

Tecnica d'impiego dei nuclei in ferrite a circuito chiuso

L'impiego dei nuclei in ferrite nelle bobine funzionanti ad alta e media frequenza consente di ridurre al minimo le dimensioni degli avvolgimenti, pur realizzando elevati valori induttivi, oltre che valori soddisfacenti del fattore di merito «Q».

L'articolo che segue, rilevato da Wireless World, chiarisce il metodo fondamentale di progettazione delle induttanze basate sul loro impiego, facilitando così il compito ai progettisti.

a cura di LUBI

Fin dall'inizio della sua esperienza, l'Autore di questo articolo si era interessato di radiotecnica, ed aveva affrontato varie volte il problema di far funzionare dei semplici ricevitori a cristallo: dal momento che abitava alla distanza di circa 50 km dal trasmettitore più vicino, che funzionava con la misera potenza di 2 kW, egli riteneva che le condizioni di ricezione fossero piuttosto inadeguate.

Di conseguenza, la progettazione delle bobine rimase per lui alquanto problematica per diversi anni. Uno dei motivi principali consisteva nel fatto che occorreva tener conto di variabili talmente numerose, che il calcolo risultava sempre complicato.

Per progettare una bobina a strato singolo, avente un'induttanza specifica, è infatti necessario partire dal diametro, dalla lunghezza dell'avvolgimento, e quindi calcolare il diametro del conduttore, il passo delle spire, ecc., prima di poterne calcolare il numero.

La maggiore difficoltà era il fatto che il primo tentativo portava sempre ad un risultato assurdo, per cui era sempre necessario tentare diverse volte, prima di ottenere un risultato accettabile. Anche in tal caso — comunque — rimanevano sempre seri dubbi che il risultato ottenuto fosse effettivamente corretto.

Nel caso delle bobine a strati multipli le cose erano ancora peggiori, se possibile, in quanto le dimensioni che potevano essere calcolate teoricamente erano raramente realizzabili in pratica.

In effetti, l'unico metodo pratico sembrava essere la realizzazione a caso di una bobina, per poi controllare con gli strumenti i risultati ottenuti, ed eseguire eventualmente dei calcoli.

La lettura dei dati tecnici relativi ai nuclei a scodellino è stata quindi di grande sollievo sotto questo aspetto: almeno, essi consentono di progettare un'induttanza con i calcoli relativi, e di ottenere un risultato quasi pari alle aspettative, almeno nella maggior parte dei casi.

Ciò premesso, conviene partire con una breve descrizione del materiale usato per l'allestimento di questi nuclei: è ben noto che — predisponendo un nucleo ferromagnetico all'interno di una bobina — se ne aumenta il valore auto-induttivo.

Tuttavia, il campo magnetico alternato provoca il manifestarsi di correnti parassite all'interno del nucleo, che assorbono energia all'indotto, e ne riducono il fattore di merito «Q». Tali perdite si manifestano prevalentemente a causa della bassa resistività intrinseca del materiale che costituisce il nucleo.

Queste perdite aumentano inoltre con l'aumentare della frequenza. Nei trasformatori è pratica comune ridurre l'entità realizzando il nucleo in materiale magnetico laminato, e separando le diverse lamelle tra loro con l'aggiunta di uno strato di carta sottile.

Più sottili sono i lamierini, minore è l'intensità delle correnti disperse, e maggiore risulta anche la frequenza con la quale il trasformatore può funzionare.

Tuttavia, è molto facile raggiungere un limite pratico molto rapidamente, per cui questo sistema, pur consentendo miglioramenti apprezzabili, non costituisce la risposta ideale nei confronti delle bobine adatte al funzionamento con frequenze molto alte.

Uno dei metodi più idonei per superare questi limiti imposti dai nuclei a struttura lamellare consiste nell'impiego di polvere di ferro pressata, costituita da particelle di ferro di dimensioni minime, o nell'impiego di qualsiasi altro tipo di materiale ferro-magnetico, sospendendo però le particelle in un mezzo isolante, e sottoposto ad un procedimento di stampaggio per ottenere la forma tipica del nucleo.

Con questo sistema si ottiene un efficace isolamento delle particelle l'una rispetto all'altra, riducendo contemporaneamente l'intensità delle correnti parassite che scorrono all'interno del nucleo, con la conseguenza però di ridurre anche l'effettiva permeabilità del nucleo stesso, che risulta pari ad un decimo o ancora meno di quella che si otterrebbe con un materiale omogeneo e compatto.

Ciò nondimeno, questi nuclei di polvere di ferro risultano molto utili con le radiofrequenze, non soltanto in quanto permettono di aumentare efficacemente l'induttanza della bobina, ma anche in quanto — quando vengono usati nella forma tipica detta a «scodellino» — tendono a delimitare il campo magnetico all'interno della bobina, costituendo quindi una sorta di schermaggio.

Nel caso di funzionamento con le frequenze molto alte, i nuclei realiz-

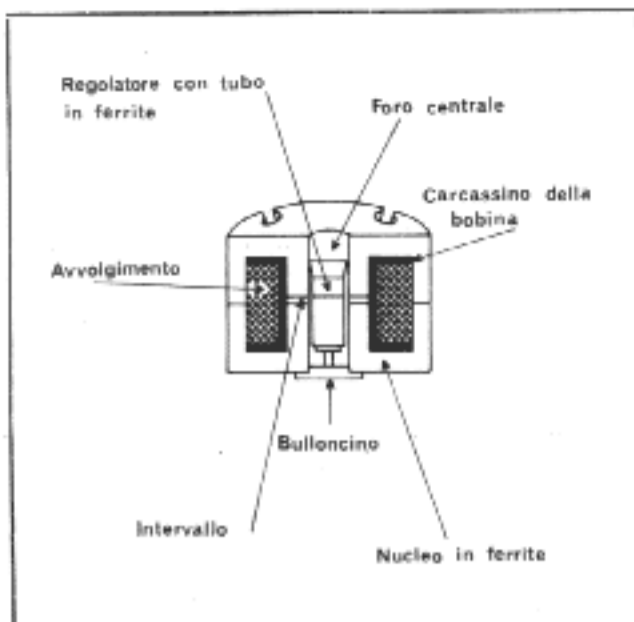


Fig. 1 - Disegno in sezione trasversale di un nucleo a scodellino, tracciato in modo tale da emettere in evidenza le caratteristiche costruttive interne.

zati in polvere di ferro risultano migliori dei nuclei in ferrite, sia sotto il punto di vista delle prestazioni, sia sotto il profilo economico. I metodi di progettazione che vengono qui di seguito descritti possono essere applicati anche ai nuclei in polvere di ferro.

A differenza di questi ultimi, i nuclei in ferrite vengono realizzati impiegando prevalentemente materiali non conduttori, che appartengono appunto alla famiglia delle ferriti. Queste ultime non sono altro che materiali refrattari di natura non metallica, costituiti da ossidi di ferro e da altri metalli, tra cui solitamente il cobalto, il rame, il manganese, il magnesio, il nichel o lo zinco.

I tipi di ferriti più importanti, o almeno di uso più comune, per la realizzazione dei nuclei a scodellino sono le miscele di manganese e zinco nonché di nichel e zinco. Durante i pro-

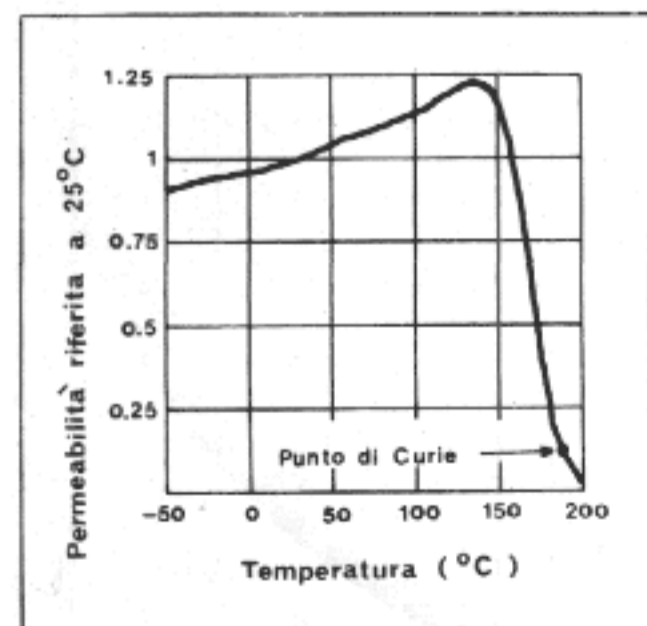


Fig. 2 - Grafico nel quale la curva rappresenta la variazione della permeabilità col variare della temperatura, nei confronti di un tipo di ferrite adatto all'impiego nei circuiti a bassa frequenza.

cedimenti di fabbricazione, le percentuali corrette dei relativi ossidi vengono miscelate tra loro, in modo che risultino uniformemente distribuite. In seguito, questa polvere viene stampata nella forma desiderata tramite una pressa, e gli oggetti che in tal modo vengono prodotti vengono sottoposti ad un trattamento termico, nella gamma di temperature compresa tra 1.000 e 1.300 °C.

Durante questo procedimento si verificano particolari reazioni chimiche, e — quando il nucleo in tal modo ottenuto si raffredda fino a tornare alla temperatura ambiente — risulta duro e rigido.

Questo procedimento termico, detto anche di sinterizzazione, è molto critico, in quanto le proprietà intrinseche del nucleo magnetico che si ottiene dipendono in forte misura appunto dai valori della temperatura, e dalla durata del periodo di tempo di «cottura».

Le strutture geometriche ottenute con questo procedimento subiscono un «ritiro» molto pronunciato (compreso tra il 20 ed il 25%) durante la «cottura», e — dal momento che la ferrite risulta molto dura agli effetti delle ulteriori lavorazioni — è importante che la densità del materiale stampato risulti corretta prima del trattamento termico, in quanto le eventuali correzioni successive risulterebbero molto costose.

I nuclei usati per l'allestimento delle bobine vengono definiti col termine di «soffici». In questo caso specifico, il termine non significa che il materiale risulta morbido, bensì che il nucleo non rimane magnetizzato in modo apprezzabile dopo l'estinzione del campo magnetico ad esso applicato. Praticamente, il significato è analogo a quello del «ferro dolce» che si usa per definire il materiale con cui si realizzano le espansioni polari dei magneti, che — a loro volta — perdono quasi completamente la magnetizzazione quando la sorgente di energia magnetica viene allontanata.

Per l'impiego nel campo delle induttanze, i nuclei a scodellino vengono realizzati solitamente nella forma tipica illustrata alla figura 1. Le superfici che si appoggiano l'una contro l'altra sono perfettamente levigate e lucide, in modo che l'intervallo di aria risulta ridotto al minimo.

L'effettiva permeabilità del materiale fondamentale del nucleo risulta dell'ordine di 2.000 per le ferriti per impieghi nella bassa frequenza, e si riduce ad un valore pari a 100 nel caso delle frequenze elevate.

Questa permeabilità fondamentale è però molto sensibile alle variazioni di temperatura, e — sotto questo aspetto — il grado di sensibilità dipende dalla composizione tipica della ferrite.

Normalmente, la permeabilità aumenta in modo pressoché stabile con l'aumentare della temperatura, fino ad un punto critico, oltre il quale diminuisce invece rapidamente, fino al punto di Curie, come risulta dal grafico di figura 2.

Il punto di Curie viene generalmente definito in funzione della temperatura per la quale la permeabilità si riduce al 10% del suo valore massimo, e — in linea di massima — si trova nella gamma compresa tra 150 e 200 °C per la maggior parte delle ferriti, sebbene alcune di esse presentino un punto di Curie che raggiunge la temperatura di 500 °C.

Per le induttanze, i nuclei vengono solitamente modificati molando il corpo cilindrico centrale, allo scopo di creare artificialmente un intervallo di aria lungo il percorso magnetico.

La permeabilità di lavoro di questi nuclei, dopo il procedimento di produzione, dipende dalla larghezza di questo intervallo, che conferisce all'intero nucleo altre due proprietà interessanti, e precisamente:

- In primo luogo, il coefficiente di temperatura risulta notevolmente ridotto, in quanto dipende in tal caso in maggior misura dalle dimensioni fisiche del nucleo. Quindi, è possibile specificare i coefficienti di temperatura di vari tipi di nuclei, con notevole precisione.
- In secondo luogo, regolando la posizione del corpo di ferrite in modo che esso costituisca un ponte lungo l'intervallo citato, è possibile regolare la permeabilità di lavoro del nucleo, e quindi variare l'induttanza della bobina su di esso avvolta.

Come è possibile presumere, i nuclei con intervallo molto ridotto (ossia ad alta permeabilità) presentano una gamma di regolazione minore di quelli che denotano invece un intervallo più largo, sebbene nessuno di essi presenti una gamma di variazione molto estesa (di solito compresa tra il 5 ed il 25%).

Nei primi tipi di nuclei, il dispositivo di regolazione non era incorporato nel nucleo, per cui era necessario da parte del costruttore della bobina molare il nucleo in modo da ottenere il valore induttivo necessario. Questo effetto veniva realizzato strofinando il nucleo contro tela smerigliata molto

sottile, ma facendo anche molta attenzione a mantenere perfettamente piatte le superfici.

Il metodo è stato citato in quanto viene ancora sfruttato quando un'induttanza si trova appena al di fuori della sua gamma di funzionamento. Tuttavia, non risulta consigliabile attualmente in quanto i nuclei possono rompersi facilmente a causa del surriscaldamento che deriva da un attrito eccessivo nei confronti della tela smerigliata.

Per ottenere prestazioni ripetibili e stabili, è essenziale che le due metà del nucleo a scodellino siano adeguatamente bloccate l'una contro l'altra. A tale riguardo la maggior parte dei fabbricanti fornisce anche eccellenti sistemi di bloccaggio, sebbene l'impiego dell'Araldite, ad esempio, costituisce un metodo abbastanza efficace.

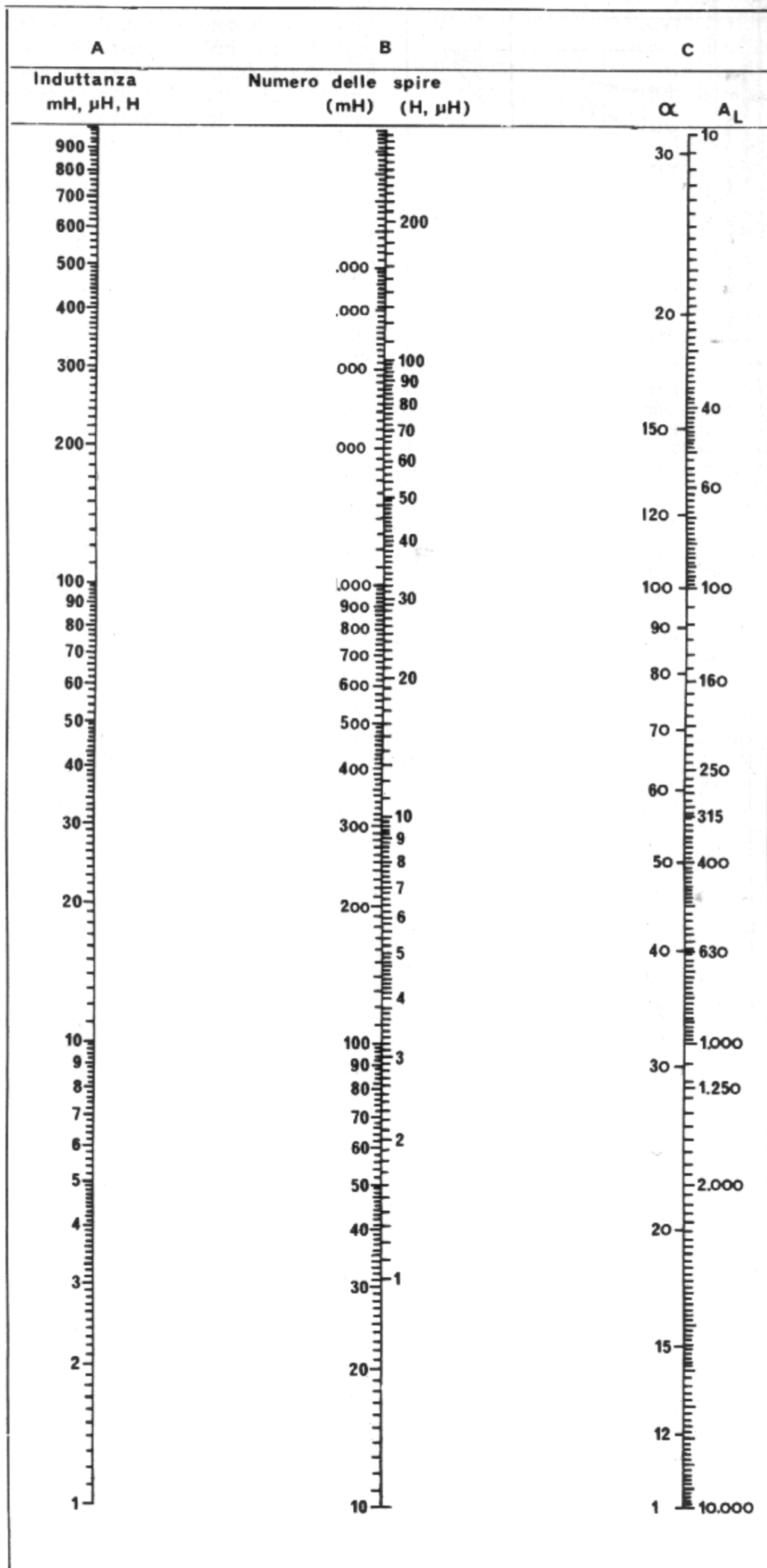
I nuclei vengono di solito realizzati in componenti accoppiati, ed è quindi meglio tenere le diverse coppie unite, allo scopo di evitare di scambiare pezzi da una coppia all'altra. Se le metà assorbite venissero miscelate tra loro, l'assortimento adeguato alle esigenze risulterebbe problematico e soprattutto noioso.

LE PERDITE NEL NUCLEO

Le perdite che si verificano nei nuclei in ferrite appartengono a tre tipi principali: si riscontrano infatti perdite per isteresi, perdite per correnti di Foucault, e perdite per magnetizzazione residua. Vediamo di analizzarle separatamente.

Le perdite per isteresi sono normalmente di minima entità rispetto alle perdite di altro tipo, e — con bassi livelli di pilotaggio — possono essere completamente ignorate. Nel funzionamento con segnali ad alto livello —

Fig. 3 - Per calcolare il numero delle spire necessarie per costruire una bobina con l'aiuto di questo abaco, è sufficiente appoggiare un righello in posizione trasversale, in modo da unire tra loro il punto relativo all'induttanza necessaria (sulla scala «A») con il punto corrispondente al valore di A_L oppure quello del fattore « α » (sulla scala «C») relativi al nucleo usato. Il numero delle spire viene letto sulla scala centrale (B). Si noti che per i valori induttivi espressi in micro-Henry occorre usare il lato destro delle scale A e B. Per i valori induttivi espressi in milli-Henry occorre usare il lato sinistro delle medesime scale. Per valori induttivi espressi in Henry usare le medesime scale suggerite per i valori in micro-Henry, moltiplicando però il numero delle spire ottenute per il fattore fisso 1.000.



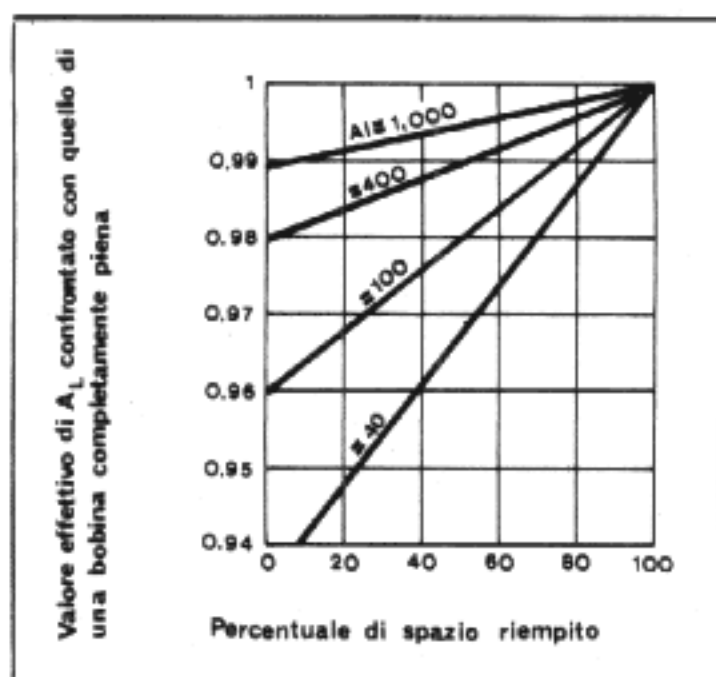


Fig. 4 - La famiglia di curve qui rappresentata denota in quale misura il fattore di induzione varia col variare del grado di riempimento dello spazio disponibile in un nucleo a scodellino da 18 mm. I nuclei di altre dimensioni presentano variazioni analoghe.

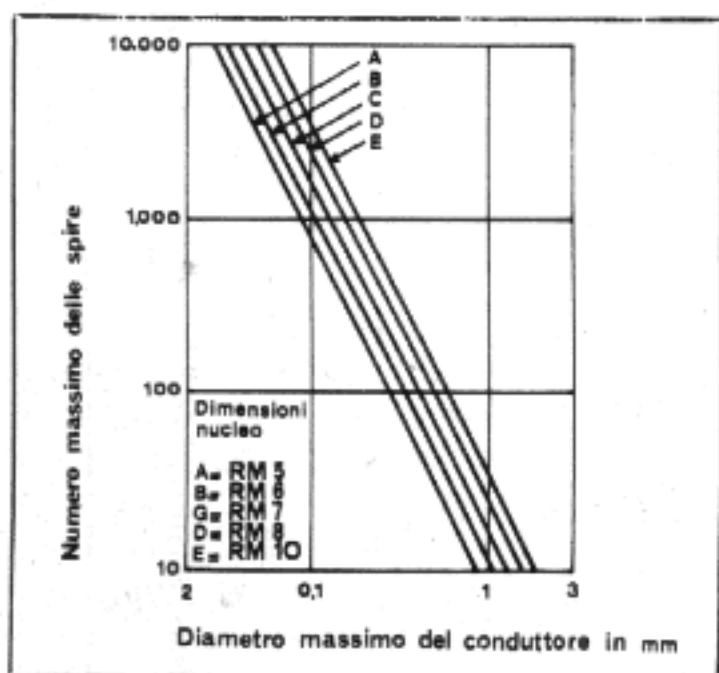


Fig. 5-A - Curve esprimenti il rapporto tra il massimo numero delle spire ed il diametro globale del conduttore in millimetri, riferito a nuclei a struttura rotonda delle dimensioni precisate nel rettangolo inferiore di sinistra.

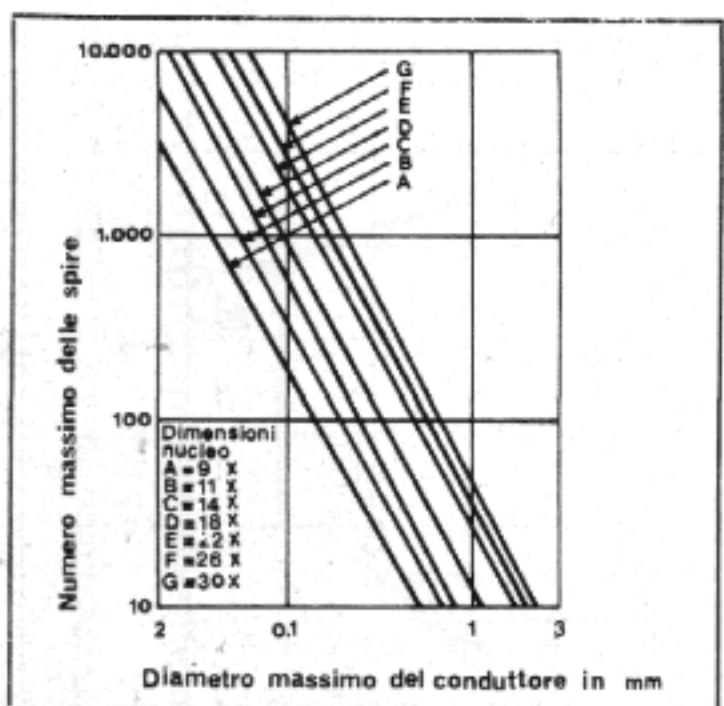


Fig. 5-B - Altra famiglia di curve relative però ad altri tipi di nuclei, della categoria denominata «rectangular module», nei modelli precisati in basso a sinistra. Le lettere dell'alfabeto che precedono i modelli sono riferite al codice di identificazione delle curve, come nel grafico di figura 5-A.

tuttavia — le perdite di questo genere possono contribuire a creare un effetto indesiderabile, che si presenta sotto forma di distorsione non lineare, principalmente per terza armonica.

Il grado di distorsione dipende dalla densità del flusso, e può essere previsto attraverso appositi calcoli: normalmente, questo effetto è trascurabile, ma — in alcune applicazioni in bassa frequenza — può raggiungere un livello ragguardevole.

Il rimedio consiste sia nel far funzionare il nucleo con un livello di potenza minore, sia nell'impiegare nuclei di maggiori dimensioni (il che è praticamente la medesima cosa).

Per quanto riguarda le perdite per correnti di Foucault, dette anche in inglese «Eddy currents» esse dipendono prevalentemente dalla resistività intrinseca del materiale che costituisce il nucleo. Di conseguenza, nella maggior parte dei tipi di ferrite queste perdite sono di piccola entità, per cui si confondono di solito con le perdite per magnetizzazione residua.

Esistono però delle eccezioni nelle quali queste correnti risultano in risonanza rispetto alle dimensioni del nucleo con le frequenze molto elevate. La discussione di questi fenomeni esula comunque dallo scopo che si desidera ottenere con la stesura di questo articolo.

Le perdite per magnetizzazione residua — infine — dipendono dalla composizione della ferrite, e variano in modo piuttosto notevole. Queste perdite dipendono anche dal valore della frequenza, e di solito aumentano in modo relativamente lento fino ad un valore critico della frequenza, oltre il quale aumentano in modo preoccupante.

Di conseguenza, il tipo di ferrite determina il valore delle frequenze limite di funzionamento di una bobina.

LE PERDITE NELL'AVVOLGIMENTO

Le perdite che si manifestano lungo l'avvolgimento sono molto più apprezzabili nelle bobine con nucleo in ferrite che non nelle bobine sprovviste di nucleo, in quanto — in aggiunta al ben noto effetto pellicolare — esistono anche le perdite per le correnti di «Foucault» che si manifestano nel conduttore, provocate dagli effetti della prossimità tra le spire.

Ciò significa che il fattore di merito «Q» di un'induttanza dipende anche dal tipo di conduttore che viene usato, come pure dalle perdite nel nucleo.

In genere, i conduttori di tipo solido permettono di ottenere un valore massimo del fattore di merito «Q» con frequenze molto più basse dei conduttori a fili multipli. In questo campo specifico, un noto fabbricante ha potuto stabilire quanto segue:

- Con conduttori a filo singolo, il valore massimo del fattore «Q» è risultato pari a 200 alla frequenza di 20 kHz (con valori induttivi compresi tra 10 e 100 mH)
- Con conduttori a fili multipli smaltati da 0,06 mm, il valore massimo del fattore di merito «Q» è risultato pari a 600 alla frequenza di 150 kHz (con valori induttivi compresi tra 0,2 ed 1 mH)
- Con conduttori multipli da 0,04 mm il fattore di merito «Q» è risultato pari a 700 alla frequenza di 200 kHz (con valore induttivo compreso tra 0,2 ed 1 mH).

Le informazioni di questo genere vengono solitamente comprese nei dati tecnici forniti dai fabbricanti dei vari tipi di nuclei, che di solito riportano le curve tipiche ISO-«Q», sebbene tali dati vengano di solito forniti anche sotto forma tabulare.

La parola «tipico» non va intesa però nel suo significato letterale: in realtà, essa definisce un risultato che è stato ottenuto «almeno una volta».

In ogni caso — tuttavia — il valore quotato per il fattore di merito «Q» può essere preso in considerazione rispetto alle condizioni ideali, quando cioè tutti gli altri dettagli sono completamente sotto controllo.

Si rammenti comunque che, anche se il suddetto fattore di merito risulta inferiore a quello previsto, esso risulta in ogni caso molto più alto di quello che sarebbe stato possibile ottenere con una bobina normale priva di nucleo, e — naturalmente — col vantaggio supplementare che le dimensioni della bobina risultano molto minori.

CONCETTI FONDAMENTALI DI CALCOLO

Il calcolo del numero delle spire necessarie per ottenere un particolare valore induttivo è molto facile, in quanto i fabbricanti dei nuclei forniscono nei dati tecnici o il valore di A_L (fattore di induzione), oppure il fattore α (fattore spire). Questi valori possono essere definiti come segue:

A_L (fattore di induzione) - Rappresenta la cosiddetta autoinduttanza, espressa in nano-Henry), che una bobina avvolta sul nucleo presen-

terebbe se fosse costituita da un'unica spira. Sussiste quindi la formula che segue:

$$A_L = L : N^2$$

oppure

$$N = \sqrt{L : A_L}$$

nelle quali

L = induttanza in nH

N = numero delle spire

Il simbolo « α » (a volte sostituito dai simboli C oppure K) rappresenta il fattore spire, vale a dire il numero delle spire necessarie per una bobina avvolta su quel nucleo, per fornire l'induttanza di 1 mH.

Sussistono quindi le formule che seguono:

$$\alpha = N : \sqrt{L}$$

oppure

$$N = \alpha \sqrt{L}$$

nelle quali

L = induttanza in mH

N = numero delle spire

Per meglio comprendere il sistema di progettazione di una bobina, facciamo un esempio pratico: supponia-

mo infatti di dover realizzare un'induttanza che presenti un valore di 9 mH. Se il nucleo sul quale essa deve essere avvolta presenta un valore di A_L pari a 400, oppure un valore di « α » pari a 50, in tal caso avremo le seguenti due possibilità:

$$\begin{aligned} N &= \sqrt{0 \times 10^6 / 400} \\ &= 3 \times 10^3 / 20 \\ &= 150 \end{aligned}$$

La bobina dovrà quindi presentare in totale 150 spire.

La seconda possibilità è la seguente:

$$\begin{aligned} N &= 50 \times \sqrt{9} \\ &= 50 \times 3 \\ &= 150 \end{aligned}$$

Anche in questo caso la bobina presenta dunque un totale di 150 spire

L'abaco di **figura 3** costituisce una semplice alternativa al metodo di calcolo per determinare il numero delle spire. Basta infatti disporre di un righello, ed appoggiarlo in modo da attraversare il grafico orizzontalmente o in direzione obliqua, tanto da unire il valore di A_L oppure quello di « α »

sulla scala di destra con il valore dell'induttanza necessaria, rilevabile sulla scala di sinistra, per leggere quindi il numero delle spire necessarie sulla scala centrale.

Normalmente, i fattori di avvolgimento forniti dal fabbricante nell'elenco dei dati si riferiscono ad una bobina avvolta in modo tale che essa riempia una determinata percentuale dello spazio disponibile per l'avvolgimento.

La **figura 4** è un grafico che mette in evidenza il tipo di variazioni che è possibile prevedere con un determinato tipo di nucleo. In genere, si noterà che con valori elevati della permeabilità (ossia nei casi in cui l'intervallo d'aria lungo il percorso magnetico è minimo) il grado di riempimento della bobina esercita un effetto trascurabile sul fattore spire. D'altro canto, con nuclei a minor permeabilità (quando cioè l'intervallo d'aria è piuttosto pronunciato) il fattore di riempimento risulta più importante.

Questo effetto particolare è provocato dalle condizioni in cui si trova

il campo magnetico lungo l'intervallo. E' buona pratica — tuttavia — scegliere un diametro del conduttore che permetta di riempire completamente o quasi lo spazio disponibile, nel modo migliore possibile. Ciò consente di ottenere il valore minimo della resistenza alla corrente continua, unitamente al valore più elevato del fattore di merito «Q».

Molti fabbricanti di nuclei forniscono tabelle o grafici che illustrano il numero delle spire con le quali è possibile riempire completamente i diversi nuclei. Ora che è stato raggiunto un certo grado di standardizzazione nei tipi di nuclei, risulta possibile preparare dei grafici relativi agli avvolgimenti che consentono applicazioni praticamente universali.

Ad esempio, la **figura 5-A** rappresenta i dati di avvolgimento per i nuclei aventi le dimensioni elencate nel rettangolo in basso a sinistra dello stesso grafico, in riferimento alle curve identificate dalle lettere dell'alfabeto comprese tra A ed E. Il grafico di **figura 5-B** fornisce i medesimi tipi di dati per nuclei del tipo «r.m.» (rectangular module).

Il numero delle spire che possono essere installate all'interno di ciascun nucleo è naturalmente nominale, per cui è in genere più sicuro usare una sezione del conduttore leggermente più sottile di quella suggerita dal grafico.

Fino ad ora, la standardizzazione può essere riferita soltanto alle specifiche delle dimensioni dei nuclei e dei supporti, nonché al valore di A_L . Nulla si dice dei sistemi di bloccaggio, dei metodi per l'esecuzione dei terminali, o dei dispositivi di regolazione dell'induttanza, almeno per quanto si sa fino ad ora.

Questi dati, anche se a volte vengono specificati, sono purtroppo molto spesso completamente ignorati. In genere, i fabbricanti più esperti producono esemplari abbastanza compati-

bili tra loro, ma non sempre si può affermare la medesima cosa nei confronti dei nuclei prodotti da altri fabbricanti ancora. Ciò significa che è necessario studiare tipi alternativi di nuclei con molta cura, prima di accettare degli esemplari come equivalenti di altri.

All'inizio di questo articolo ci siamo riferiti al coefficiente di temperatura in rapporto alla permeabilità: ovviamente, questo coefficiente esercita una certa influenza sulla stabilità dell'induttanza infinita.

In pratica esistono uno o due argomenti che devono essere controllati con cura, quando si desidera ottenere la massima stabilità possibile. Essi consistono nel movimento della bobina all'interno del nucleo, che può provocare variazioni lievi di induttanza, e quindi rende eventualmente necessario il fissaggio dell'avvolgimento all'interno dello scodellino. Analogamente, il movimento di alcune spire individuali della bobina possono essere causa di fenomeni di instabilità. Di conseguenza, è utile anche impregnare la bobina prima del montaggio.

In pratica, se l'umidità penetra all'interno della bobina può essere causa di una diminuzione del fattore di merito «Q», e questo è un altro motivo per il quale è utile il procedimento di impregnazione.

Se esso viene svolto con la bobina inserita nel nucleo, occorre adottare particolari precauzioni affinché il dispositivo di regolazione dell'induttanza rimanga accessibile, ed anche affinché esso risulti ancora mobile dopo il procedimento stesso.

Se da un canto l'umidità non influisce sulla permeabilità del nucleo in se stesso, in modo apprezzabile, può influenzare il sistema di regolazione dell'induttanza, per cui è utile eseguire un controllo al riguardo. In linea di massima, i dispositivi di regolazione che consistono in un tubetto di ferrite adattato ad un manicotto in plastica con un foro centrale da avvitare contro una vite di ottone sono i migliori.

Un altro punto da considerare è un fenomeno noto come «disaccomodamento». Si tratta di una modifica temporanea della permeabilità, che si manifesta se il nucleo viene sottoposto ad un urto meccanico o ad una forte variazione di temperatura. Tuttavia, a patto che la regolazione finale dell'induttanza venga effettuata almeno ventiquattro ore dopo tale fenomeno, l'effetto non può essere preoccupante.