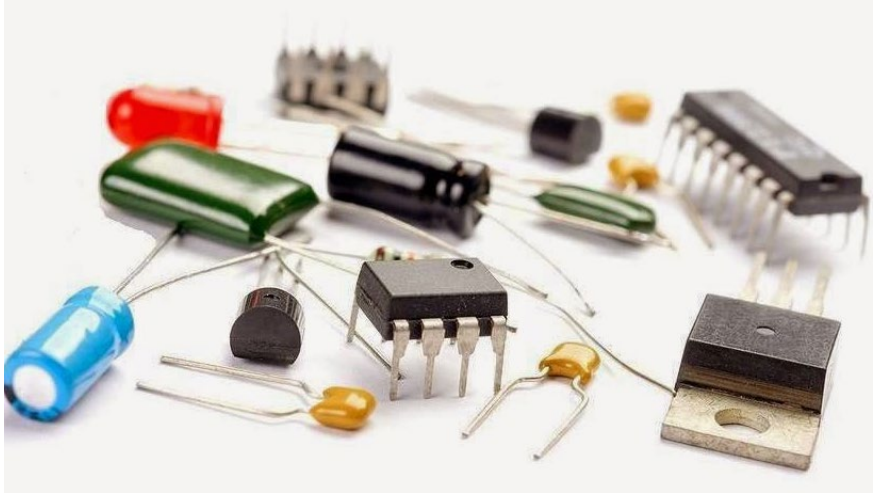
ELEMENTI DI CIRCUITO REALI

Marco Panareo



Generalità

- Per ragioni di carattere costruttivo i componenti che costituiscono i circuiti elettrici reali non risultano caratterizzati dal solo parametro principale per il quale sono inseriti nel circuito stesso, ma presentano delle proprietà resistive e reattive indesiderate che vengono generalmente indicate come *parametri parassiti*.
- L'effetto di tali parametri altera il comportamento dei componenti determinandone uno scostamento da quello ideale e solitamente il loro effetto è tanto più manifesto quanto più è elevata la frequenza alla quale opera il componente.

Generalità

- Per tenere conto di tale effetto nell’ambito dello studio di un circuito, il componente reale viene descritto attraverso una rete equivalente realizzata con componenti ideali. Le reti equivalenti vengono sviluppate in base a considerazioni di carattere fisico, in relazione ai fenomeni che originano i parametri parassiti stessi.
- Questo approccio comporta naturalmente una complicazione nell’analisi dei circuiti, per cui la tendenza è quella di sviluppare reti equivalenti semplificate che sono in grado di schematizzare il comportamento del componente reale in intervalli limitati di frequenze delle eccitazioni cui è soggetto.
- Tali reti equivalenti sono costituite, in genere, dalla serie o dal parallelo di una resistenza e una reattanza, induttiva o capacitiva

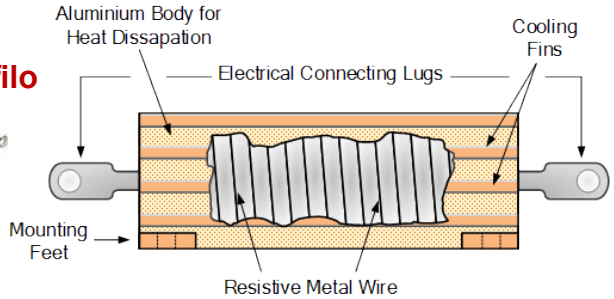
Resistore – tipi

- I resistori sono costituiti da
  - un supporto isolante che sostiene l'elemento resistivo, generalmente realizzato in ceramica, vetro o materiale plastico,
  - un elemento resistivo attraverso il quale, per altro, viene distinto il tipo di resistore,
  - un rivestimento per la protezione dell'elemento resistivo
  - i terminali per il collegamento al circuito che ospita tale componente.
- A seconda dell'elemento resistivo adoperato, si possono distinguere tre classi di resistori:
  - *resistori a filo*,
  - *resistori ad impasto*
  - *resistori a strato*.

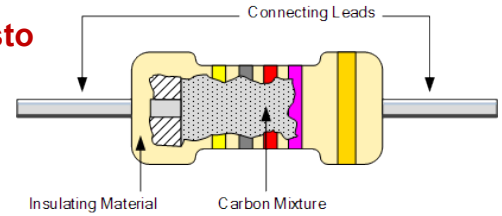
Resistore – tipi

- I *resistori a filo* hanno come elemento resistivo un filo metallico, generalmente realizzato con leghe *Ni-Cu*, *Ni-Cr-Fe* o *Ni-Cr-Al* avvolto su un supporto isolante piatto o cilindrico. Queste leghe sono definite in maniera da mantenere pressoché invariata la resistività al variare della temperatura
- Nei *resistori a impasto* l'elemento resistivo è costituito da polvere di carbone o grafite mescolata con resine sintetiche e materiali inerti come il talco, in proporzioni diverse in relazione al valore resistivo da ottenere.
- Infine l'elemento resistivo dei *resistori a strato* consiste di una sottile pellicola di materiale conduttore, depositata su un supporto realizzato generalmente in ceramica; i principali tipi di materiale di deposito sono la polvere di carbone o di grafite ed i film metallici o di ossidi metallici.
- Mentre nei resistori a impasto e a strato i valori dei parametri parassiti reattivi sono spesso trascurabili, nel caso dei resistori a filo risultano solitamente piuttosto elevati.

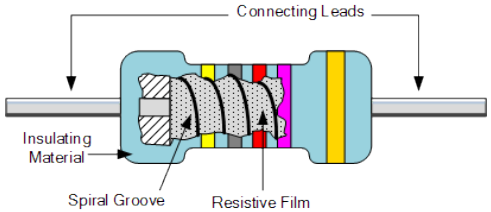
resistore a filo



resistore a impasto

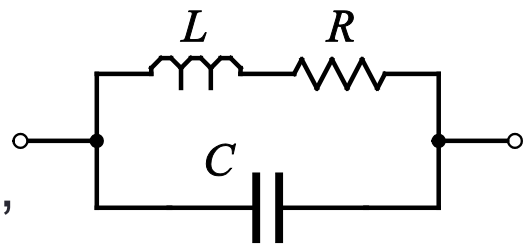


resistore a strato



Resistore – circuito equivalente

- I fenomeni che hanno luogo all'interno del resistore richiedono che occorra associare a tale componente una certa capacità ed una certa induttanza attraverso lo schema di figura, valido fino a frequenze non eccessivamente elevate.



- In tale circuito equivalente la capacità C rappresenta sia la capacità diretta tra i terminali che quella distribuita nel componente mentre l'induttanza L è sia quella dell'elemento resistivo che dei terminali.
- L'impedenza compresa tra i rami del resistore vale pertanto:

$$\overline{Z} = \frac{1}{\dfrac{1}{R + j\omega L} + j\omega C} = \frac{R + j\omega L}{1 + j\omega RC - \omega^2 LC}$$

Resistore – circuito equivalente

- Nella pratica il resistore viene adoperato nell'intervallo di frequenze tale che risulti $\omega L \ll R$ e $1/(\omega C) \gg R$, pertanto in tale intervallo risulterà $\omega^2 LC \ll 1$ e la relazione precedente si approssimerà come:

$$\bar{Z} = \frac{R + j\omega L}{1 + j\omega RC - \omega^2 LC} \approx \frac{R + j\omega L}{1 + j\omega RC} = \frac{R + \omega^2 LRC + j\omega\left(L - R^2 C\right)}{1 + \left(\omega RC\right)^2}$$

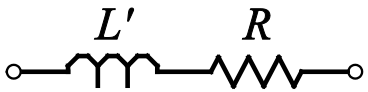
- Inoltre, risultando $\omega RC \ll 1$ si ha:

$$\bar{Z} \approx R\left(1 + \omega^2 LC\right) + j\omega\left(L - R^2 C\right) \approx R + j\omega\left(L - R^2 C\right)$$

- che corrisponde alla rete semplificata di figura, in cui:

$$L' \equiv L - R^2 C$$

- Se $L > R^2 C$ la reattanza della rete è induttiva, se $L < R^2 C$ la reattanza è capacitiva.



Resistore – circuito equivalente

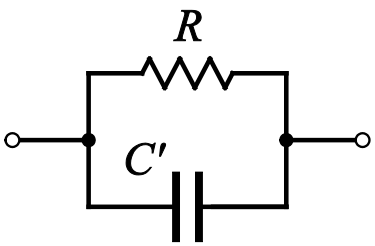
- In modo analogo si può sviluppare l'espressione dell'ammettenza della rete considerata; cioè, valutando l'inverso di $\bar{Z}$, si ha:

$$\bar{Y} = \frac{1}{\bar{Z}} = \frac{1}{R + j\omega L} + j\omega C = \frac{R - j\omega L}{R^2 - \omega^2 L^2} + j\omega C =$$

$$= \frac{R}{R^2 - \omega^2 L^2} + j\omega\left(C - \frac{L}{R^2 - \omega^2 L^2}\right).$$

- D'altra parte, siccome $\omega L \ll R$, si ha:

$$\bar{Y} \approx \frac{1}{R} + j\omega\left(C - \frac{L}{R^2}\right),$$

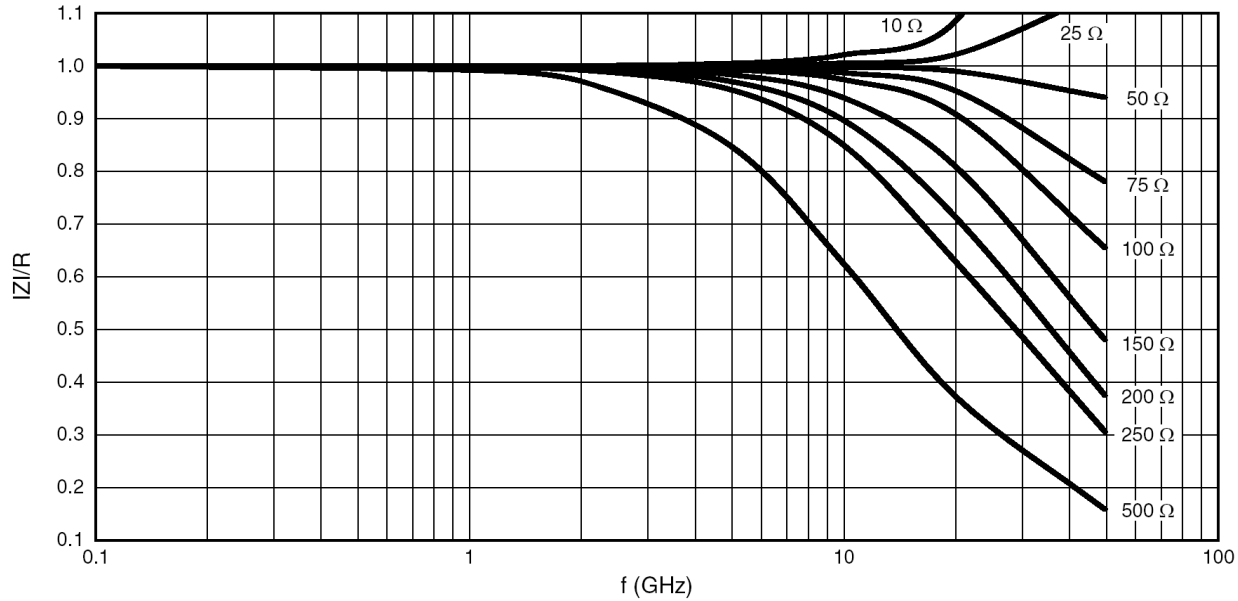


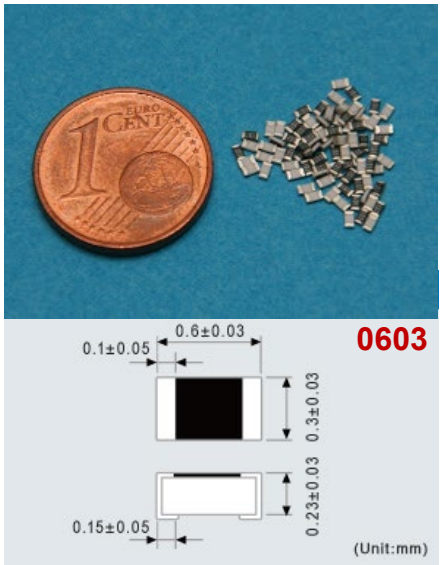
- che corrisponde alla rete semplificata di figura, in cui:

$$C' \equiv C - \frac{L}{R^2}.$$

Resistore – circuito equivalente

- I costruttori di resistori, in genere, descrivono il comportamento dei propri componenti dal punto di vista dei parametri parassiti rappresentando la variazione del rapporto $|Z|/R$ al variare della frequenza.





Andamento del rapporto $|Z|/R$ al variare della frequenza per resistori a film metallico a montaggio superficiale di formato 0603 di differenti valori (VISHAY).

High Frequency 50 GHz Thin Film Chip Resistor

CH02016 (flip chip) | CH0402 (flip chip) | CH0603 (flip chip)

DESIGN SUPPORT TOOLS click logo to get started

3D Models Available

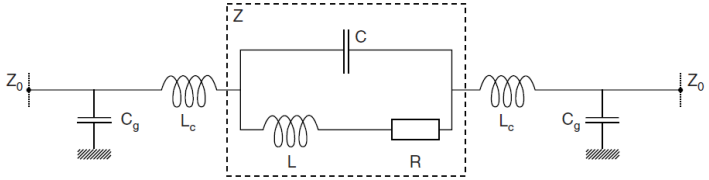
Those miniaturized components are designed in such a way that their internal reactance is very small. When correctly mounted and utilized, they function as almost pure resistors on a very large range of frequency, up to 50 GHz.

FEATURES

- Operating frequency 50 GHz
- Thin film microwave resistors
- Flip chip, wraparound or one face termination
- Small size, down to 20 mils by 16 mils
- Edged trimmed block resistors
- Pure alumina substrate (99.5 %)
- Ohmic range: 10R to 500R
- Design kits available
- Small internal reactance (LC down to 1×10^{-24})
- Tolerance 1 %, 2 %, 5 %, 10 %
- TCR: 100 ppm/°C in (-55 °C, +155 °C) temperature range
- TCR: 50 ppm/°C available upon request for 10 Ω to150 Ω ohmic range
- Material categorization: for definitions of compliance please see www.vishay.com/doc?99912

Pb-free
RoHS COMPLIANT
HALOGEN FREE
GREEN (5-2008)

TYPICAL HIGH FREQUENCY PERFORMANCE ELECTRICAL MODEL



C	Internal shunt capacitance
L	Internal inductance
R	Resistance
Z	Internal impedance (R, L, C)
L_c	External connection inductance
C_g	External capacitance to ground

The complex impedance of the chip resistor is given by the following equations:

$$Z = \frac{R + j\omega(L - R^2C - L^2C\omega^2)}{1 + C[(R^2C - 2L)\omega^2 + L^2C\omega^4]}$$

$$\frac{[Z]}{R} = \frac{1}{1 + C[(R^2C - 2L)\omega^2 + L^2C\omega^4]} \times \sqrt{1 + \left[\frac{\omega(L - R^2C - L^2C\omega^2)}{R}\right]^2}$$

$$\theta = \tan^{-1}\frac{\omega(L - R^2C - L^2C\omega^2)}{R}$$

Notes

- $\omega = 2 \times \pi \times f$
- f: Frequency

R, L and C are relevant to the chip resistor itself.
L_c and C_g also depend on the way the chip resistor is mounted.
It is important to notice that after assembly the external reactance of L_c and C_g will be combined to internal reactance of L and C. This combination can upgrade or downgrade the HF behavior of the component.
This is why we are displaying three sets of data:

- $\frac{[Z]}{R}$ versus frequency curves which aim to show at a glance the intrinsic HF performance of a given chip resistor
- $\frac{[Z_{total}]}{R}$ versus frequency curves which aim to show the behavior of the chip resistor when mounted

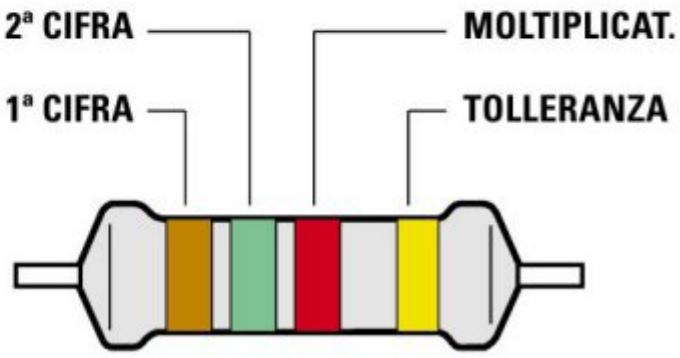
These lines are terminated with adapted source and load impedance respectively Z_s and Z_l with $Z_0 = Z_L = Z_s$ (for others configurations please consult us).

Serie	*E6* (20%)	*E12* (10%)	*E24* (5%)	*E48* (2%)	*E96* (1%)	*E192* (0,5%)
Valori	10 15 22 33 47 68	10 12 15 18 22 27 33 39 47 56 68 82	10 11 12 13 15 16 18 20 22 24 27 30 33 36 39 43 47 51 56 62 68 75 82 91	100 105 110 115 121 127 133 140 147 154 162 169 178 187 196 205 215 226 237 249 261 274 287 301 316 332 348 365 383 402 422 442 464 487 511 536 562 590 619 649 681 715 750 787 825 866 909 953	100 102 105 107 110 113 115 118 121 124 127 130 133 137 140 143 147 150 154 158 162 165 169 174 178 182 187 191 196 200 205 210 215 221 226 232 237 243 249 255 261 267 274 280 287 294 301 309 316 324 332 340 348 357 365 374 383 392 402 412 422 432 442 453 464 475 487 499 511 523 536 549 562 576 590 604 619 634 649 665 681 698 715 732 750 768 787 806 825 845 866 887 909 931 953 976	100 101 102 104 105 106 107 109 110 111 113 114 115 117 118 120 121 123 124 126 127 129 130 132 133 135 137 138 140 142 143 145 147 149 150 152 154 156 158 160 162 164 165 167 169 172 174 176 178 180 182 184 187 189 191 193 196 198 200 203 205 208 210 213 215 218 221 223 226 229 232 234 237 240 243 246 249 252 255 258 261 264 267 271 274 277 280 284 287 291 294 298 301 305 309 312 316 320 324 328 332 336 340 344 348 352 357 361 365 370 374 379 383 388 392 397 402 407 412 417 422 427 432 437 442 448 453 459 464 470 475 481 487 493 499 505 511 517 523 530 536 542 549 556 562 569 576 583 590 597 604 612 619 626 634 642 649 657 665 673 681 690 698 706 715 723 732 741 750 759 768 777 787 796 806 816 825 835 845 856 866 876 887 898 909 919 931 942 953 965 976 988

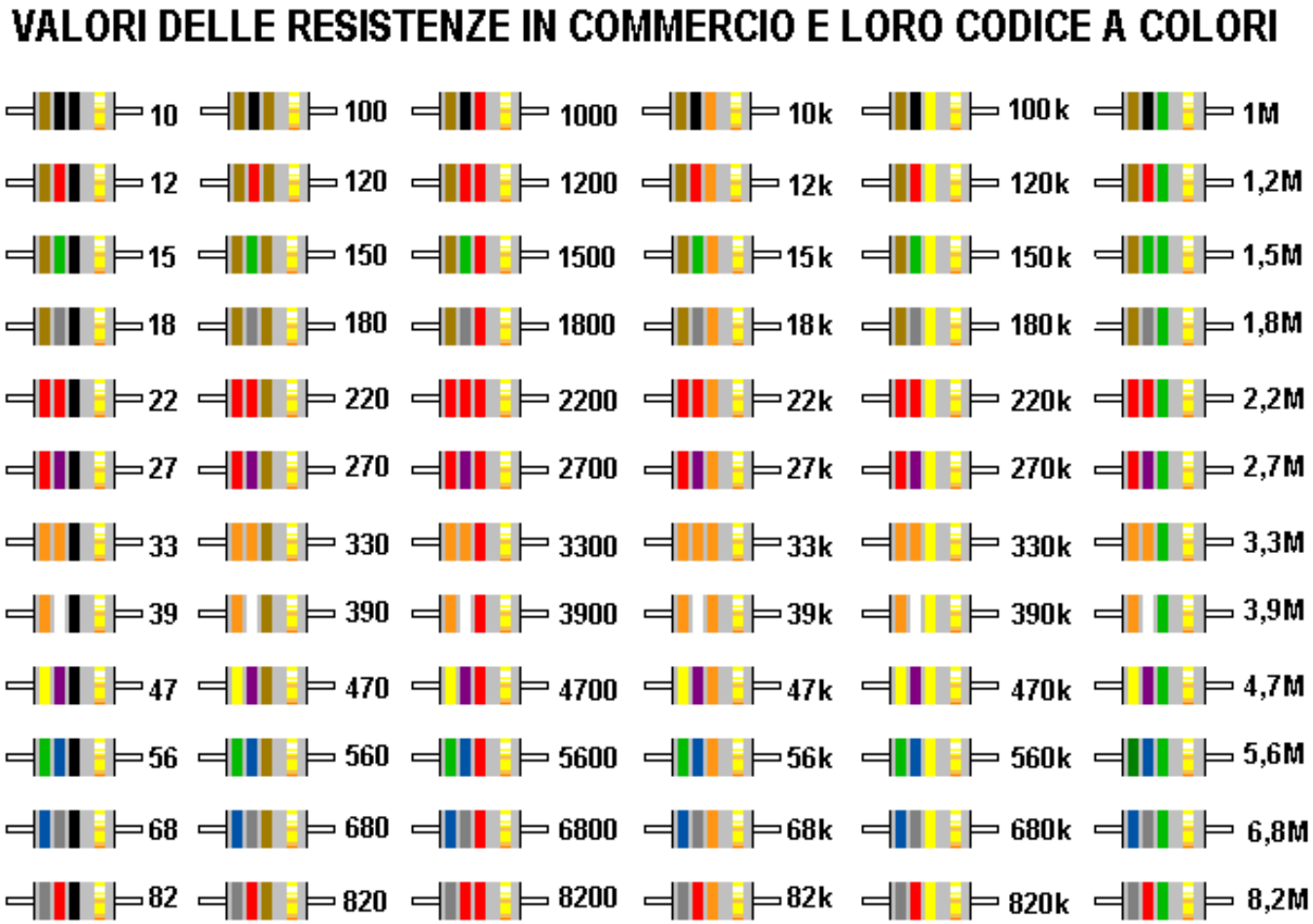
Codice dei colori per le resistenze

- Nel caso in cui i resistori non abbiano i valori numerici stampati su di esso, i costruttori di componentistica elettronica (*Electronic Industries Alliance*, EIA) hanno stabilito un codice che usa i colori per etichettare i resistori

	1ª CIFRA	2ª CIFRA	MOLTIPLICAT.	TOLLERANZA
NERO	= = = =	0	x 1	10 % ARGENTO
MARRONE	1	1	x 10	5 % ORO
ROSSO	2	2	x 100	
ARANCIONE	3	3	x 1.000	
GIALLO	4	4	x 10.000	
VERDE	5	5	x 100.000	
AZZURRO	6	6	x 1.000.000	
VIOLA	7	7	ORO : 10	
GRIGIO	8	8		
BIANCO	9	9		

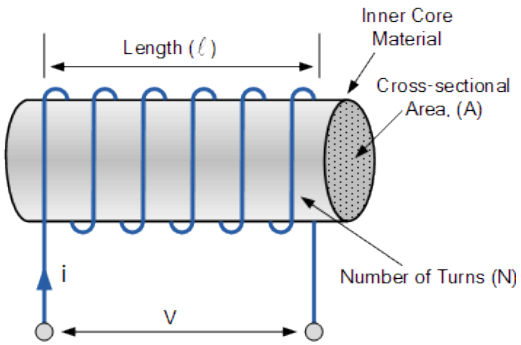


Colori per la serie *E12*

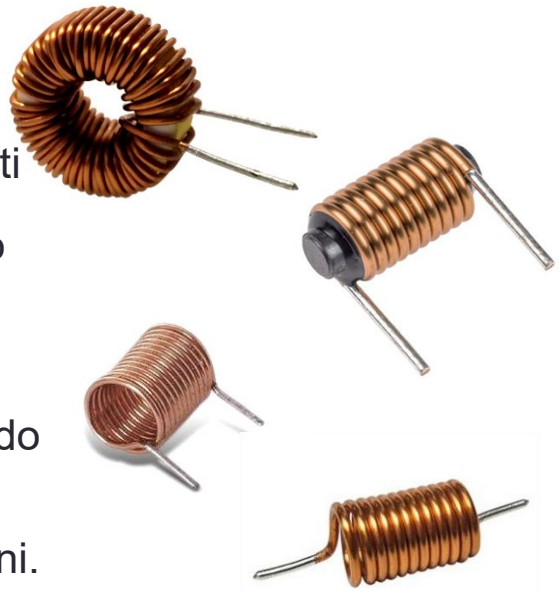


I valori sono espressi in ohm
La lettera "k" sta per 1000 (esempio: 120k = 120.000 ohm)
La lettera "M" sta per 1.000.000 (esempio: 1,2M = 1,2 milioni di ohm)

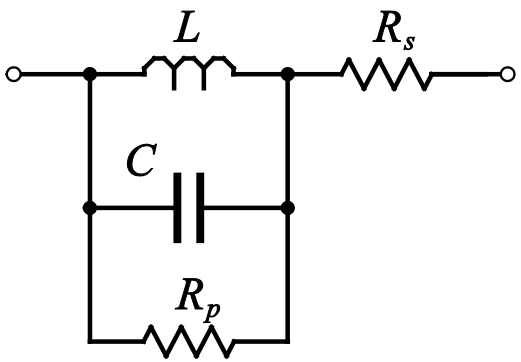
Induttore – tipi



- Per realizzare un opportuno valore di induttanza nel minore spazio possibile si avvolge un filo conduttore isolato a bassa resistenza in modo da realizzare un avvolgimento, denominato comunemente *bobina*.
- In genere, per ridurre le dimensioni geometriche della bobina a parità di induttanza, l'avvolgimento viene realizzato su un opportuno supporto ferromagnetico.
- Le bobine vengono pertanto distinte in relazione al supporto sul quale sono avvolte, cioè su un supporto ferromagnetico o su un supporto non ferromagnetico.
  - Le bobine avvolte su nuclei ferromagnetici, sebbene più compatte delle altre, presentano elevati valori dei componenti parassiti ed inoltre, per correnti attraverso l'avvolgimento tali da determinare campi magnetici al di fuori del tratto rettilineo della caratteristica di magnetizzazione del materiale che costituisce il nucleo, manifestano una marcata dipendenza dell'induttanza dalla corrente che percorre l'avvolgimento.
  - Le bobine avvolte su supporti non ferromagnetici, pur essendo caratterizzate da piccoli valori dei parametri parassiti, non consentono di ottenere elevati valori di induttanza e presentano una marcata sensibilità ai campi magnetici esterni.



Induttore – circuito equivalente



- La caduta di tensione lungo il filo conduttore che costituisce la bobina è rappresentata attraverso una resistenza R_s disposta in serie all'induttore;
- inoltre, per effetto delle differenze di potenziale tra le singole spire che costituiscono la bobina e tra esse e i conduttori limitrofi, la bobina è sede di un campo elettrico il cui effetto è schematizzabile attraverso una capacità C posta in parallelo all'induttore;
- Infine, le perdite dovute all'imperfetto isolamento tra le spire della bobina, le perdite dovute alla correnti di Foucault ed ai fenomeni di isteresi sono schematizzate attraverso una resistenza R_p disposta in parallelo
- L'impedenza compresa tra i rami dell'induttore vale pertanto:

$$\bar{Z} = R_s + \frac{1}{\frac{1}{R_p} + j\omega C + \frac{1}{j\omega L}} = R_s + \frac{j\omega L R_p}{R_p - \omega^2 R_p L C + j\omega L}$$

Induttore – circuito equivalente

- Sviluppando l'espressione precedente, si ottiene:

$$\overline{Z} = R_s + \frac{j\omega L R_p}{R_p - \omega^2 R_p LC + j\omega L} = R_s + R_p \frac{\omega^2 L^2 + j\omega L R_p \left(1 - \omega^2 LC\right)}{R_p{}^2 \left(1 - \omega^2 LC\right) + \omega^2 L^2}$$

- Pertanto è possibile identificare una pulsazione di risonanza data dalla relazione $1/\sqrt{LC}$, in corrispondenza della quale la rete agisce come una resistenza di valore pari alla somma $R_s + R_p$.
- Per pulsazioni superiori a quella di risonanza prevalgono gli effetti capacitivi della rete ed il componente assume un comportamento resistivo-capacitivo.
- Per tale motivo i costruttori suggeriscono l'impiego degli induttori a frequenze inferiori di almeno una decina di volte rispetto a tale frequenza di risonanza.

Induttore – circuito equivalente

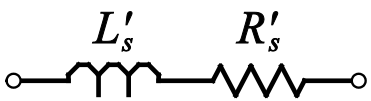
- A basse frequenze, per $\omega \ll 1/\sqrt{LC}$, l'espressione dell'impedenza della bobina si approssima come:

$$\bar{Z} = R_s + R_p \frac{\omega^2 L^2 + j\omega L R_p \left(1 - \omega^2 LC\right)}{R_p{}^2 \left(1 - \omega^2 LC\right) + \omega^2 L^2} \approx$$

$$\approx R_s + R_p \frac{\omega^2 L^2 + j\omega L R_p}{R_p{}^2 + \omega^2 L^2} = R_s + \frac{\omega^2 L^2 R_p}{R_p{}^2 + \omega^2 L^2} + j \frac{\omega L R_p{}^2}{R_p{}^2 + \omega^2 L^2}$$

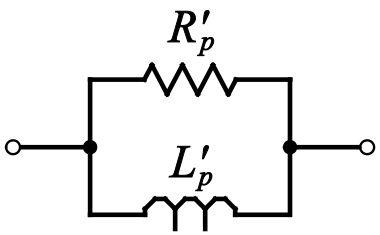
- e tale impedenza presenta un comportamento resistivo-induttivo, in cui entrambe le componenti, resistiva e reattiva, dipendono dalla frequenza in maniera non lineare.

Induttore – circuito equivalente



- Alle basse frequenze si preferisce adoperare una schematizzazione semplificata dell'induttore che comprende una sola resistenza disposta in serie o in parallelo all'induttanza.
- In particolare, il circuito *serie* presenta un'impedenza:

$$\overline{Z} = R'_s + j\omega L'_s$$



- e il circuito parallelo presenta una ammettenza:

$$\overline{Y} = \frac{1}{R'_p} + \frac{1}{j\omega L'_p}.$$

- Uguagliando l'inverso della prima relazione con la seconda, si ottiene l'identità:

$$\frac{R'_s - j\omega L'_s}{R'^2_s + \omega^2 L'^2_s} = \frac{1}{R'_p} + \frac{1}{j\omega L'_p}$$

- ed eguagliando le parti reali ed immaginarie, si ottengono le relazioni:

$$R'_p = R'_s\left(1 + Q^2\right),$$

$$L'_p = L'_s\left(1 + \frac{1}{Q^2}\right),$$

Induttore – circuito equivalente

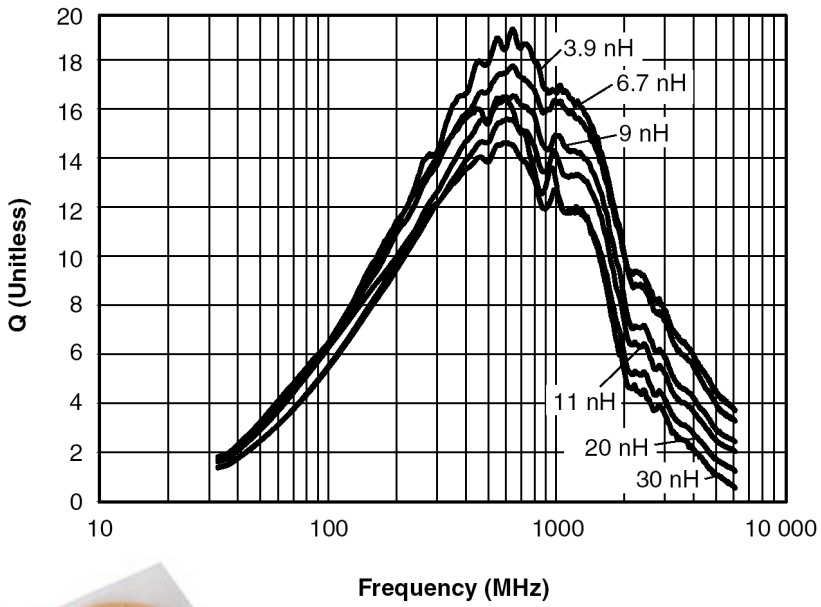
- dove Q è detto *fattore di qualità della bobina*, vale:

$$Q \equiv \frac{\omega L'_s}{R'_s}$$

- ed è pari alla tangente della fase dell'impedenza $\overline{Z}$. Dalle relazioni precedenti e dalla definizione di Q segue, inoltre, che:

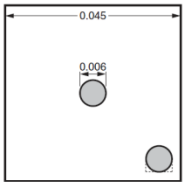
$$Q = \frac{R'_p}{\omega L'_p}.$$

- A causa dei diversi fenomeni fisici le resistenze R_s' e R_p', rappresentative delle perdite nella bobina, dipendono dalla frequenza in maniera piuttosto complicata e, di conseguenza, il fattore di merito della bobina è funzione della frequenza ma non linearmente, come potrebbe sembrare, a prima vista, dalla relazione precedente.



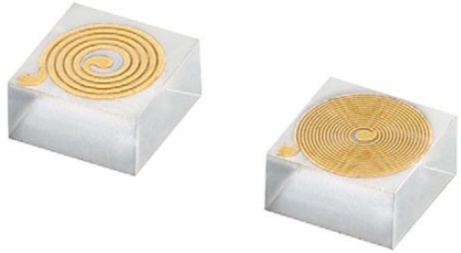
Andamento del fattore di qualità al variare della frequenza, per induttori a spirale su un supporto in quarzo di differenti valori (VISHAY)

DIMENSIONS in inches (millimeters)

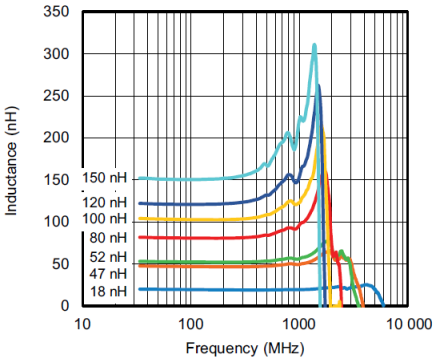


LENGTH	WIDTH	THICKNESS	BOND PAD DIAMETER
0.045 ± 0.002 (1.143 ± 0.051)	0.045 ± 0.002 (1.143 ± 0.051)	0.010 ± 0.001 (0.254 ± 0.0254)	0.006 (0.152)

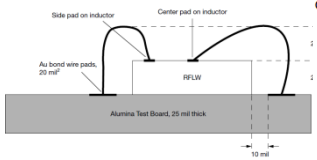
High Frequency Wire Bondable RF Spiral Inductor, 0.050" x 0.050"



RFLW series of thin film spiral inductors on quartz are designed for RF circuits that require wire bondable components. High precision equivalent circuit modeling enables accurate computer simulation of component performance. Measured S parameter files are also available upon request.



Inductance vs. Frequency



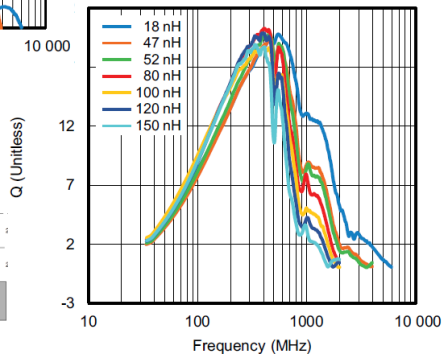
FEATURES

- High frequency
- Wire bond assembly
- Small size: 0.050" x 0.050" x 0.020"
- Low DCR, high Q
- Low parasitic capacitance, high SRF
- Equivalent circuit model enclosed
- S parameter files available for download
- Sample kit available
- Material categorization: for definitions of compliance please see www.vishay.com/doc?99912

RoHS COMPLIANT
HALOGEN FREE GREEN (5-2008)

APPLICATIONS

- RF choking for DC biasing
- RF tuning circuits
- Lumped element filters



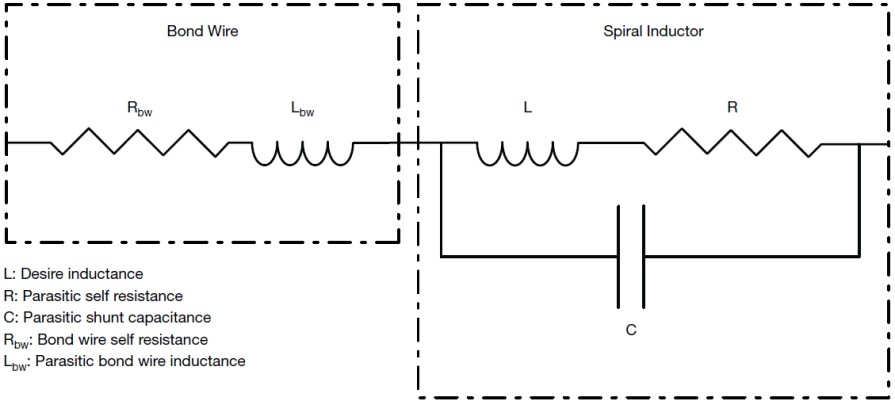
Quality Factor vs. Frequency

EQUIVALENT CIRCUIT

The inductor's spiral trace presents a substantial amount of series resistance, and the close spacing of spiral turns present measurable amounts of stray capacitance that interact with the inductive characteristics.

For accurate modeling of the RFLW component in-circuit performance, measured S parameter files are available upon request.

Another useful tool commonly used to model the behavior of electronic components at high frequency is the equivalent circuit model. While the equivalent circuit model accurately predicts the reactive part of the total impedance, it fails to determine the real part of the response at high frequency. This is due to the fact that the model does not include skin and proximity effects that significantly increase the real part of the impedance as the frequency rises.



L: Desire inductance
R: Parasitic self resistance
C: Parasitic shunt capacitance
R_{bw}: Bond wire self resistance
L_{bw}: Parasitic bond wire inductance

Equivalent Circuit Model

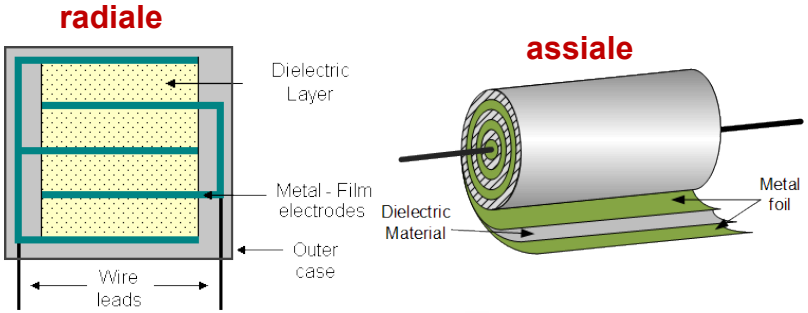
The equivalent circuit values are presented in the table below:

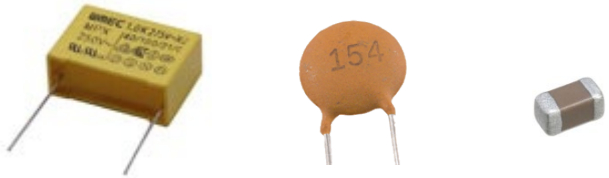
EQUIVALENT CIRCUIT MODEL - TYPICAL VALUES

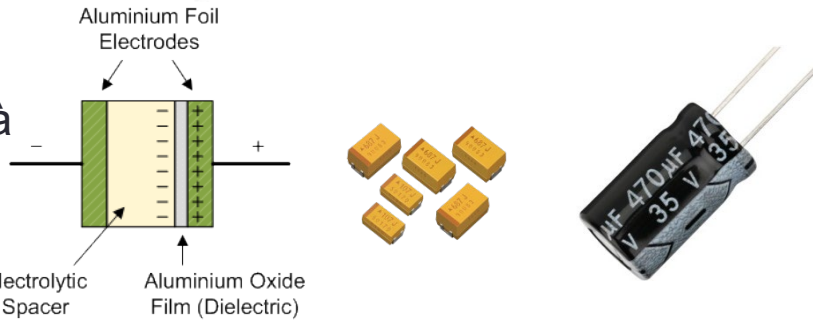
INDUCTANCE (nH) L	DCR (Ω) R	SHUNT CAPACITANCE (fF) C	L_{bw} (nH)	R_{bw} (1) (Ω)
18	1.0	38	1.4	0.1
47	2.8	37	1.4	0.1
52	3.0	39	1.4	0.1
80	3.9	52	1.4	0.1
100	4.7	65	1.4	0.1
120	6.3	68	1.4	0.1
150	7.7	67	1.4	0.1

Condensatore – tipi

- I condensatori sono realizzati a partire da fogli metallici, generalmente di alluminio, separati da un dielettrico isolante.
  - Se il dielettrico è gassoso, come l'aria, le armature sono generalmente piane, di conseguenza non è possibile ottenere elevati valori capacitivi se non al costo di realizzare condensatori voluminosi; nondimeno i condensatori in aria presentano piccoli valori dei componenti parassiti.
  - Se il dielettrico è costituito da un film di materiale plastico, come il polistirolo o il polietilene tereftalato (PET), o di ceramica, è possibile ottenere grandi valori di capacità in piccole dimensioni con valori relativamente bassi dei parametri parassiti.
  - Infine, adoperando elettroliti ad alta viscosità si realizzano condensatori con capacità molto grandi ma polarizzati e con elevati valori dei parametri parassiti.

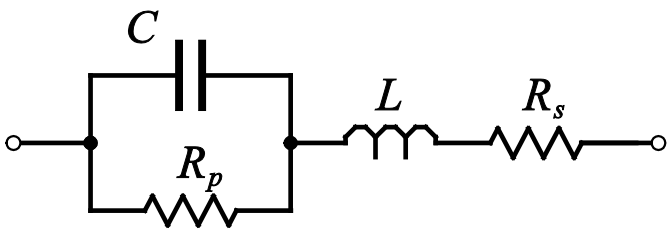






Condensatore – circuito equivalente

- Il condensatore reale viene schematizzato attraverso una resistenza R_p disposta in parallelo al componente, che descrive il flusso di cariche attraverso il dielettrico non perfettamente isolante, una resistenza R_s disposta in serie al condensatore che rappresenta le perdite per effetto Joule lungo le armature e lungo i terminali e una induttanza L che schematizza gli effetti autoinduttivi dovuti sia alle armature che ai terminali del condensatore.



- L'impedenza ai capi del condensatore così schematizzato vale, pertanto:

$$\overline{Z} = R_s + j\omega L + \frac{1}{\frac{1}{R_p} + j\omega C} = R_s + j\omega L + \frac{R_p - j\omega R_p{}^2 C}{1 + \omega^2 R_p{}^2 C^2}$$

- da cui segue:

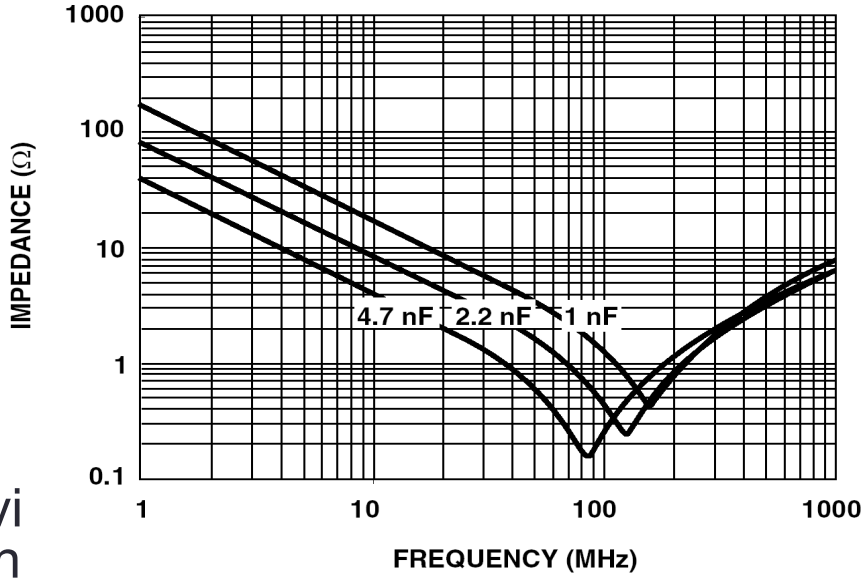
$$\overline{Z} = R_s + \frac{R_p}{1 + \omega^2 R_p{}^2 C^2} - j\omega \frac{R_p{}^2 C - L\left(1 + \omega^2 R_p{}^2 C^2\right)}{1 + \omega^2 R_p{}^2 C^2}$$

Condensatore – circuito equivalente

- Pertanto, è possibile identificare una pulsazione di risonanza ω_0 pari a

$$\omega_0 \equiv \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{1}{R_p{}^2 C^2}}$$

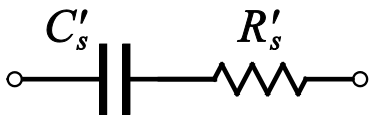
- in corrispondenza della quale la rete agisce come una resistenza di valore pari alla somma $R_s + L/(R_p C)$.
- Per pulsazioni superiori a quella di risonanza prevalgono gli effetti induttivi della rete ed il componente assume un comportamento resistivo-induttivo.
- Naturalmente il condensatore viene fatto funzionare a frequenze molto inferiori a quella di risonanza, per le quali è prevalente la reattanza capacitiva sugli altri parametri parassiti.



Andamento dell'impedenza al variare della frequenza per condensatori a montaggio superficiale per applicazioni di media frequenza (VISHAY).

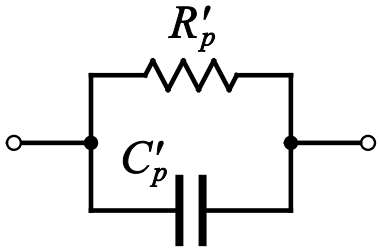
Condensatore – circuito equivalente

- Alle basse frequenze si preferisce adoperare una schematizzazione semplificata del condensatore che comprende una sola resistenza disposta o in serie o in parallelo alla capacità, con parametri che possono essere determinati con un procedimento simile a quello adottato per l'induttore.



- In particolare, il circuito *serie* presenta un'impedenza:

$$\overline{Z} = R'_s + \frac{1}{j\omega C'_s}$$



- e, il circuito *parallelo*, presenta una ammettenza:

$$\overline{Y} = \frac{1}{R'_p} + j\omega C'_p \ .$$

- Uguagliando l'inverso della prima relazione con la seconda, si ottiene l'identità:

$$\frac{j\omega C'_s + \omega^2 R'_s C'^2_s}{1 + \omega^2 R'^2_s C'^2_s} = \frac{1}{R'_p} + j\omega C'_p \ .$$

Condensatore – circuito equivalente

- eguagliando le parti reali ed immaginarie nella relazione precedente, si ottengono le espressioni R_s' e C_p',

$$R'_p = R'_s\left(1+\frac{1}{\omega^2 R'^2_s C'^2_s}\right),$$

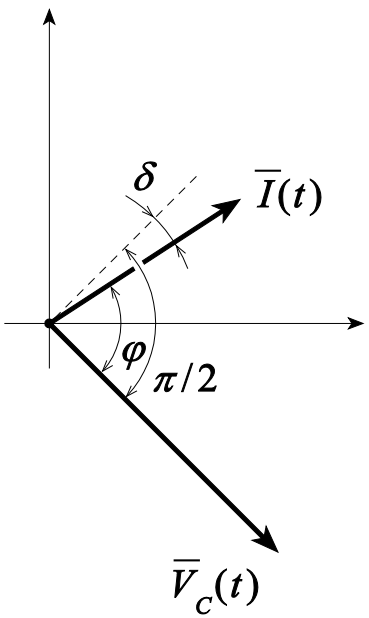
$$C'_p = C'_s\left(\frac{1}{1+\omega^2 R'^2_s C'^2_s}\right).$$

- Poiché risulta sempre $\omega R_s' C_s' \ll 1$, dalle relazioni precedenti si ha che $R_p' \gg R_s'$ e $C_p' \approx C_s' \approx C$;
- cioè, mentre il valore della capacità equivalente, C_p' o C_s', risulta praticamente indipendente dal tipo di rete equivalente scelta, il valore della resistenza parassita, R_p' o R_s', è notevolmente influenzato dalla scelta effettuata.

Condensatore – angolo di perdita

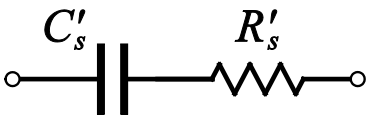
- Quando un condensatore ideale è percorso da una corrente sinusoidale, la tensione ai suoi capi risulta sfasata in ritardo di 90° rispetto alla corrente, pertanto la potenza attiva assorbita dal condensatore è nulla.
- Nella pratica, a causa dei parametri parassiti, ciò non si verifica ed il ritardo φ della tensione rispetto alla corrente risulta inferiore a 90°; la differenza:

$$\delta \equiv 90° - |\varphi|$$



- denominata *angolo di perdita*, è un parametro generalmente fornito dai costruttori di condensatori per specificare le caratteristiche di tali componenti.

Condensatore – angolo di perdita



- L'espressione dell'impedenza del circuito equivalente serie del condensatore può essere scritta come:

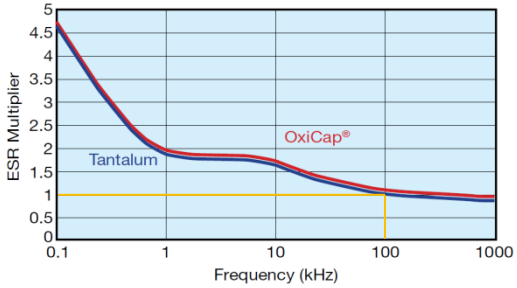
$$\bar{Z} = R_s' + \frac{1}{j\omega C_s'} = R_s' - j\frac{1}{\omega C_s'} = \sqrt{R_s'^2 + \frac{1}{\omega^2 C_s'^2}}\, e^{j\varphi}$$

- in cui

$$\tan\varphi = -\frac{1}{\omega R_s' C_s'}.$$

- Pertanto, siccome $C_s' \approx C$, risulta:

$$\tan\delta = \tan\left(90° - |\varphi|\right) = \frac{1}{|\tan\varphi|} = \omega R_s' C_s' \approx \omega R_s' C.$$

- In genere i costruttori di condensatori specificano o l'angolo di perdita δ oppure la resistenza R_s', spesso indicata con la sigla *ESR*, cioè *equivalent series resistance* del condensatore

AVX Part No.	Case Size	Capacitance (µF)	DF @ 120Hz (%)	ESR @ 100kHz (mΩ)
			6.3 Volt	
F910J226#AAAJ6	A	22	8	1250
F910J336#AAAJ6	A	33	8	1250
F910J476#AAAJ6	A	47	18	1250
F910J476#BAAJ6	B	47	6	500
F910J107#AAAJ6	A	100	35	1000
F910J107#BAAJ6	B	100	14	450