

4.7. Induttori

Gli induttori sottoposti a tensione alternata di frequenza f , oltre che dalla induttanza L , sono caratterizzati: dalla resistenza R_c del filo conduttore, dalla resistenza R_m (se esiste nucleo magnetico) equivalente alle perdite di energia del nucleo, dalla capacità C dovuta all'accoppiamento capacitivo tra le spire e fra strati di spire. Posto $R_m + R_c = R$, R , L , C formano il circuito equivalente dell'induttore (Fig. IX.4.6), la cui impedenza è:

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

Il circuito R , L , C può essere semplificato ed essere rappresentato da una sola

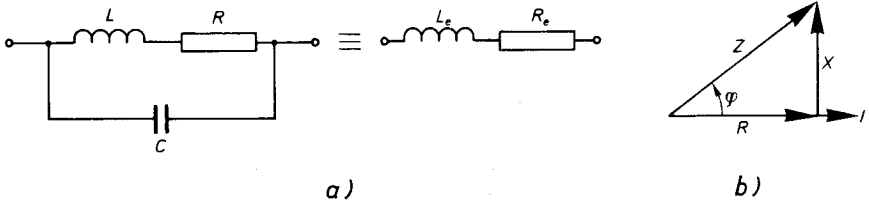


Fig. IX.4.6. a) Circuito equivalente di un induttore; b) rappresentazione vettoriale dell'impedenza dell'induttore.

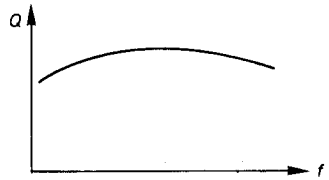
resistenza R_e e induttanza L_e , con:

$$R_e = \frac{R}{(1 - \omega^2 LC) + \omega^2 C^2 R^2} \quad L_e = \frac{(1 - \omega^2 LC)L - CR^2}{(1 - \omega^2 LC)^2 + \omega^2 C^2 R^2} \quad Z = R_e + j\omega L_e$$

In Tab. IX.4.14 sono riportate le equazioni concernenti l'induttore.

Tab. IX.4.14. Equazioni che caratterizzano un induttore

Denominazione	Equazione	Note
Resistenza equivalente	$R_e = \frac{R}{(1 - \omega^2 LC) + \omega^2 C^2 R^2}$	(¹) L'induttore si comporta capacitivamente per $\omega > \omega_0$ (ω_0 pulsazione di risonanza) dato che L_e diviene negativo
Induttanza equivalente	$L_e = \frac{(1 - \omega^2 LC)L - CR^2}{(1 - \omega^2 LC)^2 + \omega^2 C^2 R^2}$ (¹)	(²) Q è funzione della frequenza e mediamente raggiunge valori di qualche centinaio.
Frequenza di risonanza	$f_0 = 1/2\pi \sqrt{LC}$	
Angolo di perdita	$\delta = \arctg R_e/\omega L_e$	
Fattore di merito	$Q = \omega L_e/R_e = \tg \varphi$ (²)	
Fattore di potenza	$1/\sqrt{Q^2 + 1}$	



4.8. Calcolo degli induttori senza nucleo

Le formule utilizzate per il calcolo degli induttori sono numerose e tutte ricavate empiricamente, pertanto approssimate. Per gli induttori senza nucleo, la formula approssimata di uso più generale per il calcolo delle dimensioni di un induttore a un solo strato in base al valore induttivo è:

$$L = 987 \cdot 10^{-6} K D^2 N^2 / l \quad (\text{IX.4.1})$$

con L : induttanza in microhenry; D : diametro dell'induttore in centimetri (Fig. IX.4.7a);

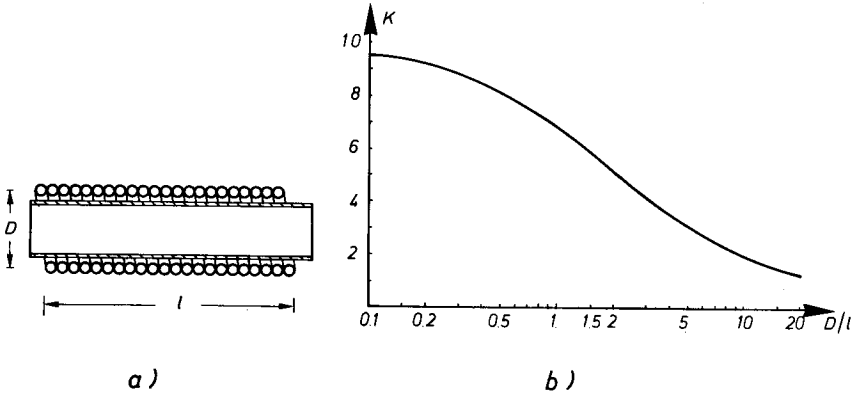


Fig. IX.4.7. a) Induttore cilindrico a uno strato; b) diagramma per la determinazione della costante di Nagaoka.

l : lunghezza dell'induttore in centimetri; N : numero di spire; K : fattore di correzione detto costante di Nagaoka (Fig. IX.4.7b).

Nella equazione IX.4.1, occorre imporre, secondo le esigenze, alcuni valori in modo da risolverla per una sola incognita; determinati tutti i valori, realizzato l'induttore, si esegue il controllo del valore dell'induttanza mediante ponti di misura.

Per eliminare l'effetto della capacità propria dell'induttore si realizza l'avvolgimento con accorgimenti tali da ridurre al minimo tale effetto. A seconda della realizzazione dell'avvolgimento si distinguono diversi tipi d'induttore; i più comuni sono: induttori cilindrici a uno o più strati, induttori a nido d'ape.

Il fattore di merito Q dell'induttore generalmente aumenta al crescere delle dimensioni dell'induttore, ma dipende anche da altri fattori quali: il tipo di supporto impiegato, il tipo di filo, il tipo di avvolgimento; in Fig. IX.4.8 sono riportati i valori di Q di due induttori a uno strato in funzione della frequenza.

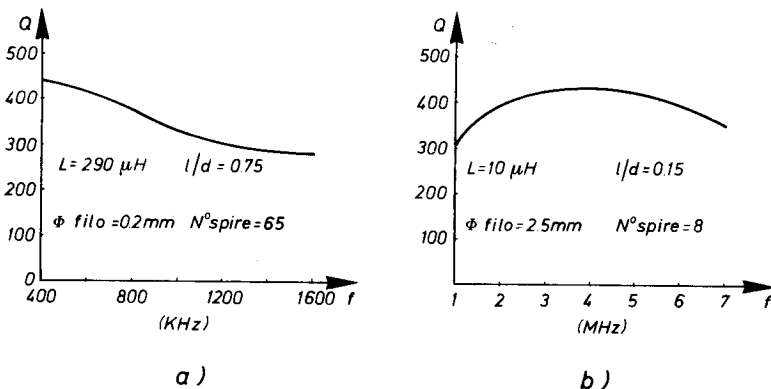


Fig. IX.4.8. Esempi dell'andamento di Q per induttori a uno strato.

A) Induttori cilindrici

Quelli a uno strato trovano largo impiego in circuiti oscillanti a onde medie e corte; il diametro del supporto per tali induttori è generalmente di $10 \div 25$ mm; come materiale di supporto si utilizzano bachelite, materiali ceramici, materiali plastici.

Il calcolo approssimato dell'induttanza è eseguito mediante l'equazione IX.4.1. Per gli avvolgimenti a più strati, l'avvolgimento può essere realizzato come mostra la Fig. IX.4.9 e viene detto *avvolgimento a pila*.

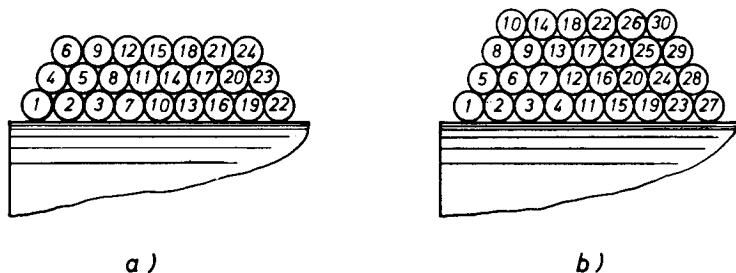


Fig. IX.4.9. Avvolgimento a pila per induttori a tre strati (a), a quattro strati (b).

Un conduttore adatto per questi induttori è filo di rame da 0,5 mm rivestito di cotone.

B) Induttori a nido d'ape

Per induttori ad elevato valore d'induttanza a frequenze inferiori a 550 kHz, conviene servirsi di avvolgimenti a più strati e di piccole dimensioni che assicurano piccoli valori di capacità propria dell'induttore: avvolgimenti a nido d'ape. In questi induttori il filo viene avvolto passando, zigzagando, da una estremità del supporto all'altra (Fig. IX.4.10).

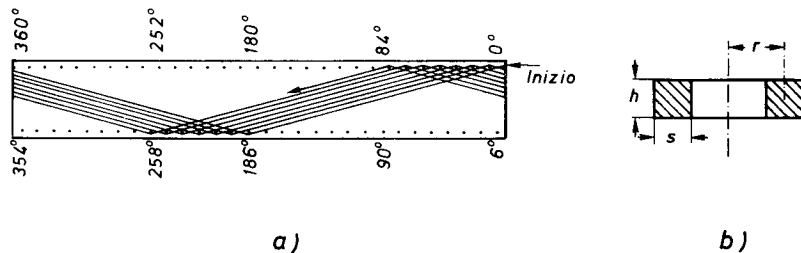


Fig. IX.4.10. a) Sviluppo in piano dell'avvolgimento a nido d'ape; b) sezione di un induttore a nido d'ape.

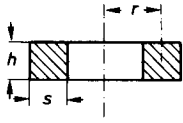
Il calcolo approssimato dell'induttanza di questi induttori si esegue mediante la formula:

$$L = 10^{-3} K N^2 r$$

con L : induttanza in microhenry; K : costante di Nagaoka (Tab. IX.4.15); N : numero di spire; r : raggio medio dell'induttore in centimetri.

Tab. IX.4.15. Valori della costante di Nagaoka per induttori a nido d'ape

a	b					
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
1	13,94	11,74	10,14	8,90	7,91	7,11
0,8	15,76	13,53	11,84	10,51	9,42	8,53
0,6	18,61	16,35	14,58	13,13	11,93	10,92
0,4	23,15	20,86	19,01	17,45	16,13	14,99
0,2	31,50	29,19	27,28	25,64	24,22	22,95
0,1	40,11	37,79	35,86	34,20	32,74	31,44
0,05	48,79	46,47	44,54	42,87	41,40	40,08
0,025	57,50	55,17	53,24	51,57	50,09	48,77



$$a = \frac{s}{2r} \quad b = h/s$$

Per $h > s$, si ha:
 $a = h/2r$ e $b = s/h$

4.9. Generalità sugli induttori con nuclei ferromagnetici

Per ottenere elevati valori dell'induttanza con ingombro modesto, si realizzano induttori con nucleo ferromagnetico; con questi induttori, inoltre, vi è la possibilità di variare entro un certo intervallo, mediante spostamento del nucleo rispetto agli avvolgimenti, la permeabilità e l'induttanza dell'induttore.

Se il nucleo è a *mantello* o a *colonne* (Fig. IX.4.11b), allora è costituito da lamierini al ferro silicio. Generalmente questi lamierini hanno forme ad E, ad I e ad L, con valori delle varie dimensioni normalizzate (Fig. IX.4.11a), e spessore di 0,35 mm o 0,5 mm e con isolamento ottenuto per ossidazione su entrambe le facce.

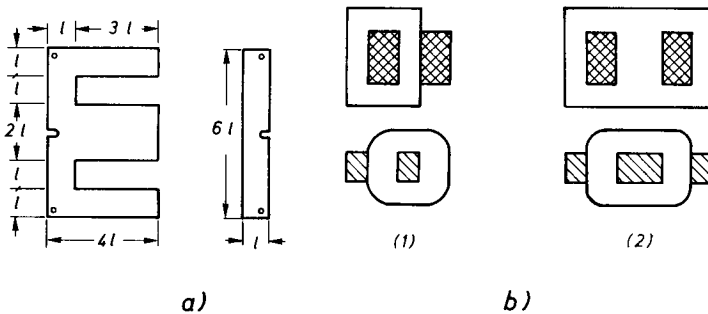


Fig. IX.4.11. a) Dimensioni dei lamierini al Fe-Si; b) tipi di nucleo: 1) a colonne, 2) a mantello.

Il nucleo è formato dall'impacchettamento dei lamierini, i quali vengono fissati mediante viti passanti; si realizzano nuclei a mantello con lamierini a E e a I e nuclei a colonne con lamierini ad L e ad I.

Altri tipi di nuclei sono quelli costituiti da granuli di polvere di ferro compressa: *nuclei sinterizzati*.

Se l'induttore con nucleo è attraversato da una corrente costituita dalla somma di una cc e di una ca, occorre dotare il nucleo di un conveniente traferro, per evitare che la componente continua della corrente determini una magnetizzazione elevata del nucleo. Il traferro è realizzato distanziando i giunti delle lamine che compongono il nucleo. Per

vari tipi di traferro si hanno diversi valori di induttanza; in Fig. IX.4.12c, è riportato l'andamento dell'induttanza in funzione dello spessore del traferro, per diversi valori della corrente continua I_c .

Con corrente continua e alternata, la presenza del nucleo, se da un lato aumenta il valore dell'induttanza, dall'altro introduce delle perdite d'energia dovute all'isteresi e alle correnti parassite che si aggiungono alle perdite nel filo conduttore. Le perdite per isteresi sono proporzionali alla frequenza e all'area racchiusa del ciclo d'isteresi; esse sono influenzate dalla saturazione del nucleo, causata dalla componente continua della corrente ed anche dalla presenza di correnti aventi frequenze diverse. Con frequenze diverse, se si sovrappongono magnetizzazioni ad alta e bassa frequenza, le perdite provocate dall'alta frequenza sono maggiori di quelle che si avrebbero in assenza della bassa frequenza, mentre le perdite provocate dalla bassa frequenza risultano minori di quelle che si avrebbero in assenza dell'alta frequenza (*effetto fluttuazione*). Le perdite per correnti parassite sono causate dalle correnti indotte nel nucleo per effetto delle variazioni di flusso; queste perdite sono indipendenti dalla saturazione del nucleo dovuta alla componente continua della corrente.

Per tener conto delle perdite si considera il circuito equivalente di Fig. IX.4.12a, dove

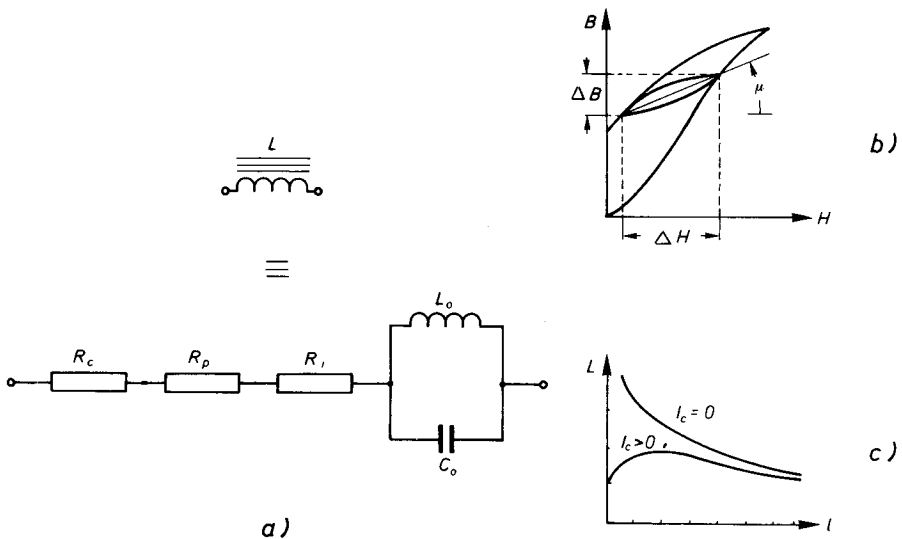


Fig. IX.4.12. a) Circuito equivalente di un induttore con nucleo magnetico; b) permeabilità incrementale; c) variazioni dell'induttanza in funzione del traferro.

R_p rappresenta la resistenza dovuta alle perdite per correnti parassite, R_i rappresenta le perdite per isteresi e R_c la resistenza ohmmica del filo conduttore.

Per i nuclei, costituiti da lamierini spessi h (cm), si ha:

$$R_p = 0,658 \cdot 10^{-8} \mu_M f X_L h^2 / \rho$$

con ρ : resistività del nucleo in Ωcm ; μ_M : permeabilità relativa massima del nucleo; $X_L = 2\pi fL$: reattanza dell'induttore.

Per i nuclei sinterizzati costituiti da granuli di diametro d (cm), si ha:

$$R_p = 197 \cdot 10^{-5} f X_L \frac{\mu_M}{\rho \left(\frac{V_n}{V_f} \right)^{\frac{1}{3}}} d^2$$

con V_n volume del nucleo e V_f volume totale dei granuli.

Per entrambi i tipi di nuclei si ha:

$$R_i = 425 \cdot 10^{-3} \left(1 - \frac{\mu_m}{\mu_M} \right) X_L$$

con μ_m : permeabilità del nucleo per H nullo; μ_M : permeabilità del nucleo con H massimo; X_L : reattanza dell'induttore.

La permeabilità dovuta alla presenza della corrente continua e alternata è detta permeabilità incrementale e il ciclo d'isteresi è quella di Fig. IX.4.12b, dove la permeabilità equivalente offerta dalla ca sovrapposta alla cc è proporzionale alla pendenza della linea che congiunge gli estremi del ciclo d'isteresi.

Il calcolo approssimato dell'induttanza (in henry) di un induttore con nucleo magnetico è dato dalla formula:

$$L = \frac{1,256 N^2}{\frac{l_f}{\mu_r s_f} + \frac{l_a}{s_a}} 10^{-6}$$

con N : numero delle spire; l_f : lunghezza del circuito magnetico del nucleo; l_a : lunghezza del circuito magnetico nel traferro; μ_r : permeabilità relativa del nucleo per l'induzione massima; s_f : sezione trasversale effettiva del nucleo; s_a : sezione equivalente del traferro ($s_a > s_f$).

La capacità propria dell'induttore, quando vi sono avvolgimenti a più strati, è dovuta principalmente alla capacità tra strato e strato.

4.10. Schermatura degli induttori

Per eliminare gli effetti di campi elettromagnetici esterni o per limitare in una circoscritta zona il campo magnetico prodotto da un induttore, si realizza un involucro, *schermo*, entro il quale si racchiude l'induttore. Per campi magnetici continui o di bassa frequenza si realizzano schermi con materiali magnetici ad alta permeabilità iniziale, mentre, per campi magnetici di alta frequenza si usano materiali metallici ad elevata conducibilità elettrica e lo spessore del materiale è inversamente proporzionale al valore

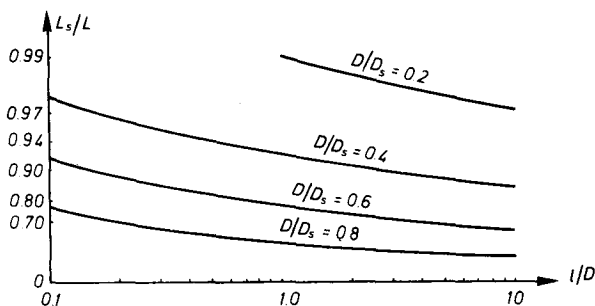


Fig. IX.4.13. Diagramma per determinare l'effetto dello schermo sull'induttanza (L_s : induttanza dell'induttore schermato, L : induttanza dell'induttore non schermato).

della frequenza da schermare. La schermatura introduce una diminuzione sia dell'induttanza L sia del fattore di merito Q dell'induttore. In Fig. IX.4.13, è riportato l'effetto dello schermo sull'induttanza in funzione del rapporto D/D_s , con D diametro dell'induttore non schermato e D_s diametro dello schermo (l è la lunghezza dell'avvolgimento).

4.11. Componenti ferromagnetiche

Sono componenti che immagazzinano energia magnetica, che viene mantenuta anche in assenza di tensione di alimentazione; questi componenti vengono chiamati *memorie magnetiche*. Esistono diversi tipi di memorie magnetiche che formano due classi: le memorie veloci, quali le memorie a nuclei magnetici, e le memorie di massa, quali le memorie a nastro, a tamburo.

A) Memorie veloci

1) Memorie a nucleo magnetico. Sono costituite da migliaia di nuclei magnetici di ferrite, di forma toroidale, di diametro compreso fra 0,1 e 1 mm, disposti su un piano, detto matrice (Fig. IX.4.14b).

Con riferimento alla Fig. IX.4.14a, un nucleo già magnetizzato può trovarsi in uno

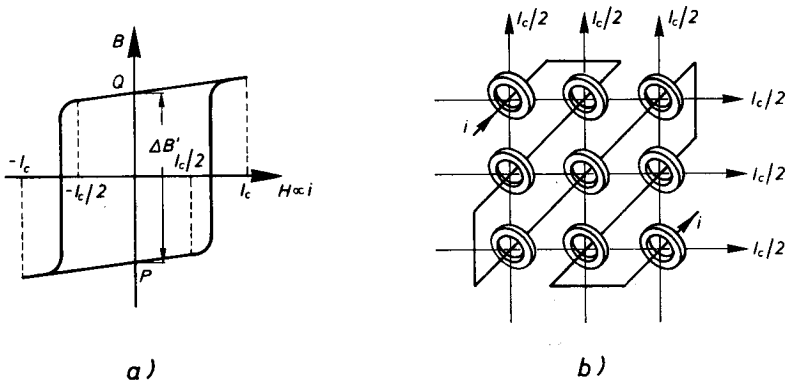


Fig. IX.4.14. a) Ciclo d'isteresi di una memoria magnetica; b) memoria magnetica.

dei due stati d'induzione residua corrispondenti ai punti P e Q ; a tale coppia di stati magnetici si associano i simboli 1 e 0. Il passaggio da uno stato (ad esempio P) all'altro (Q) d'induzione residua (commutazione) avviene facendo attraversare il nucleo da una corrente i che assume in successione i valori 0, I_c , 0; per riportare il nucleo allo stato iniziale la corrente i assume valori 0, $-I_c$, 0. La commutazione avviene per $i = I_c$ o $i = -I_c$.

Ogni singolo nucleo della memoria è attraversato da tre fili: una coppia di fili detti di selezione, che servono per accedere al singolo nucleo e un terzo filo, detto di lettura, concatenato a tutti i nuclei di un piano.

Ogni singolo filo di selezione è attraversato, con verso opportuno, da una corrente pari a $I_c/2$.

Se si vuole solo leggere il contenuto d'informazione di un nucleo, mediante un sistema di indirizzo codificato si fa passare solo per la coppia di fili x e y collegati al nucleo prescelto la corrente $I_c/2$; in tal modo il nucleo è attraversato dalla corrente $I_c = (I_{cx}/2) + (I_{cy}/2)$, con verso tale da consentire sempre una commutazione del nucleo. Con riferimento alla Fig. IX.4.14a, se il nucleo si trova nello stato P , I_c avrà valore positivo, e