{I}_C è costituita dalle cariche che, fermandosi sulle armature, contribuiscono a caricare o scaricare il condensatore.

Figura 6
Circuito
equivalente
semplificato del
condensatore
(a); sfasamento
fra corrente e
tensione (b)



Una analisi più approfondita sul funzionamento del condensatore ci porta a sostituirlo con il circuito equivalente della **figura 7a** in cui L_s tiene conto di fenomeni induttivi che nascono nel condensatore, mentre R_s tiene conto della resistenza dei terminali e delle armature (le cariche elettriche che caricano il condensatore si distribuiscono uniformemente sulle armature e, nel loro percorso, devono vincere la resistenza opposta dal conduttore che le costituisce). Nel condensatore, quindi, si sovrappongono fenomeni reattivi e fenomeni resistivi. I primi, provocati dal condensatore C e dalla induttanza L_s , non producono alcuna dissipazione di energia mentre le resistenze dissipano energia per effetto Joule. La **figura 7b** mostra il diagramma vettoriale delle grandezze riportate nel circuito equivalente. In essa si vede che: le due correnti \bar{I}_R e \bar{I}_X sono rispettivamente in fase e in quadratura con la tensione \bar{V}_C , la corrente \bar{I}_t è data dalla somma vettoriale di \bar{I}_R e \bar{I}_X e lo sfasamento φ fra la corrente \bar{I}_t e la tensione \bar{V}_C , è inferiore a 90° .

Figura 7
Circuito
equivalente
completo del
condensatore
reale (a);
sfasamento
fra tensione e
corrente (b)



Nel circuito equivalente e nel suo diagramma vettoriale vediamo che la corrente \bar{I}_t è sfasata rispetto alla tensione \bar{V}_C di un angolo inferiore a 90° .

Angolo di perdita

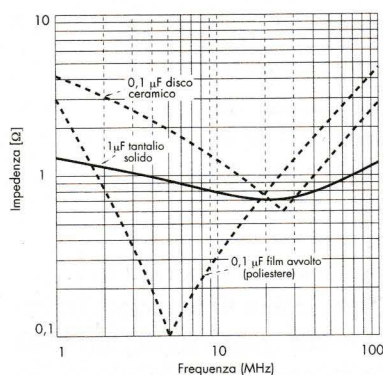
L'angolo di perdita δ rappresenta la diminuzione di sfasamento provocato dalla presenza delle resistenze R_s ed R_p ; all'interno di queste avviene la dissipazione di energia per effetto Joule. La tangente dell'angolo di perdita rappresenta il rapporto fra la potenza persa e la potenza reattiva e viene denominato **fattore di dissipazione**:

$$\tan \delta = \frac{V_C \cdot I_R}{V_C \cdot I_X} = \frac{V_C^2 / R_{eq}}{V_C^2 / X_{eq}} = \frac{X_{eq}}{R_{eq}}$$

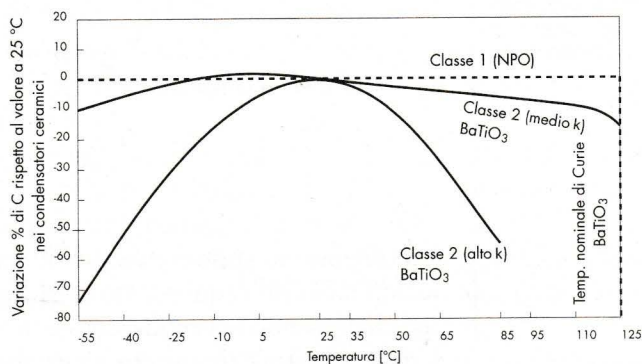
Per consentire una appropriata scelta del tipo di condensatore, in base alle caratteristiche richieste, in **figura 8** (alla pagina seguente) si riportano alcuni utili grafici.

Figura 8

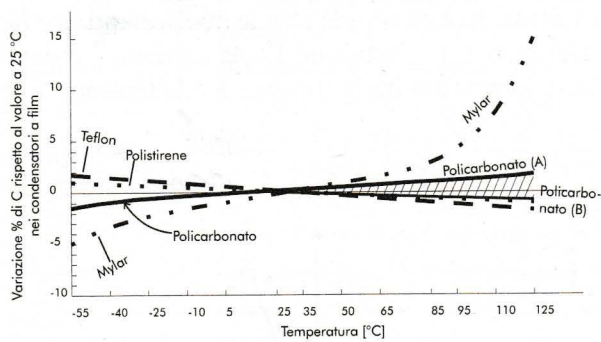
Riepilogo delle caratteristiche dei condensatori



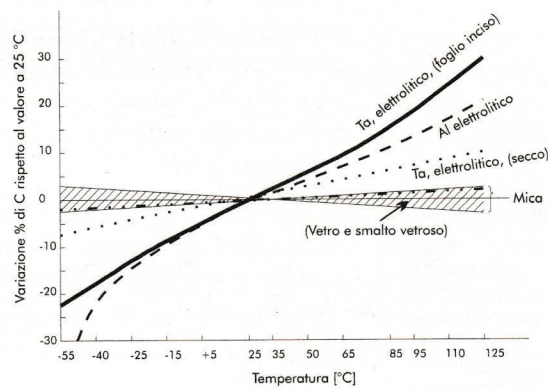
a)



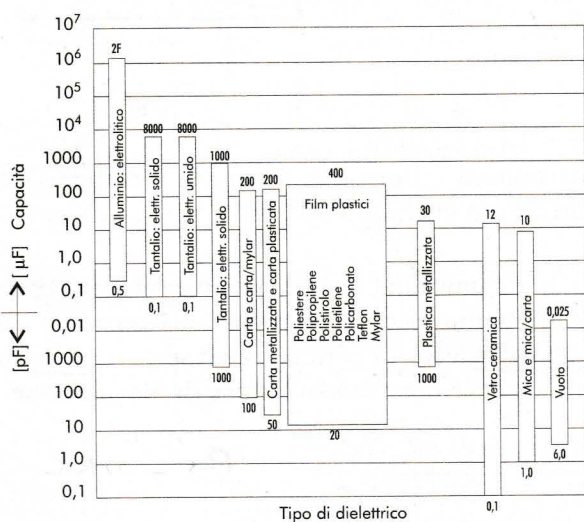
b)



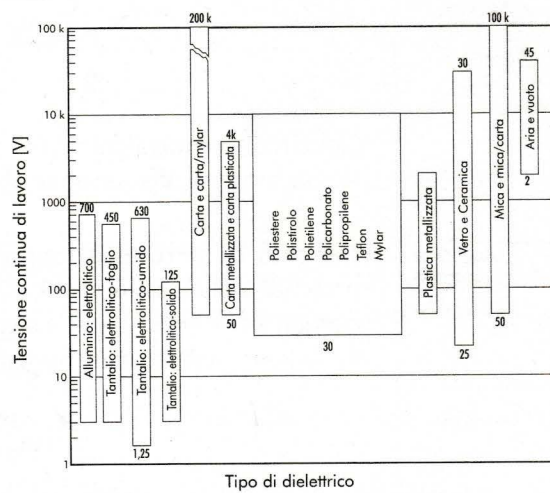
c)



d)



e)



f)

5 Codici di identificazione

Alcuni dei parametri descritti nel paragrafo precedente vengono riportati sul contenitore utilizzando codici che dipendono dal tipo di condensatore e dalle sue dimensioni. I parametri più comunemente riportati sono:

- il valore della capacità;
- la tolleranza;
- la tensione nominale;
- il coefficiente di temperatura.

Codici per la tolleranza

Alcuni dei suddetti parametri non sempre sono riportati sul contenitore, a volte per carenza di spazio a volte perché poco rilevanti per le applicazioni a cui sono destinati. In ogni caso i parametri di particolare importanza sono rilevabili dalle schede tecniche. Nel caso dei condensatori di grosse dimensioni, il valore della capacità e della tensione nominale sono stampigliati sul contenitore con il corrispondente numero, mentre il valore della tolleranza è spesso indicato utilizzando il codice alfabetico riportato nella **tabella 1**.

Tabella 1
Codici per la tolleranza nei condensatori

Codice	Tolleranza >10 pF	Tolleranza < 10 pF
B	—	$\pm 0,1$ pF
C	—	$\pm 0,25$ pF
D	—	$\pm 0,5$ pF
E	$\pm 25\%$	
F	$\pm 1\%$	± 1 pF
G	$\pm 2\%$	
H	$\pm 2,5\%$	
J	$\pm 5\%$	
K	$\pm 10\%$	
M	$\pm 20\%$	
P	$-0\% \div +100\%$	
S	$-20\% \div +50\%$	
X	$-20\% \div +40\%$	
Z	$-20\% \div +80\%$	

Le sigle più frequenti sono J, K, M, corrispondenti rispettivamente alle tolleranze $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 20\%$.

Finecorsa meccanico

Per indicare il valore della capacità sui condensatori di piccole dimensioni si fa frequentemente ricorso a un codice alfanumerico in cui si usa, come punto decimale, la lettera del sottomultiplo. La **tabella 2** ne contiene alcuni esempi.

Tabella 2
Codici per il valore capacitivo

Codice	Valore	Codice	Valore	Codice	Valore
p15	0,15 pF	5n9	5,9 nF	6 μ 8	6,8 μ F
1p0	1 pF	6n8	6,8 nF	3 μ 3	3,3 μ F
3p3	3,3 pF	15n	15 nF		
150p	150 pF	1n0	1 nF		

Quando, nell'indicazione del valore capacitivo, non compare alcuna indicazione sul tipo di sottomultiplo (p, n, μ), occorre tener conto che esso può essere solo il pF oppure il μ F.

In questa ipotesi si possono presentare due casi: nel primo c'è un numero intero di tre cifre; nel secondo c'è un numero decimale.

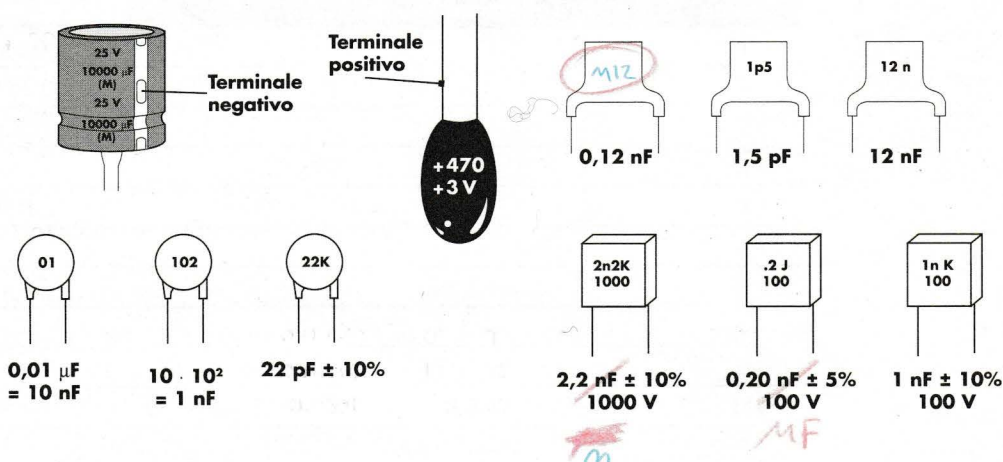
Codici a tre cifre

Nel caso di indicazione mediante un numero intero di tre cifre il sottomultiplo è il pF. Il valore della capacità si ricava considerando le prime due cifre come cifre significative e la terza come moltiplicatore. Quando la capacità è inferiore ai 100 pF, il numero è formato dalle due cifre significative senza il moltiplicatore (è il caso di condensatori ceramici molto piccoli).

Esempio: $224 = 22 \cdot 10^4 = 220 \text{ nF}$; $472 = 47 \cdot 10^2 = 4700 \text{ pF} = 4,7 \text{ nF}$; $22 = 22 \text{ pF}$. Per alcuni condensatori a film plastici viene utilizzato il codice a strisce colorate. Le prime tre indicano il valore della capacità (le prime due indicano le cifre significative e la terza il moltiplicatore) con la stessa convenzione già vista per i resistori; mentre la quarta indica la tolleranza (nero = $\pm 20\%$; bianco = $\pm 10\%$; verde = $\pm 5\%$). La quinta indica la tensione nominale (marrone = 100 V; rosso = 250 V; giallo = 400 V; blu = 630 V).

Per esempio: marrone, nero, giallo, bianco, rosso = $(10 \cdot 10^4 \text{ pF}) = 100 \text{ nF} \pm 10\% \dots 250 \text{ V}$. Nella **figura 9** sono riportati alcuni esempi di condensatori.

Figura 9
Esempi di contenitori e di codici per condensatori



6 Tecnologie costruttive

I condensatori vengono classificati in base al tipo di dielettrico adoperato in:

- condensatori ceramici;
- condensatori a film plastici;
- condensatori elettrolitici.

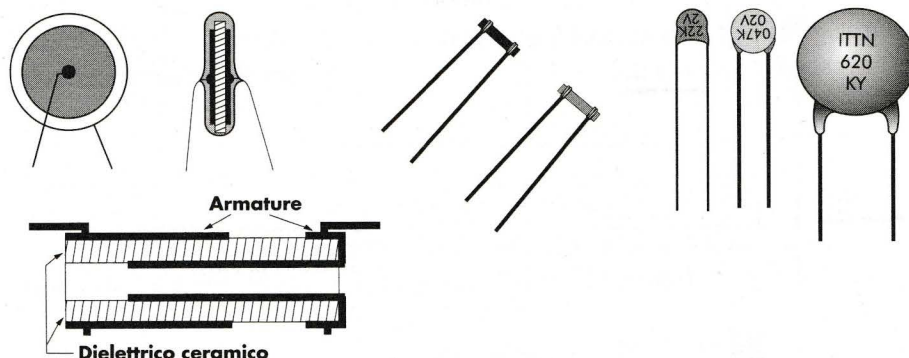
Ne esistono altri meno comuni come i condensatori a carta, a mica, in vetro.



I **condensatori** ceramici utilizzano come dielettrico un materiale ceramico e hanno due forme geometriche: a disco e a tubetto, come si vede in **figura 10**.

Il valore della capacità copre una vastissima gamma e va da pochi pF a qualche centinaio di nanofarad (nF).

Figura 10

Forme di
condensatori
ceramici

Questi condensatori sono suddivisi in tre classi: *classe I*, *classe II* e *classe III*.

Classe I

Nei condensatori ceramici della **classe I**, per la fabbricazione del dielettrico vengono utilizzati come componente base il biossido di titanio o il titanato di calcio, con l'aggiunta di altri composti per conferire al dielettrico le proprietà desiderate. I condensatori della classe I sono caratterizzati da una elevata stabilità in temperatura e da un basso fattore di dissipazione. Il coefficiente di temperatura può essere positivo (indicato con P) o negativo (indicato con N).

Vediamo alcuni esempi:

N150 = $-150 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, P100 = $+100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, N080/N075 = $-80 \div -75 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. Il più stabile è indicato con NP0 = $0 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ e non subisce variazioni al variare della temperatura. Per le loro caratteristiche, questi condensatori trovano applicazione nei circuiti risonanti, per accoppiamento e bypass in alta frequenza e in tutti i casi in cui è richiesta una elevata stabilità del circuito.

Classe II

Nei condensatori della **classe II** viene utilizzato come composto base il titanato di bario, con l'aggiunta di altri composti per conferire al dielettrico le caratteristiche desiderate. I condensatori della classe II hanno un comportamento poco lineare (la carica accumulata non è proporzionale alla tensione applicata), ma hanno una costante dielettrica molto maggiore rispetto a quelli della classe I. Ciò consente una maggiore miniaturizzazione. Nella classe II vi sono due gruppi: stabili e instabili.

Questi condensatori trovano applicazione come bypass e come filtri dove non è richiesta una elevata precisione di funzionamento.

Classe III

I condensatori ceramici della **classe III** sono caratterizzati da un processo di fabbricazione in cui si tende a ridurre il dielettrico a spessori estremamente sottili al fine di miniaturizzare al massimo le dimensioni. Per l'esiguità dello spessore di dielettrico essi sono caratterizzati da bassi valori della tensione nominale, da un basso valore della resistenza parallelo e da un elevato valore della resistenza serie (spessore delle armature piccolissimo).

Nella tabella seguente sono elencate le principali proprietà dei dielettrici ceramici.

Tabella 3

Riepilogo

Parametro	Classe I	Classe II stabile	Classe II instabile	Classe III
Costante dielettrica	$6 \div 500$	$250 \div 2400$	$3000 \div 10000$	$900 \div 5100$
Campo di temperature in $^\circ\text{C}$	$-55 \div +125$	$-55 \div +125$	$+10 \div +85$	$-55 \div +80$
Coefficiente di temperatura in ppm	P150 \div N5600			
Fattore di dissipazione in % a 25°C	$0,01 \div 0,4$	$0,4 \div 1$	$1 \div 4$	$4 \div 8$

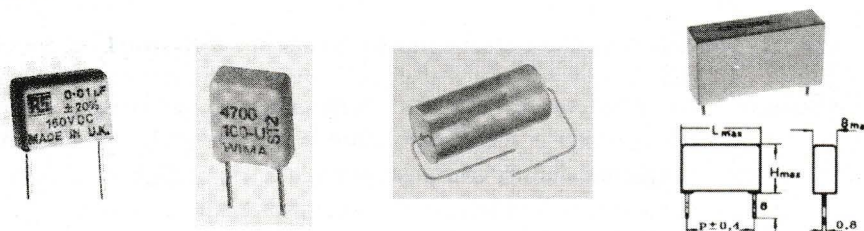


I **condensatori a film plastici** utilizzano come dielettrico un film di materiale plastico metallizzato. I più comuni sono: *polistirolo*, *mylar*, *policarbonato*, *poliestere*, *teflon*.

Questi condensatori coprono una gamma di valori che va da 1 nF a 1000 nF. Essi sono caratterizzati da una buona stabilità in temperatura, da basse perdite, e vengono usati prevalentemente in bassa frequenza.

Nella **figura 11** sono illustrati alcuni condensatori a film plastici.

Figura 11 Condensatori a film plastici



7 Condensatori elettrolitici



I **condensatori elettrolitici** utilizzano come dielettrico un ossido di metallo avente buone proprietà dielettriche.

Possono essere:

- in alluminio;
- al tantalio.



I **condensatori elettrolitici** in alluminio utilizzano come armature due lamine di alluminio di cui una è ricoperta da uno strato di ossido Al_2O_3 .

**Formazione
dell'ossido**

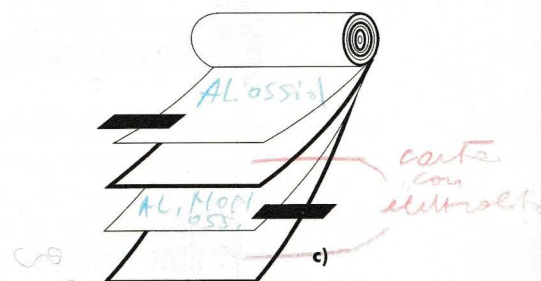
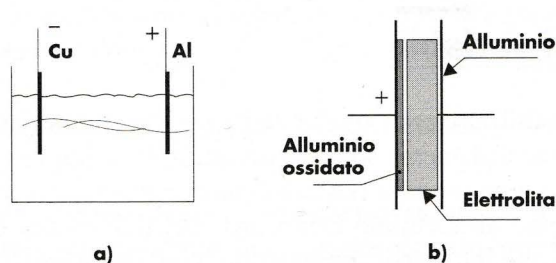
Lo strato di ossido viene ottenuto per elettrolisi collegando il foglio di alluminio da ossidare al polo positivo mentre al polo negativo è collegato un foglio di rame come indicato nella **figura 12a**. Il passaggio di corrente nella soluzione produce la formazione sul foglio di alluminio di uno strato di ossido molto sottile (pochi μm) che costituirà il dielettrico del futuro condensatore. Lo spessore estremamente sottile del dielettrico consente una miniaturizzazione che non sarebbe possibile con altre tecniche.

Lo strato di ossido deve essere mantenuto e continuamente rigenerato durante il funzionamento del condensatore; per questa ragione il condensatore elettrolitico contiene fra le armature un **elettrolita**, e l'**armatura formata dal foglio ossidato viene contrassegnata col segno +**. Quando un condensatore elettrolitico è inserito in un circuito è estremamente importante che il potenziale del terminale contrassegnato col + sia maggiore del potenziale dell'altro terminale. Per questa ragione si dice che il condensatore elettrolitico è **polarizzato**.

Esplosione

Se esso viene collegato in modo errato si produce il fenomeno inverso a quello che ha prodotto la formazione dello strato di ossido e il processo di elettrolisi produce l'eliminazione dell'ossido. Questo processo è accompagnato da un forte passaggio di corrente e, prima che si formi l'ossido sull'altra armatura, si ha la distruzione del condensatore. La distruzione avviene perché l'elevata corrente che circola produce, per effetto Joule, un forte riscaldamento dell'elettrolita, il quale si dilata fino a rompere il contenitore. Spesso si ha l'esplosione del componente. I condensatori elettrolitici in alluminio vengono realizzati disponendo un foglio di alluminio ossidato parallelamente a uno non ossidato e alternando i due fogli di alluminio con due fogli di carta impregnata di elettrolita (acido borico, H_2BO_3), come si vede in **figura 12b**. Ai due fogli di alluminio vengono saldate due linguette di conduttore. Il tutto viene poi arrotolato in modo da formare un cilindro e lasciando sporgere le due linguette a cui verranno saldati i due terminali, come si vede nella **figura 12c**. Successivamente il tutto viene racchiuso e sigillato in un contenitore di alluminio.

Figura 12
Formazione dell'ossido (a); geometria del condensatore elettrolitico in alluminio (b); avvolgimento dei fogli (c)

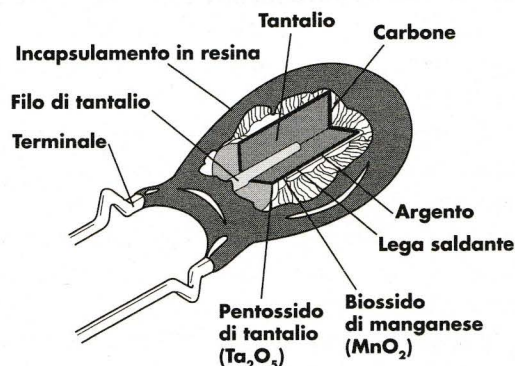


I **condensatori elettrolitici** al tantalio utilizzano come conduttore per le armature il tantalio e come dielettrico il suo ossido Ta_2O_5 .

Il principio di funzionamento è simile a quello dei condensatori elettrolitici a fogli di alluminio.

Il tantalio è un materiale che viene prodotto per sinterizzazione e presenta una struttura estremamente porosa. I condensatori al tantalio vengono spesso realizzati mediante due fogli di tantalio utilizzando la stessa tecnica vista per quelli a foglio di alluminio. Tuttavia, sfruttando l'elevata porosità ottenibile con la sinterizzazione, è possibile realizzarli in altre forme geometriche di cui le più frequenti sono: a *cilindro a goccia* e a *parallelepipedo*. Nella **figura 13** è riportata la geometria costruttiva di un condensatore elettrolitico a goccia.

Figura 13
Condensatore elettrolitico a goccia



Condensatori elettrolitici in corrente alternata

I condensatori elettrolitici coprono una gamma di valori che va da $1\ \mu\text{F}$ a $100\ \text{mF}$, hanno tensioni nominali basse (inferiori a $100\ \text{V}$) e resistenza di isolamento bassa, a causa del piccolo spessore del dielettrico. Essendo polarizzati, normalmente non vengono utilizzati nei circuiti a corrente alternata. Tuttavia, in caso di necessità, è possibile utilizzarli anche in corrente alternata disponendone due in serie ma in contrapposizione, in modo da collegare i due “+” oppure i due “-” come indicato nella figura 14.

Figura 14
Condensatori elettrolitici non polarizzati



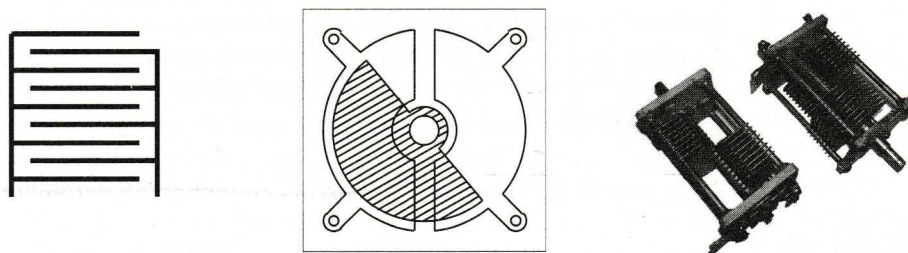
8 Condensatori variabili

I **condensatori variabili** utilizzano come dielettrico l'aria; sono formati da lamine di alluminio disposte parallelamente secondo una struttura a libro e collegate fra loro in modo alternato. In questo modo si realizzano tanti condensatori collegati in parallelo quante sono le lamine di alluminio meno una. Dei due gruppi di armature uno è fisso, mentre l'altro può muoversi, consentendo, così, di variare la superficie con cui le armature si guardano. In questo modo è possibile variare il valore della capacità, poiché essa è proporzionale alla suddetta superficie. Normalmente il movimento delle armature mobili avviene per rotazione intorno a un albero.

Variazione di capacità

La legge di variazione della capacità in funzione dell'angolo di rotazione può essere di tipo lineare, quadratica o esponenziale. Le applicazioni più frequenti sono: accordo di circuiti LC, compensazione di capacità (trimmer capacitivi) e nella taratura dei circuiti. Nella figura 15 sono riportate le forme geometriche di alcuni condensatori variabili.

Figura 15
Condensatori variabili



▶ TEST DI RIEPILOGO

- 1 Perché un condensatore può essere considerato un serbatoio di carica?
- 2 Da che cosa dipende la tensione nominale di un condensatore?
- 3 Quando un condensatore è collegato a un generatore ideale di corrente, come varia nel tempo la sua tensione?
- 4 Un condensatore da 2200 nF è collegato a un generatore reale di tensione con tensione a vuoto di 100 V e resistenza interna da 120 Ω . Quanto tempo impiega il condensatore ad assumere la tensione di 99 V partendo da scarico?
- 5 L'impedenza del condensatore aumenta oppure diminuisce con l'aumentare della frequenza?
- 6 Perché lo sfasamento fra tensione e corrente in un condensatore reale è inferiore a 90°?
- 7 Un condensatore non consente il passaggio di corrente perché fra le due armature è interposto un isolante. Quale significato ha la corrente I_C associata a un condensatore?
- 8 Fra due condensatori con fattore di dissipazione differente qual è il migliore?
- 9 I condensatori ceramici sono suddivisi in tre classi; a quale classe appartengono i condensatori più stabili in temperatura?
- 10 Perché i condensatori elettrolitici sono polarizzati?
- 11 Come si può fare per utilizzare i condensatori elettrolitici anche in corrente alternata?
- 12 Perché i condensatori elettrolitici in alluminio sono considerati condensatori piani pur essendo di forma cilindrica?
- 13 Quale tipo di dielettrico è utilizzato nei condensatori variabili?

Esercizi

▶ ESERCIZI SVOLTI

- 1** Ricavare quanto tempo impiega un condensatore, durante un transitorio, a variare la sua tensione del 99% della variazione complessiva.

Soluzione

Utilizzando la formula **3** possiamo ricavare quanto segue:

$$V_C(t) = V_f + (V_i - V_f) \cdot e^{-t/\tau}, \text{ da cui si ottiene: } V_C(t) - V_f = (V_i - V_f) \cdot e^{-t/\tau}$$

$$\text{e quindi: } \frac{V_f - V_C(t)}{V_f - V_i} = e^{-t/\tau}$$

Quando V_C subisce una variazione del 99%, il numeratore diventa l'1% del denominatore. Sostituendo, otteniamo: $0,01 = e^{-t_s/\tau}$, in cui t_s è il tempo necessario per la variazione del 99%.

Applicando il logaritmo naturale si ottiene: $\ln 0,01 = -\frac{t_s}{\tau}$, da cui si può ricavare:

$$t_s = -\tau \cdot \ln 0,01, \text{ ossia } t_s = 4,6 \cdot \tau$$

- 2** Un condensatore da 100 nF ha un fattore di dissipazione $\tan \delta = 0,12$. Ricavare lo sfasamento fra tensione e corrente.

Soluzione

$$\delta = \arctg 0,12 = 6,84^\circ$$

$$\varphi = 90^\circ - 6,84^\circ = 83,16^\circ = 83^\circ 10'$$

- 3** Un condensatore da 10 pF con resistenza di isolamento $R_p = 3 \cdot 10^{10} \Omega$ è sottoposto a un segnale sinusoidale con frequenza $f = 100$ Hz. Ricavare lo sfasamento fra tensione e corrente.

Soluzione

Trascurando il contributo della resistenza e della induttanza serie, il condensatore è equivalente a un circuito formato da una capacità C in parallelo a R_p :

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{628 \cdot 10 \cdot 10^{-12}} = 159 \cdot 10^6$$

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_X} = \frac{V_C / R_p}{V_C / X_C} = \frac{X_C}{R_p} = \frac{159 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^{10}} = 0,0053$$

$$\delta = \arctg 0,0053 = 0,3^\circ = 18'16''$$

- 4** Un condensatore da 2,2 μF ha un coefficiente di temperatura $T_C = 200 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. Utilizzando come temperatura di riferimento 25°C , calcolare il valore della capacità alla temperatura di 80°C .

Soluzione

$$C = C_0 [1 + T_C \cdot (T - T_0)] = 2,2 \cdot 10^{-6} [1 + 200 \cdot 10^{-6} (80 - 25)] = 2,224 \mu\text{F}$$