

I materiali magnetici

■ ■ 1 ■ ■ Generalità

In questa unità vengono esaminati i principali materiali utilizzati nella costruzione di apparecchiature elettroniche ed elettromeccaniche e attraverso l'analisi delle loro proprietà elettriche e magnetiche, ne vengono definiti dei possibili impieghi.

Resta inteso che, a prescindere dal tipo di classificazione che viene proposto, ogni materiale può trovare applicazione in diversi settori.

■ ■ 2 ■ ■ Proprietà elettriche

Al fine delle applicazioni elettroniche ed elettriche è importante conoscere come un materiale si comporta nei confronti delle sollecitazioni elettriche.

Le principali *caratteristiche elettriche* dei materiali sono:

- *resistività di massa e superficiale;*
- *coefficiente di temperatura;*
- *costante dielettrica;*
- *rigidità dielettrica;*
- *angolo di perdita;*
- *effetto pelle.*

Effetto pelle

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.

Se le dimensioni della sezione del conduttore sono molto grandi, la densità di corrente, per effetto pelle, varia esponenzialmente (figura 3) diminuendo dalla superficie verso l'interno secondo la relazione:

$$J = J_0 \cdot e^{-r/\delta}$$

4

dove J_0 è la densità della corrente alla superficie.

Figura 2 Effetto pelle

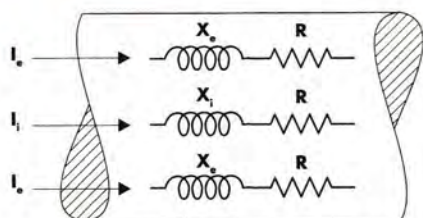
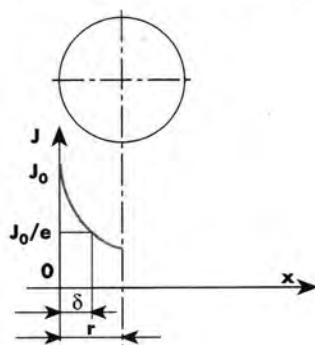


Figura 2

Variazione della densità di corrente a causa dell'effetto pelle



Profondità di penetrazione

La *profondità di penetrazione* è la distanza dalla superficie a cui la densità di corrente diventa J_0/e .

Per le proprietà degli esponenziali essa rappresenta lo spessore in cui circolerebbe una densità di corrente costante J_0 .

Tale valore dipende dalla resistività, dalla permeabilità del materiale e dalla frequenza della corrente secondo la relazione seguente:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}}$$

5

In particolare per il rame, essendo:

$$\mu \cong \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$$

6

$$\rho \cong 0,0172 + 0,0178 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

la precedente relazione diventa:

$$\delta \cong \frac{6,601 + 6,715 \sqrt{f}}{\sqrt{f}} 10^2 \text{ m}$$

Da tale relazione si ha che, per il rame, la profondità di penetrazione è uguale a circa 9,5 mm per correnti a frequenza industriale di 50 Hz, e di circa 67 μm per correnti a frequenza di 1 MHz.

Pertanto, nelle pratiche applicazioni in cui la frequenza di lavoro è molto elevata, si utilizzano conduttori ricoperti con un sottile strato di argento che diventa sede di corrente con modesti valori di resistenza.

Dal punto di vista pratico risulta molto utile la relazione:

$$R_{AC} = \frac{d^2}{4} \cdot \frac{1}{\delta(d-\delta)} R_{DC}$$

7

che lega il valore della resistenza R_{AC} presentata da un conduttore a sezione circolare percorso da corrente alternata a quella R_{DC} caratteristica dello stesso conduttore funzionante in regime continuo e in cui d rappresenta il diametro del conduttore in mm.

esempio**1** Determinare per quale frequenza la resistenza chilometrica di un cavo telefonico in bronzo di diametro d raddoppia rispetto al valore assunto in corrente continua.

Si assuma:

- $\rho = 0,075 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$
- $d = 3 \text{ mm}$
- $\mu = \mu_0$

Dalla relazione:

$$R_{AC} = \frac{d^2}{4} \cdot \frac{1}{\delta (d - \delta)} R_{DC}$$

si ha:

$$\frac{R_{AC}}{R_{DC}} = \frac{d^2}{4} \cdot \frac{1}{\delta (d - \delta)} = 2$$

e, risolvendo rispetto a δ , si ottiene:

$$\delta = \frac{12 \pm \sqrt{72}}{8} = \frac{6 \pm 3\sqrt{2}}{4}$$

scartando la soluzione $\frac{6+3\sqrt{2}}{4}$ in quanto la profondità di penetrazione risulterebbe maggiore del raggio del conduttore, si ottiene:

$$\delta = \frac{6-3\sqrt{2}}{4} \approx 0,439 \text{ mm}$$

Infine, dalla:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}}$$

si ricava:

$$f = \frac{\rho}{\pi \mu \delta^2} = \frac{0,075 \cdot 10^{-6}}{\pi \cdot 4 \pi 10^{-7} (0,439 \cdot 10^{-3})^2} \approx 98,4 \text{ kHz}$$

3 Proprietà magnetiche

Per la costruzione della maggior parte delle apparecchiature elettroniche ed elettriche vengono utilizzati i materiali magnetici. Tali materiali trovano ad esempio impiego per la costruzione dei nuclei dei trasformatori, nelle macchine rotanti, negli induttori, nei relè ecc.

In commercio esiste una vasta gamma di materiali magnetici e, data la diversità dei requisiti che essi devono possedere in funzione del tipo di applicazione pratica, è necessario un richiamo delle principali proprietà.

Dall'elettrotecnica è noto che la **permeabilità magnetica** è definibile attraverso il rapporto:

$$\mu = \frac{B}{H} \left[\frac{\text{H}}{\text{m}} \right]$$

in cui B rappresenta il valore dell'induzione magnetica e H il campo magnetico.

Attraverso il valore della permeabilità magnetica assoluta $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$ è possibile classificare tutti i materiali in:

- diamagnetici, se il valore della permeabilità μ è di poco inferiore a quella del vuoto μ_0 ;
- paramagnetici, se il valore della permeabilità μ è di poco superiore a quella del vuoto μ_0 ed è costante;
- ferromagnetici, se il valore della permeabilità μ è di molto superiore a quella del vuoto μ_0 ; nei materiali ferromagnetici il valore di μ non è costante ma dipende dalle sollecitazioni esterne e dalla temperatura; oltre un certo valore di temperatura, definito punto di Curie, il materiale perde le sue proprietà e diventa paramagnetico.

La **tabella 5** riporta il valore del punto di Curie per alcuni materiali ferromagnetici.

Tabella 5
Punto di Curie
di alcuni
materiali
ferromagnetici

Materiale	Punto di Curie [°C]
Ferro dolce	760 ÷ 780
Cobalto	1160 ÷ 1200
Nichel	350 ÷ 360

La permeabilità magnetica del vuoto, o dell'aria, vale:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{H}}{\text{m}}$$

La grandezza:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

9

rappresenta il valore della *permeabilità relativa* del materiale.

**Curve di prima
magnetizzazione**

Nella figura 4 sono riportate le curve di prima magnetizzazione $B_0(H)$ del vuoto o dell'aria e quella $B(H)$ di un materiale ferromagnetico con la relativa curva della permeabilità $\mu(H)$.

Da tale curva si nota che la permeabilità dei materiali ferromagnetici non è costante ma varia con l'intensità del campo magnetizzante H .

Essendo:

$$\mu = \frac{B}{H} = \tan \alpha$$

10

si desume che il valore di μ è massimo quando è massima l'inclinazione della retta passante per il punto O e tangente alla curva (punto N_0).

Nella **figura 4** il valore μ_{in} rappresenta il valore della *permeabilità magnetica iniziale*.

Figura 4
Curva di prima
magnetizzazione

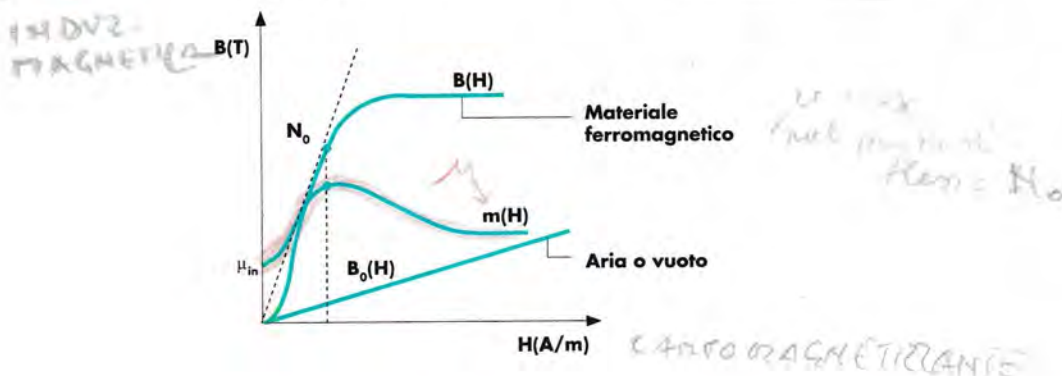


Tabella 6 Caratteristiche magnetiche di alcuni materiali ferromagnetici e dell'aria

Induzione magnetica B [T]	Materiale									
	Acciaio fuso e ferro fucinato		Ghisa		Lamiere normali		Lamiere al silicio		Lamiere a cristalli orientati	
	H [A/m]	μ_r	H [A/m]	μ_r	H [A/m]	μ_r	H [A/m]	μ_r	H [A/m]	μ_r
0,70	220	2530	4000	140	170	3280	200	2800	–	–
0,90	320	2240	8000	90	330	2170	310	2310	–	–
1,00	400	1990	11 000	72	470	1700	400	2000	40	20 000
1,10	500	1750	15 000	58	630	1390	500	1750	58	15 100
1,20	620	1540	20 000	48	800	1200	700	1360	75	12 700
1,30	850	1220	–	–	1050	990	1200	860	88	11 800
										$H = B/\mu_0$ [A/m]

La **tabella 6** riporta le caratteristiche magnetiche di alcuni materiali ferromagnetici e del vuoto o dell'aria.

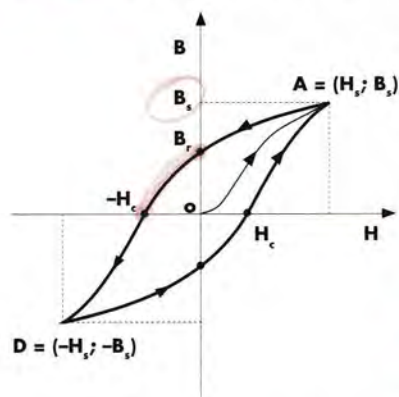
La curva di magnetizzazione riportata nella **figura 4** si riferisce al fenomeno della magnetizzazione iniziale che si ha quando un materiale viene sottoposto a un campo magnetico crescente gradualmente fino a un valore massimo.

Ciclo di isteresi

Se il campo magnetico è variabile alternativamente, la curva percorre un ciclo detto di isteresi.

Se il campo magnetico varia fra due valori uguali e opposti il ciclo è simmetrico.

La **figura 5** riporta un ciclo di isteresi tipico dei materiali ferromagnetici.

Figura 5
Ciclo di isteresi

Senza volere entrare nei particolari della descrizione del fenomeno, studiato nel corso di Elettrotecnica ed Elettronica, è utile richiamare alcune grandezze importanti ai fini dell'impiego pratico dei materiali ferromagnetici.

I punti caratteristici della curva sono:

- **induzione residua B_r** : indica che il materiale resta magnetizzato anche quando il valore del campo magnetizzante H è uguale a zero;
- **campo coercitivo $-H_c$** : è il valore del campo magnetizzante necessario per smagnetizzare completamente il materiale;
- **induzione di saturazione B_s** : quando si raggiunge la saturazione l'induzione magnetica aumenta molto lentamente, come nel vuoto, di una quantità uguale a $\mu_0 \cdot H$;
- **curva di smagnetizzazione**: è il tratto del ciclo di isteresi compreso fra il valore B_r e $-H_c$; tale curva permette di individuare quei materiali che possono essere utilizzati come **magneti permanenti**.

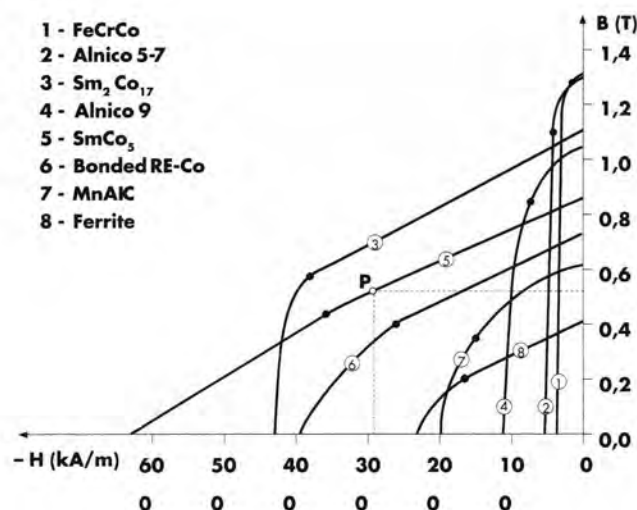
La **figura 6** riporta le curve di smagnetizzazione dei principali materiali utilizzati come magneti permanenti.

Nei magneti permanenti i valori dell'induzione B e del campo H devono essere scelti in modo tale che il prodotto BH , definito **prodotto di energia**, risulti massimo.

Nella **figura 6** i punti di massimo prodotto di energia BH_{max} sono contrassegnati con un punto.

Figura 6

Curve di smagnetizzazione



Perdite nei materiali ferromagnetici

Perdite per isteresi

Quando un materiale è sottoposto a una magnetizzazione variabile con frequenza f , in esso si verifica una *dissipazione di energia sotto forma di calore* dovuta all'isteresi caratteristica del materiale e alle *correnti parassite* che circolano in esso.

L'energia dissipata per isteresi è dovuta al fatto che non tutta l'energia fornita al materiale per la sua magnetizzazione viene restituita durante la smagnetizzazione; dipende dalla struttura molecolare del materiale stesso ed è proporzionale all'area racchiusa dal ciclo. È evidente che per, ridurre al minimo tali perdite, è necessario utilizzare materiali che presentano cicli di isteresi aventi area minima.

Le perdite per isteresi vengono calcolate mediante la formula di Steinmetz:

$$P_i = k_i \cdot B_{\max}^\alpha \cdot f \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{kg}} \right]$$

11

in cui:

- k_i = coefficiente dipendente dal materiale;
- B_{\max} = valore massimo dell'induzione in [T];
- f = frequenza in [Hz];
- α = coefficiente compreso fra 1,6 e 2.

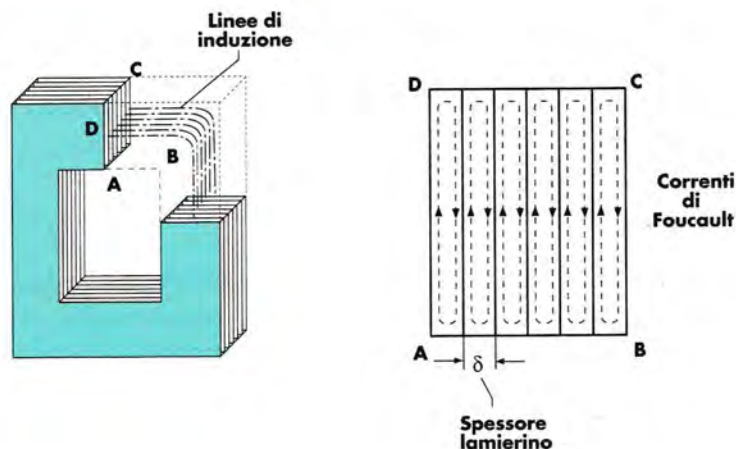
Perdite per correnti parassite

L'energia dissipata per correnti parassite è dovuta al fatto che, quando un nucleo magnetico è attraversato da flussi alternativi, si inducono in esso delle correnti, dette di *Foucault*, per effetto delle stesse variazioni di flusso, che producono perdite per effetto Joule proporzionali al quadrato della corrente e alla resistenza del circuito magnetico.

Per ridurre tali perdite i nuclei magnetici, interessati da flussi variabili, vengono realizzati non in forma massiccia, ma accostando tra loro *lamierini isolati* con sottili fogli di carta o con vernici isolanti o con ossidi.

Tali lamierini devono essere accostati con i piani paralleli alle linee di induzione del campo magnetico, come rappresentato nella *figura 7*; in tal modo le correnti indotte sono obbligate a richiudersi entro lo spessore dei singoli lamierini.

Figura 7
Nucleo
magnetico
in lamierini



La perdita di potenza per correnti parassite si determina tramite la relazione:

$$P_c = k_c \cdot B_{\max}^2 \cdot f^2 \cdot \delta^2 \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{kg}} \right] \quad 12$$

in cui:

- k_c = coefficiente dipendente dal materiale;
- B_{\max} = valore dell'induzione massima in [T];
- f = frequenza in [Hz];
- δ = spessore del lamierino in [mm].

Sommando la perdita per isteresi p_i a quella per correnti parassite p_c si ha la **perdita specifica totale** P_t nel ferro:

$$P_t = p_i + p_c \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{kg}} \right] \quad 13$$

Nella pratica il costruttore di lamierini caratterizza le perdite attraverso la **cifra di perdita** C_S che esprime la perdita totale in 1 kg di materiale, con una induzione $B = 1$ T e una frequenza $f = 50$ Hz.

Per la determinazione delle perdite totali per un valore di induzione B diverso da 1 e una frequenza f diversa da 50 si utilizza la relazione seguente:

$$P_t = C_S \cdot B_{\max}^2 \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^n \cdot \text{kg}_{\text{fe}} \quad [\text{W}] \quad 14$$

in cui:

- C_S = cifra di perdita in [W/kg];
- B_{\max} = induzione massima in [T];
- f = frequenza in [Hz];
- kg_{fe} = massa, in [kg], del nucleo magnetico;
- n = coefficiente che varia da 1,2 a 1,8 per valori di B da 0,5 a 2 T.

Resine termoplastiche e termoindurenti

Le **resine termoplastiche** hanno la caratteristica di poter essere rifuse più volte e di assumere, dopo il raffreddamento, forme diverse.

Le **resine termoindurenti** non possono invece essere rifuse e assumono pertanto una forma permanente.

Le resine termoplastiche vengono utilizzate per l'isolamento dei conduttori, per l'isolamento di trasformatori, di cavi ad alta frequenza, di cavi TV, per il rivestimento di alcuni tipi di condensatori.

Tra le resine termoindurenti si citano ad esempio le *resine epossidiche* e le *resine al silicone*, utilizzate entrambe per il rivestimento di componenti elettronici.

Le resine siliconiche in particolare vengono utilizzate anche per l'impregnazione e l'incassamento di circuiti elettronici.

Elastometri

Con il termine **elastometri** si intendono sia le *gomme naturali* che quelle *sintetiche*.

Sono in particolare utilizzati per il rivestimento e l'isolamento di conduttori nel caso in cui si richieda anche un buon comportamento elastico.

I *materiali vetrosi* vengono in particolare utilizzati per la costruzione degli isolatori per linee di trasporto aeree, di supporto per fusibili e resistori, bulbi di lampade.

Vetro

Il **vetro** oltre a essere un buon isolante, è anche impermeabile e inattaccabile dagli acidi. La sua conducibilità termica è piuttosto bassa.

6 Materiali magnetici



I **materiali magnetici** sono quei materiali che presentano un valore di permeabilità magnetica molto più elevata di quella del vuoto.

Essi possono essere suddivisi in *isotropi* e *anisotropi*, e in materiali *teneri* e materiali *duri*.

Materiali isotropi e anisotropi

Nei materiali **isotropi** le caratteristiche magnetiche sono indipendenti dalla direzione del vettore induzione, in quelli **anisotropi** sono ottimali solo per determinate direzioni preferenziali.

Materiali teneri

I materiali magnetici **teneri** presentano una curva di magnetizzazione abbastanza ripida nella prima parte e quindi una elevata permeabilità iniziale, un ciclo di isteresi di area modesta e possono magnetizzarsi e smagnetizzarsi con facilità.

Devono essere di elevata purezza e non devono presentare imperfezioni del reticolo cristallino.

Il loro nome deriva dal fatto che la regolarità del reticolo cristallino determina un abbassamento della durezza meccanica.

Sono materiali magnetici teneri gli acciai a basso tenore di carbonio con o senza aggiunta di silicio e i materiali ad alto tenore di nichel.

Materiali duri

I materiali magnetici **duri** sono invece materiali che presentano una elevata isteresi magnetica e risultano pertanto idonei per la realizzazione di magneti permanenti; per tali materiali è di fondamentale importanza conoscere l'andamento della curva di smagnetizzazione.

Ferro e cobalto

Metalli puri come il **ferro** e il **cobalto** presentano prevalente interesse come componenti di leghe anche se il ferro può essere utilizzato allo stato puro quando sono necessari valori elevati di permeabilità. Nel ferro e nel nichel le perdite per isteresi sono modeste, risultano invece elevate nel cobalto.

Acciaio e ghisa

Gli **acciai** e le **ghise**, di cui si è già parlato in dettaglio, sono leghe ferro-carbonio; il carbonio aggiunto al ferro provoca un aumento delle perdite per isteresi e del valore del campo coercitivo H_C e una diminuzione della permeabilità.

Leghe

Le **leghe ferro-silicio** si classificano in base alla percentuale di silicio in esse contenuto.

Quantità inferiori all'1,5% possono provocare un aumento delle perdite per isteresi. Oltre tale valore le perdite diminuiscono ma, superato il 5%, il materiale diviene troppo *fragile* e non ha più valore commerciale.

Il silicio viene aggiunto agli acciai a basso contenuto di carbonio.

Le **leghe ferro-nichel** hanno come caratteristiche salienti un valore elevato di permeabilità iniziale, bassi valori di induzione di saturazione B_S e un ciclo di isteresi abbastanza piccolo.

Le **leghe ferro-cobalto** sono caratterizzate da valori elevati di induzione di saturazione B_S , superiori a quelli del ferro.

Ferriti

Le **ferriti** sono materiali ferromagnetici di tipo ceramico, ottenute per sinterizzazione, che vengono utilizzate in alta frequenza per ridurre le perdite per correnti parassite. Sono materiali a bassissima conducibilità e che presentano piccoli cicli di isteresi; il valore della induzione di saturazione B_S è molto basso e hanno elevata permeabilità ed elevato valore del campo coercitivo H_C .

Le ferriti sono formate da *ossidi di ferro* uniti a elementi bivalenti quali *magnesio*, *manganese* e *zinco*. Si classificano in funzione del tipo di composto in *ferriti morbide*, adatte per frequenze relativamente basse, e *ferriti per microonde*.

Per la realizzazione di *magneti permanenti* vengono impiegati o il *ferroxdure* (materiale ceramico ottenuto per sinterizzazione) o le *leghe metalliche*.

I magneti ferroxdure hanno elevati valori di campo coercitivo H_C ed elevati valori di resistività.

I magneti realizzati impiegando leghe metalliche presentano valori elevati di induzione residua e del prodotto di energia BH . In commercio esistono anche magneti ferroxdure legati con materiale plastico caratterizzati da un costo relativamente più basso.

Magneti permanenti

I **magneti permanenti** sono utilizzati per quelle applicazioni in cui è necessario un flusso magnetico costante.

Nelle **tabelle 13, 14, 15**, oltre che nella precedente **tabella 2**, sono riportate le caratteristiche e gli impieghi di alcuni materiali ferromagnetici.

Tabella 13*Materiali teneri*

Materiali isotropi	Impiego e caratteristiche
Acciaio dolce C 20 ÷ 40	Preferibilmente fucinato o laminato in forti spessori Per circuiti magnetici interessati da flussi unidirezionali e costanti
Acciaio extradolce C 4 ÷ 10	In profilati e laminati spessore $\geq 0,5$ mm Per dispositivi di regolazione, nuclei di elettromagneti, nuclei di elettrovalvole e impieghi simili, lamiere di indotto per piccole macchine rotanti (segue)

Tabella 13 (continua)

Leghe ferro-Si Si max 4 + 4,5%	Sempre sotto forma di lamiere di piccolo spessore, per circuiti magnetici interessati da flussi variabili; maggiore è la percentuale di Si maggiore è la fragilità del materiale
Ferri dolci, agglomerati di ossido di Fe + Zn, Mn, Ni	Materiali ceramici ottenuti per sintetizzazione, caratterizzati da difficile lavorabilità, bassa permeabilità, elevata resistività, bassissime perdite, adatti per alte frequenze
Permoleghe	Materiale ad altissima permeabilità iniziale e piccolo campo coercitivo. Impiegate per circuiti ad alta frequenza (permalloy - dyparm, unmetal ecc.)
Materiali anisotropi	Impiego e caratteristiche
Leghe Fe + Si	Solo sotto forma di lamiere di spessore sottile, note come lamiere a cristalli orientati, caratterizzate da un alto contenuto di Si (3 + 4%) e da una bassa cifra di perdita; dopo la lavorazione meccanica debbono subire una ricottura a circa 800 °C con un ciclo totale di circa 15 ore

Tabella 14 Materiali duri

Materiale (Fe resto)	Comportamento	(BH)M [kJ/m ³]	B [T]	H [kAsp/m]	Br [T]	HC [kAsp/m]
Co 35	Isotropo	7,15	0,55	13	3,85	23
Fe-Ba ossidi	Isotropo	7	0,16	43,75	0,2	120
Fe-Ba ossidi	Anisotropo	25	0,27	92,6	0,35	200

Tabella 15 Alcuni tipi di lamiera

Tipi di lamiera	Impiego
D 35050 P	Motori per trazione - motori per elettrodomestici, piccoli motori
D 26050 P	Motori a induzione - magneti
A 18050 P	Trasformatori radio - TV, saldatrici statiche, piccoli trasformatore, piccole e medie macchine ruotanti in c.a. e c.c.
T 10530 P1	Trasformatori di potenza
T 12030 P1	

Nella **tabella 15** le sigle di identificazione indicano:

- la lettera iniziale (D, A, T, P) la classe di appartenenza;
- le prime due cifre il valore della cifra di perdita in [W/kg];
- le ulteriori tre cifre lo spessore;
- la lettera finale l'indicazione dell'induzione a cui si riferisce la cifra di perdita (P per induzione $B = 1$ T, P_1 per induzione $B = 1,5$ T).

Ad esempio, una lamiera tipo D 35050 P indica lamiera di classe D con cifra di perdita $C_5 = 3,5$ W/kg riferita a una induzione $B_0 = 1$ T, spessore 0,50 mm.

Induttori

OBIETTIVI CONTENUTI

- 1 Generalità
- 2 Caratteristiche costruttive degli induttori
- 3 Schermatura delle bobine

Conoscenze

- Le principali applicazioni degli induttori
- Il funzionamento dell'induttore quando è inserito all'interno di un circuito
- Le relazioni analitiche per il dimensionamento degli induttori

Abilità

- Confrontare componenti simili per scegliere il più idoneo alla specifica applicazione
- Eseguire il dimensionamento di un induttore

1 Generalità

conclusione
Un circuito percorso da una corrente genera nello spazio circostante un flusso, concatenato col circuito, che è direttamente proporzionale alla corrente:
conclusione

$$\phi = L \cdot I$$

1

Definizione

La costante di proporzionalità L è detta **induttanza**.

Precisato ciò, si può dimostrare che, quando la corrente varia nel tempo, l'induttanza rappresenta la proprietà di un circuito di opporsi alla variazione della corrente e ciò si manifesta sotto forma di una forza controelettromotrice autoindotta.

L'induttore elementare è realizzato con un filo di materiale conduttore avvolto in maniera tale da formare una bobina.

Nel Sistema Internazionale (SI) l'unità di misura dell'induttanza è l'henry [H].

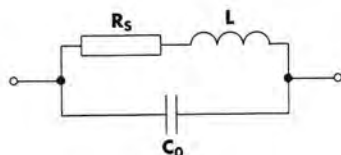
Circuito equivalente

Un induttore, in un circuito a corrente alternata, può essere schematizzato con il circuito equivalente riportato nella **figura 1**.

Il caso reale differisce infatti da quello ideale per il fatto che l'angolo di sfasamento tra corrente e tensione, a causa di effetti resistivi e capacitivi, è minore di 90° .

Figura 1

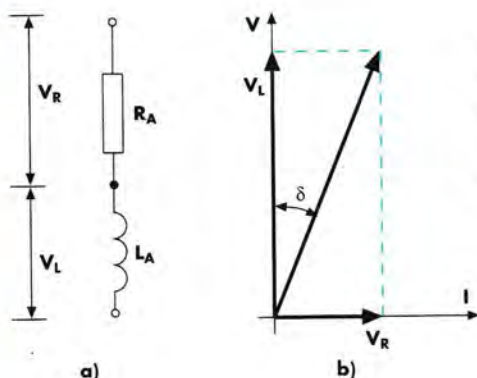
Circuito equivalente di un induttore



Nella resistenza R_s sono conglobate tutte le perdite (ad esempio le perdite ohmiche nel conduttore), nella capacità C_0 gli effetti capacitivi dovuti a quelle parti metalliche (spine e conduttori) che, poste a breve distanza fra loro, danno origine a campi elettrostatici.

Figura 2

Circuito equivalente semplificato di un induttore (a) e diagramma vettoriale tensione-corrente (b)



Con opportune approssimazioni, il circuito della **figura 1** può essere trasformato nel circuito serie della **figura 2**.

Le relazioni che legano i parametri dei due circuiti sono:

$$R_A = \frac{R_s}{(1 - \omega^2 LC_0)} \quad 2$$

$$L_A = \frac{L}{(1 - \omega^2 LC_0)} \quad 3$$

Angolo di perdita

Nella stessa **figura 2b** viene riportato il diagramma vettoriale relativo a tensioni e correnti in cui si evidenzia che la tensione non è sfasata di un angolo di 90° rispetto alla corrente, ma di un angolo $(90^\circ - \delta)$ a causa della caduta di tensione V_R che si manifesta sulla componente resistiva.

L'angolo δ viene definito **angolo di perdita** e la sua tangente **fattore di perdita**.

Parametri caratteristici

I principali **parametri caratteristici** di un induttore sono:

- il **fattore di qualità** Q ;
- l'**angolo di perdita**;
- la **frequenza di risonanza**;
- il **valore di induttanza** L ;
- la **tolleranza sull'induttanza**;
- il **coefficiente di temperatura** dell'induttanza.

Fattore Q

Il **fattore di qualità** o di **merito** Q esprime il rapporto fra l'energia immagazzinata e l'energia dissipata dalla bobina in un periodo:

$$Q = \omega \frac{W}{P} = 2\pi f \frac{W}{P} \quad 4$$

in cui:

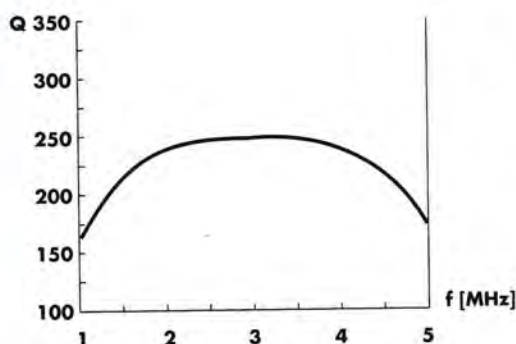
- W = energia immagazzinata;
- P = energia dissipata.

Perdite

L'induttore dissipa potenza in quanto si hanno delle **perdite per effetto Joule** nel filo che costituisce l'avvolgimento, **perdite dielettriche** nei materiali isolanti e **perdite dovute all'isteresi magnetica** e alle **correnti parassite** quando il nucleo è realizzato con materiale ferromagnetico.

Figura 3

Andamento del fattore di qualità Q di un induttore in funzione della frequenza



Come si vede dalla precedente relazione il fattore di merito è dipendente dalla frequenza di lavoro della bobina.

Nella **figura 3** viene riportato un esempio di andamento di Q in funzione della frequenza per una bobina avvolta in aria.

Dal grafico si nota che il fattore Q è abbastanza costante entro un certo intervallo di frequenza, mentre diminuisce a frequenze più elevate o più basse.

L'intervallo di lavoro della bobina deve corrispondere ai valori più elevati di Q .

Angolo di perdita

Poiché l'**angolo di perdita** è un fattore di qualità, e quindi un parametro desiderabile, viene riportato, sui cataloghi delle case costruttrici, il suo valore minimo. Talvolta vengono riportati anche dei grafici che lo esprimono in funzione della frequenza e dell'induttanza alle quali risulta direttamente proporzionale.

Frequenza di risonanza

La **frequenza di risonanza** rappresenta quel valore di frequenza oltre il quale l'induttore non può più operare in modo corretto e la bobina si comporta come un condensatore puro.

Il valore di questa frequenza è desumibile dalla relazione:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

5

Tolleranza

La **tolleranza**, espressa in valore percentuale, esprime lo scostamento del valore dell'induttanza rispetto al suo valore nominale.

Coefficiente di temperatura

Il **coefficiente di temperatura** dell'induttanza esprime il fatto che la temperatura modifica il valore dell'induttanza sia perché essa provoca delle variazioni nelle dimensioni della bobina a causa delle dilatazioni termiche, sia perché provoca delle variazioni della resistività del conduttore.

2 Caratteristiche costruttive degli induttori

Per creare dei valori di induttanza concentrati in poco spazio, e quindi induttori di ingombro ridotto e al contempo con valori abbastanza elevati di induttanza bisogna ricorrere a particolari soluzioni tecnologiche.

Dal punto di vista costruttivo gli induttori possono essere realizzati senza nucleo, cioè avvolti in aria, oppure avvolti su nucleo di materiale ferromagnetico.

Induttori senza nucleo



Negli induttori senza nucleo l'avvolgimento (costituito da un filo conduttore) viene disposto attorno a un supporto di materiale isolante.

Per ridurre le perdite ohmiche si utilizzano conduttori a bassa resistenza o fili di Litz costituiti da un insieme di fili sottili, isolati tra loro e intrecciati, il cui uso presenta notevoli vantaggi fino a 1500 kHz di frequenza.

Inoltre gli avvolgimenti devono essere disposti in modo tale da minimizzare quegli effetti capacitivi che si vengono a formare tra le spire e che creano dei campi elettrostatici in aria e nei dielettrici.

I tipi di avvolgimento più comunemente utilizzati assumono le seguenti forme:

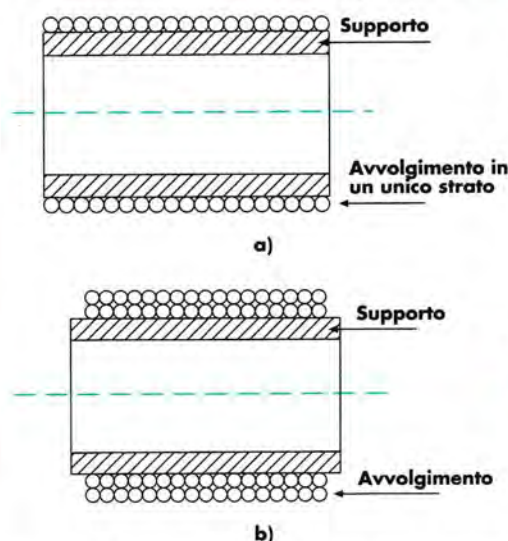
- solenoidale;
- a più strati;
- a nido d'ape;
- toroidale.

L'avvolgimento solenoidale è il tipo di avvolgimento più semplice.

In questo caso il conduttore isolato viene avvolto in un solo strato su un supporto cilindrico cavo di materiale isolante.

La sua struttura tipica viene riportata nella figura 4a.

Figura 4
Avvolgimento solenoidale (a) e a più strati (b) di un induttore



L'avvolgimento a più strati viene utilizzato quando il valore di induttanza richiesto è più alto. In questo caso il conduttore isolato viene avvolto a più strati su un supporto cilindrico cavo di materiale isolante.

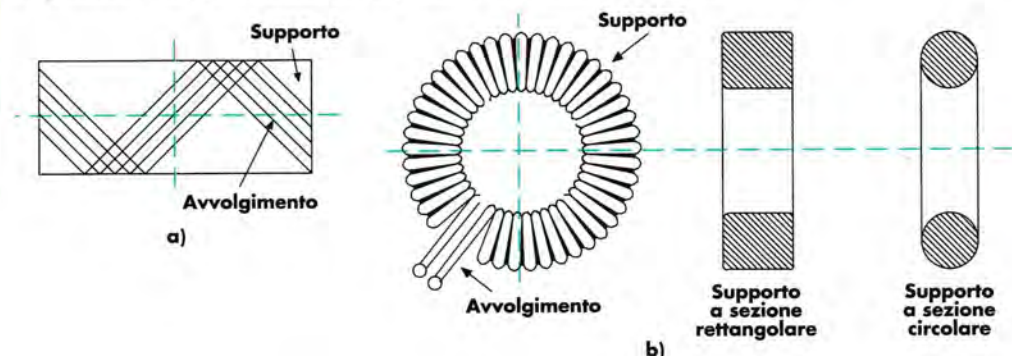
Il numero di strati da realizzare dipende dal valore dell'induttanza che si vuole ottenere e dalla dimensione assiale del supporto.

La sua struttura tipica viene riportata nella figura 4b. I conduttori possono anche essere contenuti in gole profonde stampate sul supporto. Distanziando opportunamente le spire si possono ottenere bassi valori di capacità.

L'avvolgimento a nido d'ape, la cui struttura viene riportata nella figura 5a, si forma con l'ausilio di due movimenti contemporanei impressi al supporto (un movimento di rotazione e uno di traslazione).

L'avvolgimento toroidale, la cui struttura viene riportata nella figura 5b, viene utilizzato per ottenere campi magnetici di debole intensità al di fuori dell'induttore. Si possono eseguire anche avvolgimenti toroidali su più strati.

Figura 5
Avvolgimento a nido d'ape (a) e toroidale (b) di un induttore



Induttori con nucleo

Negli induttori con nucleo l'avvolgimento viene disposto su un nucleo di materiale ferromagnetico.

La presenza del nucleo determina, a parità di dimensioni di ingombro e di numero di spire, un aumento del valore di induttanza in quanto essa è proporzionale alla permeabilità magnetica che è maggiore nei materiali magnetici che non in aria.

I fattori sfavorevoli, dovuti alla presenza del nucleo, sono legati a un aumento delle perdite con conseguente diminuzione del fattore di qualità Q .

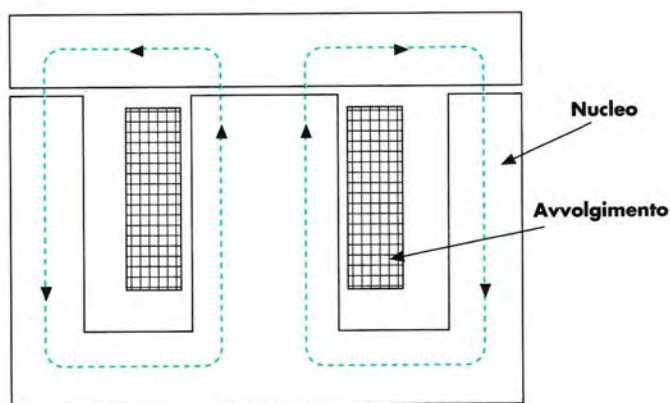
Le maggiori perdite sono dovute alle correnti parassite indotte nel nucleo e al fenomeno dell'isteresi magnetica.

Tra i nuclei, quelli in ferrite garantiscono le migliori prestazioni in quanto si possono ottenere elevati valori di permeabilità e basse perdite.

Sono disponibili sotto diverse forme (ad E, U, I, toroidale).

Nella **figura 6** viene riportato un esempio tipico di nucleo in materiale ferromagnetico per induttori.

Figura 6
Nucleo in
materiale
ferromagnetico
per induttori



Codice a colori

Anche per gli induttori, così come per i resistori e i condensatori, esistono *codici di riconoscimento* basati sulla corrispondenza tra numero e colore.

La **tabella 1** può essere utilizzata per interpretare un codice a colori a quattro bande (due cifre significative, coefficiente moltiplicatore e tolleranza) con valori espressi in μH .

Tabella 1
Codice a colori
per induttori

Colori	Cifre significative	Moltiplicatore	Tolleranza
Nero	0	1	
Marrone	1	10	
Rosso	2	100	
Arancio	3	1000	
Giallo	4		
Verde	5		
Blu	6		
Violetto	7		
Grigio	8		
Bianco	9		
Nessun colore			$\pm 20\%$
Argento			$\pm 10\%$
Oro	Punto decimale		$\pm 5\%$

3 Schermatura delle bobine

Poiché i campi magnetico ed elettrostatico creati da un induttore possono interferire con componenti e apparecchiature che si trovano nelle sue immediate vicinanze e, allo stesso modo, quelli creati da altre apparecchiature possono provocare disturbi all'induttore, è necessario, a volte, isolare l'induttore utilizzando degli *schermi protettivi*.

Schermi

Gli **schermi**, formati da contenitori di materiale metallico, sono realizzati in modo tale da minimizzare gli effetti non desiderati, come la riduzione del valore dell'induttanza L e del fattore di merito Q , derivanti dalla sua presenza.

Gli accorgimenti costruttivi consistono nel realizzare schermi il cui spessore è tanto maggiore quanto più è bassa la frequenza, e nel mantenere la distanza tra gli schermi stessi e le bobine uguale in tutte le direzioni e non inferiore al diametro della bobina stessa.

Schermi per basse frequenze

Normalmente gli schermi per campi magnetici in *bassa frequenza* sono realizzati con materiale ferromagnetico ad alta permeabilità iniziale, come il *permalloy* o il *mumetal*, che agiscono da schermi elettromagnetici (**figura 7a**).

In questo caso poiché il materiale presenta riluttanza molto bassa, concentra al suo interno le linee del flusso cortocircuitandole.

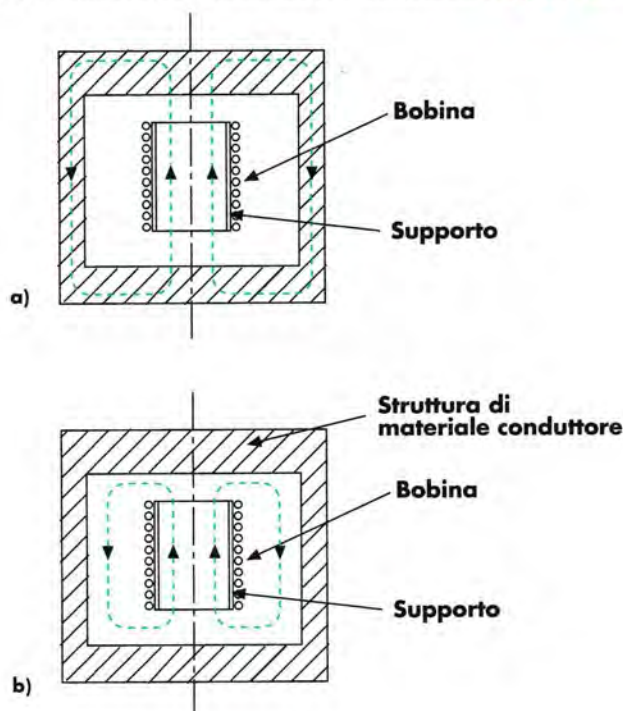
È necessario che lo schermo non presenti interruzioni nella continuità strutturale e che lo spessore sia sufficientemente grosso.

Schermi per frequenze elevate

Per *frequenze elevate*, superiori a 50 kHz, gli schermi sono realizzati con materiale ad alta conducibilità elettrica, come il *rame* o l'*alluminio*; in questo caso l'effetto schermante è dovuto alle correnti parassite indotte nello schermo che si oppongono alla penetrazione di un campo magnetico esterno e, allo stesso tempo, confinano il campo magnetico generato dall'induttore all'interno del contenitore schermante (**figura 7b**).

Figura 7

Effetto schermante con materiale ferromagnetico (a) e con materiale ad alta conducibilità (b) in un induttore





Scheda integrativa

Dimensionamento degli induttori

Dal punto di vista costruttivo gli induttori possono essere realizzati senza nucleo, cioè avvolti in aria, oppure avvolti su un nucleo di materiale ferromagnetico.

Per il dimensionamento degli induttori avvolti in aria è possibile utilizzare delle espressioni ricavate sperimentalmente, e in particolare si ha quanto segue.

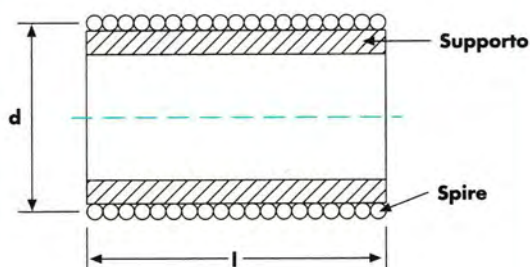
- Per induttori con avvolgimento a solenoide a un solo strato (figura 1):

$$L = 4\pi^2 FN^2 d \quad [\text{H}] \quad (1)$$

in cui:

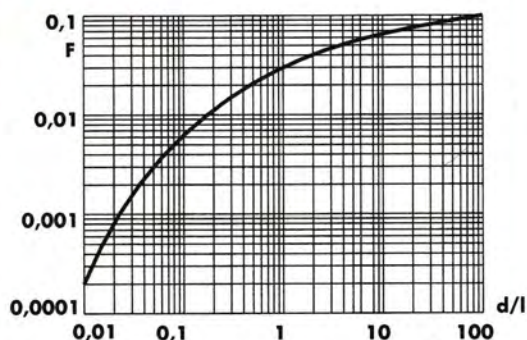
- N = numero complessivo delle spire;
- d = diametro dell'avvolgimento in [m];
- F = coefficiente dipendente dal rapporto tra il diametro d e la lunghezza l dell'avvolgimento.

Figura 1 Avvolgimento a solenoide a un solo strato



Il valore del coefficiente F è ricavabile dal grafico della figura 2.

Figura 2 Coefficiente F



- Per induttori con avvolgimento a solenoide a più strati (figura 3):

$$L = 39,45 FN^2 d - \frac{0,63 \cdot N^2 ds}{l} (0,693 + B) \quad [\text{H}] \quad (2)$$

in cui:

- d , l e s , indicati nella figura 3, sono espressi in [m];
- N è il numero di spire complessivo;
- B è un coefficiente, funzione del rapporto l/s , ricavabile dalla tabella 1.

Figura 3 Avvolgimento a solenoide a più strati

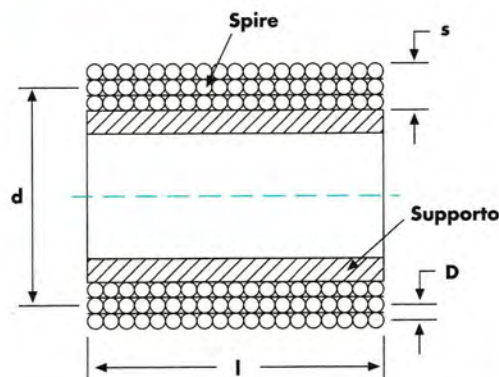


Tabella 1 Coefficiente B in funzione del rapporto l/s

l/s	B	l/s	B	l/s	B
1	0,0000	11	0,0000	21	0,0000
2	0,1202	12	0,1202	22	0,1202
3	0,1753	13	0,1753	23	0,1753
4	0,2076	14	0,2076	24	0,2076
5	0,2292	15	0,2292	25	0,2292
6	0,2496	16	0,2496	26	0,2496
7	0,2563	17	0,2563	27	0,2563
8	0,2656	18	0,2656	28	0,2656
9	0,2730	19	0,2730	29	0,2730
10	0,2792	20	0,2792	30	0,2792

▶ TEST DI RIEPILOGO

- 1 Che cos'è un induttore?
- 2 L'unità di misura dell'induttanza è:
 - a) H/m;
 - b) H;
 - c) H/m²;
 - d) Wb
 - e) Wb/m².
- 3 Che cosa sono, per un induttore, l'angolo di perdita e il fattore di dissipazione?
- 4 Qual è la differenza tra induttori senza nucleo e induttori con nucleo?
- 5 Per quale motivo alcuni tipi di induttori vengono schermati?
- 6 La schermatura delle bobine per frequenze elevate viene realizzata utilizzando:
 - a) materiali ferromagnetici ad alta permeabilità iniziale;
 - b) materiali ferromagnetici a bassa permeabilità iniziale;
 - c) materiali ad alta conducibilità elettrica;
 - d) materiali isolanti.
- 7 Il fattore di qualità di un induttore rappresenta:
 - a) il rapporto tra la frequenza di risonanza e il valore di induttanza;
 - b) il rapporto tra l'energia immagazzinata e l'energia dissipata dalla bobina;
 - c) il rapporto tra la tolleranza e il coefficiente di temperatura;
 - d) il rapporto tra l'angolo di perdita e il coefficiente di temperatura.
- 8 La frequenza di risonanza per un induttore rappresenta:
 - a) il valore di frequenza oltre il quale l'induttore si comporta come un condensatore puro;
 - b) il valore di frequenza oltre il quale l'induttore si comporta come un resistore puro;
 - c) il valore di frequenza oltre il quale la bobina subisce danneggiamenti dovuti alle alte temperature;
 - d) il valore di frequenza al di sotto del quale l'induttore si comporta come un condensatore puro.