

L'organo preposto alla trasformazione di energia elettrica a bassa frequenza in energia sonora è detto *riproduttore elettroacustico*. Esistono due tipi di riproduttore: la *cuffia telefonica* e l'*altoparlante*.

La cuffia è adatta per segnali molto deboli e funziona secondo il principio spiegato al paragrafo 57. Essa si compone di due auricolari uguali, tenuti assieme da un sostegno metallico

flessibile che viene messo sul capo. Uno di questi auricolari è mostrato in (a) di fig. 84. Gli avvolgimenti relativi ai due magneti (uno per auricolare) sono disposti in serie. La loro

resistenza totale, per i modelli usati in radio, varia da 2000 a 4000 ohm. L'impedenza totale è di circa 2000Ω a 1000 p/s.

L'altoparlante viene usato in tutti i casi nei quali la potenza BF disponibile è rilevante, ossia è superiore ad almeno 0,5 watt. Sono stati costruiti finora vari tipi di altoparlante, ma quelli attualmente più diffusi sono l'*elettrodinamico* ed il *magnetodinamico*. Entrambi questi altoparlanti funzionano con il medesimo principio e si distinguono soltanto per il modo come è ottenuto il campo magnetico fisso. Il primo comprende un elettromagnete eccitato da una corrente c. c. esterna, il secondo dispone invece di un magnete permanente in lega di ferro al nichel-alluminio ed al nichel-alluminio-cobalto (Alnico).

L'altoparlante dinamico è illustrato in (b) di fig. 84. Esso comprende, fra l'altro, un telaietto metallico o *cestello* circolare che regge perifericamente una membrana di carta, fibra o impasto di cellulosa, a forma troncoconica. Alla base minore della membrana è incollato un corto tubo, pure di carta, avente qualche centimetro di diametro. At-

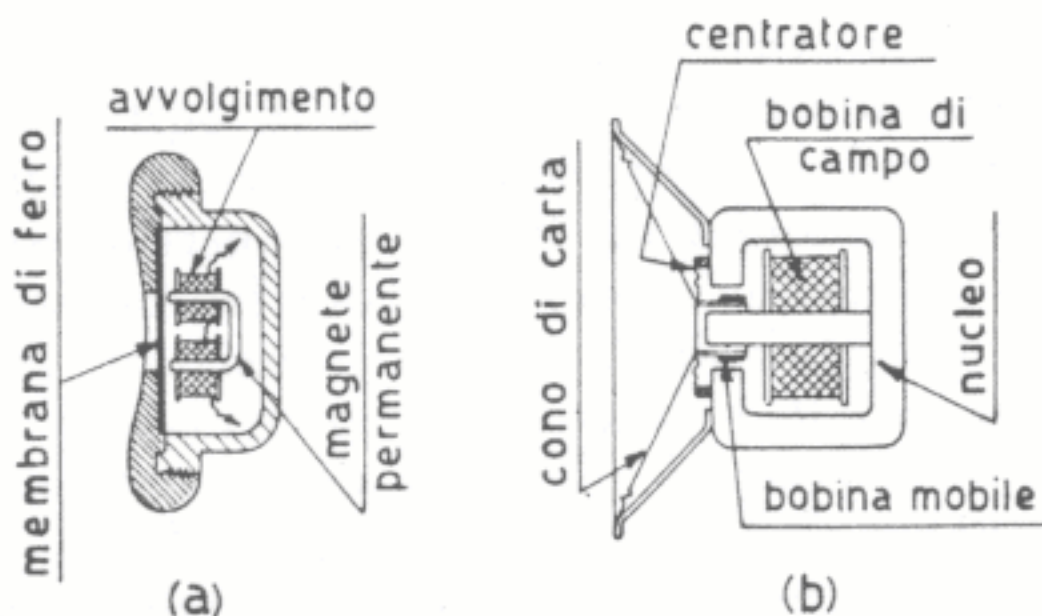


Fig. 84. - Riproduttori elettroacustici: (a) cuffia; (b) altoparlante.

torno al tubo, che funziona da supporto, sono avvolte alcune spire di filo sottile di rame le quali costituiscono la cosiddetta *bobina mobile*.

L'attaccatura della membrana al telaietto è fatta in modo da permettere un piccolo movimento assiale della bobina. La stessa bobina è disposta in uno stretto spazio anulare del magnete, ed è centrata in questo spazio in modo da non incontrare attriti.

Il funzionamento è il seguente: quando si fa circolare nella bobina mobile una corrente alternata, si produce attorno ad essa un campo magnetico alternativo il quale, reagendo col campo costante del magnete, genera una vibrazione della membrana. A questa vibrazione corrisponde un suono della stessa frequenza della corrente alternata.

La bobina mobile ha una resistenza elettrica compresa fra 2 e 15 ohm. La sua impedenza ha un andamento del

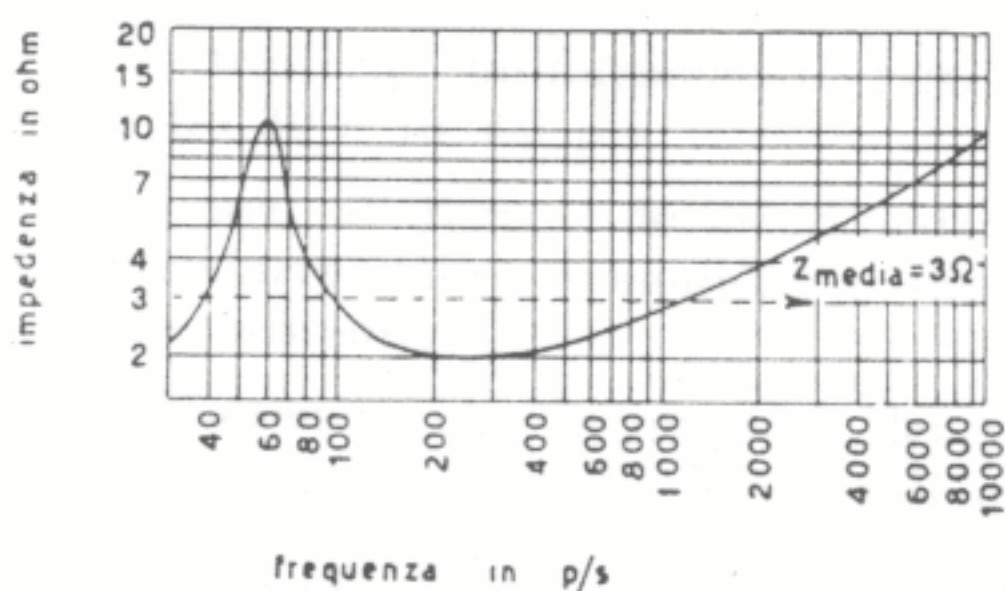


Fig. 85. - Impedenza di una bobina mobile in funzione della frequenza.

tutto particolare che può essere dedotto dalla curva di figura 85 relativa ad un altoparlante di medie dimensioni. Tale impedenza raggiunge un massimo ad una frequenza normalmente compresa fra 50 e 200 p/s (frequenza di risonanza del sistema vibrante, maggiore negli altoparlanti più piccoli), si mantiene pressoché costante oltre questi valori e fino a 1000 ÷ 2000 p/s, ed infine cresce linearmente col crescere della frequenza. In pratica l'impedenza di un altoparlante dinamico è valutata alla frequenza di 400 p/s e viene considerata approssimativamente costante ed equivalente a circa 1,5 volte la resistenza della bobina mobile.

Negli altoparlanti elettrodinamici esiste una seconda bobina, chiamata *bobina di campo*, che è sistemata attorno alla parte centrale del nucleo di ferro, come si può notare

dalla fig. 84. L'avvolgimento di questa bobina è di solito inserito nel circuito di livellamento del rettificatore, il quale così provvede, oltre all'alimentazione della corrente anodica del radoricevitore, anche all'eccitazione del campo dell'altoparlante. Nello stesso tempo la detta bobina è utilizzata come induttore di filtro per il livellamento.

Il numero delle spire ed il diametro del filo della bobina di campo sono proporzionati all'intensità della corrente c. c. circolante ($50 \div 70$ mA per un ricevitore standard a 5 valvole) in modo da produrre una sufficiente intensità di campo ed un riscaldamento non eccessivo dell'avvolgimento. Per ogni tipo di altoparlante elettrodinamico è stabilito un adatto valore delle amperspire. A corrente circolante maggiore corrisponde quindi un minor numero di spire, ma la sezione del filo deve essere aumentata in modo da mantenere invariato il volume dell'avvolgimento.

La potenza c. c. occorrente all'eccitazione di una bobina di campo è di norma circa due volte la potenza elettroacustica che l'altoparlante può sopportare. Tale potenza c. c. è stabilita dal prodotto I^2R , in cui I è la corrente che circola nell'avvolgimento ed R la resistenza ohmica di questo. Se la bobina è disposta in serie al carico di un rettificatore, nel determinare le caratteristiche del trasformatore di alimentazione occorre tener conto della caduta RI da essa provocata.

Per evidenti motivi di economia e semplicità costruttiva, l'altoparlante elettrodinamico va scomparendo dopo l'avvento delle nuove leghe magnetiche usate nei moderni altoparlanti magnetodinamici.

86 Il trasformatore d'uscita.

Fra la valvola finale di un radoricevitore ed il riproduttore dei suoni è interposto, di solito, un trasformatore di bassa frequenza chiamato *trasformatore d'uscita*. Quando la valvola è di piccola potenza ed il riproduttore è una cuffia (caso di un apparecchio per servizio radiotelegrafico), il trasformatore ha piccole dimensioni e rapporto spire N_p/N_s compreso nei valori $1 \div 2$. Quando la valvola è di notevole potenza, ed il riproduttore è un altoparlante, tale trasformatore ha dimensioni variabili a seconda della po-

tenza, e rapporto spire strettamente dipendente dalla resistenza di carico del tubo e dall'impedenza della bobina mobile dell'altoparlante.

Mentre nel caso di uscita in cuffia il trasformatore ha poca importanza per il fatto che dalla cuffia si esige solo una buona intelligibilità intorno a 1000 p/s, nel caso di uscita in altoparlante il trasformatore deve rispondere invece a determinati requisiti elettrici onde assicurare una buona trasduzione delle correnti variabili di placca; le quali correnti, come è noto, possono avere tutte le frequenze della gamma acustica.

Gli strumenti musicali ed il canto umano producono suoni le cui frequenze fondamentali sono comprese fra circa 30 e 4000 p/s. Però tutti i suoni sono accompagnati e distinti dalle loro armoniche (timbro), cosicché una perfetta riproduzione di essi richiede che l'apparecchiatura riprodotrice sia in grado di:

1) trasferire uniformemente tutti i segnali con frequenza fra 30 e 16.000 p/s.

2) non alterare le forme d'onda dei segnali, ossia non introdurre nuove armoniche o modificare i rapporti di quelle esistenti;

3) ottenere che le intensità dei vari segnali riprodotti siano uguali a quelle dei segnali originari.

Trascurando il terzo punto che ha relativa importanza, rimangono gli altri due che possono essere soddisfatti più o meno bene nella pratica.

Dicesi comunemente *distorsione d'ampiezza* l'alterazione della forma d'onda che una valvola può dare in conseguenza dell'errata scelta del suo punto di lavoro (negativo di griglia), dell'eccessiva ampiezza del segnale eccitatore, o dall'imperfetta linearità della curva per caratteristica mutua. La distorsione che invece deriva dalla diversa amplificazione di alcune frequenze rispetto ad altre è chiamata *distorsione di frequenza* (oppure *distorsione d'ampiezza in relazione alla frequenza*). La non corrispondenza fra il contenuto di armoniche del suono riprodotto e quello del suono originario è detta *distorsione per armoniche*. Le due ultime forme di distorsione riguardano particolarmente

te l'organo traslatore fra valvola finale ed altoparlante, cioè il trasformatore di uscita.

Circa la distorsione di frequenza, che è più facile a verificarsi, c'è da osservare che per ottenere una eccellente riproduzione non è indispensabile trasmettere tutte le frequenze fra 30 e 16.000 p/s. In generale si ritiene soddisfacente riprodurre uniformemente solo le frequenze comprese fra 90 e 8.000 p/s. S'intende che le frequenze estranee a questa gamma siano soppresse o molto attenuate.

Perché un trasformatore d'uscita possa dare un'ottima resa di potenza, e contemporaneamente possa permettere una buona qualità di riproduzione, occorre che sia progettato in modo da avere i seguenti requisiti:

a) elevata induttanza primaria allo scopo di non attenuare i segnali appartenenti alle frequenze più basse;

b) rapporto spire N_p/N_s adatto a trasferire in placca della valvola il giusto carico di lavoro consigliato dal costruttore;

c) conveniente dimensionamento del nucleo e dei conduttori che costituiscono gli avvolgimenti in relazione alla potenza da trasferire;

d) opportuna disposizione degli avvolgimenti per ridurre la capacità reciproca e le induttanze disperse. Ciò ha lo scopo di contenere entro valori accettabili la distorsione di frequenza e la non linearità alle frequenze più elevate.

Il requisito di cui al punto a) è ottenuto tenendo elevati, per quanto possibile, il numero delle spire primarie e la sezione del nucleo (preferibilmente quest'ultima). Stabilita una certa frequenza minima da amplificare, detta *frequenza inferiore di taglio*, si cerca di realizzare una induttanza primaria che a tale frequenza crei una reattanza almeno uguale alla resistenza di carico anodico dello stadio finale. L'attenuazione che così si introduce alla frequenza di taglio è di circa il 30% (nei buoni trasformatori si ottengono attenuazioni molto minori facendo la reattanza primaria due o tre volte maggiore della resistenza di carico).

Si ricordi che nel caso di stadio asimmetrico (una sola valvola o più valvole in parallelo) esiste nel nucleo un forte campo magnetizzante c. c. prodotto dalla corrente di ri-

poso della placca. Per evitare la saturazione del nucleo che potrebbe derivare da tale campo, è necessario introdurre nel circuito magnetico un piccolo intraferro. Il trasformatore di uscita di uno stadio asimmetrico può allora essere considerato, almeno per quanto riguarda il primario, come una induttanza di bassa frequenza percorsa dalla corrente media di placca.

Il rapporto spire accennato in *b*) è imposto dalla necessità di adattare il carico connesso al secondario (solitamente l'impedenza media della bobina mobile dell'altoparlante) al carico di placca richiesto dallo stadio finale. Chiamando Z_b il primo ed R_a il secondo, e trascurando sia le resistenze degli avvolgimenti che la resistenza equivalente di perdita del nucleo, si può dire che alle frequenze centrali tale adattamento è realizzabile con un rapporto spire:

$$n = \frac{N_p}{N_s} = \sqrt{\frac{R_a}{Z_b}}$$

Il requisito di cui al punto *d*) viene raggiunto in vari modi che generalmente complicano la costruzione del trasformatore e ne aumentano il costo. Si possono comunque ottenere risultati soddisfacenti semplicemente scomponendo l'avvolgimento primario in due o più sezioni, ed intercalando tra queste il secondario. La fig. 86 mostra due semplici sistemi di tale scomposizione.

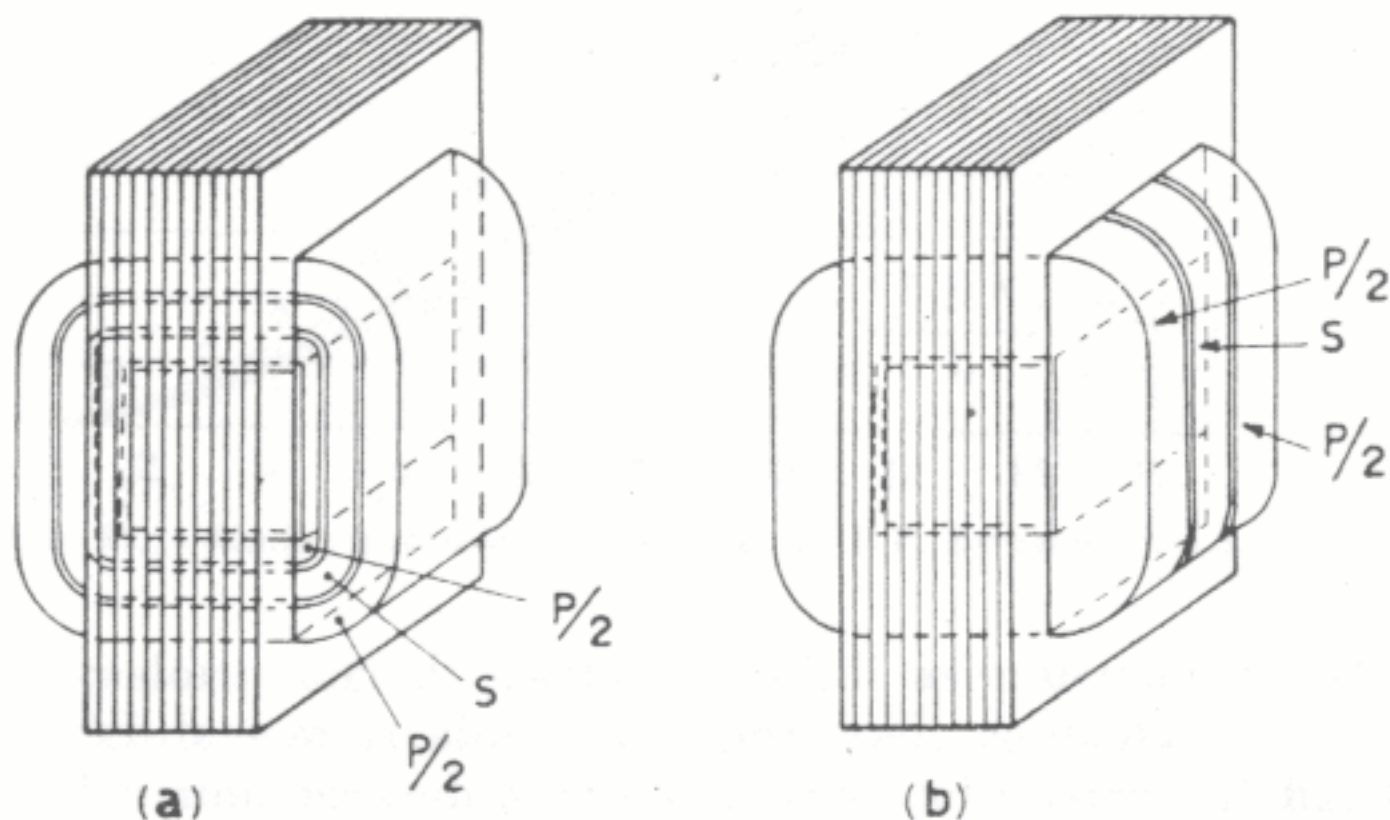


Fig. 86. - Disposizione degli avvolgimenti in un trasformatore d'uscita.

I dati costruttivi di un normale trasformatore di uscita per stadio di potenza in classe A possono essere determinati nel modo seguente:

— siano P la potenza resa in placca dello stadio, S la sezione del nucleo in cm^2 , N_p ed N_s le spire dei due avvolgimenti, R_a e Z_b rispettivamente il carico riflesso al primario e quello connesso al secondario, f_{\min} la frequenza inferiore di taglio.

Il numero delle spire primarie può essere ricavato dalla stessa formula dei trasformatori a frequenza rete, adattando una induzione magnetica massima di $0,4 \text{ W}_b/\text{m}^2$ oppure di $0,6 \text{ W}_b/\text{m}^2$, a seconda che si tratti di stadio d'uscita asimmetrico o stadio controfase. Le spire secondarie sono

ottenute dividendo per $n = \sqrt{\frac{R_a}{Z_b}}$ quelle primarie. Si ha quindi:

$$V_p = \sqrt{PR_a}; \quad N_p = \frac{V_p \times 10^4}{4,44 \times f_{\min} \times B_{\max} \times S}; \quad N_s = \frac{N_p}{n}$$

La sezione del nucleo dipende principalmente dalla potenza P e dalla frequenza f_{\min} . Si può fare approssimativamente:

$$\text{per stadio asimmetrico} \quad S = \sqrt{\frac{350 P}{f_{\min}}}$$

$$\text{per stadio controfase} \quad S = \sqrt{\frac{250 P}{f_{\min}}}$$

In un trasformatore d'uscita le perdite magnetiche del nucleo sono in genere molto meno rilevanti delle perdite elettriche prodotte dalla resistenza ohmica degli avvolgimenti. È opportuno quindi dimensionare piuttosto largamente i conduttori che compongono gli avvolgimenti stessi.

Nel primario circolano due componenti di corrente: l'una continua I_{cc} , dovuta alla corrente anodica media della valvola (o di una delle valvole in caso di push-pull), e altra alternata I_p . La risultante di queste due componenti, sommate vettorialmente, dà la corrente I'_p , per cui va dimensionato il conduttore primario. Trascurando la corrente reattiva prodotta dall'induttanza del primario e la

corrente attiva prodotta dalle perdite del ferro, tale risultante è:

$$I'_p = \sqrt{I_{cc}^2 + I_p^2} \quad \text{dove} \quad I_p = \frac{P}{V_p}.$$

Per il secondario, supposto un rendimento η , si ha la corrente:

$$I_s = \sqrt{\frac{\eta P}{Z_b}}.$$

Adottando una densità di $2A/mm^2$, i diametri dei conduttori primario e secondario sono:

$$d_p = 0,8 \sqrt{I'_p} \quad \text{e} \quad d_s = 0,8 \sqrt{I_s}$$

Verifica dell'induttanza primaria. — Come abbiamo detto, è importante che il trasformatore d'uscita abbia una elevata induttanza primaria. Per controllare questa induttanza si usano due procedimenti diversi, l'uno applicabile

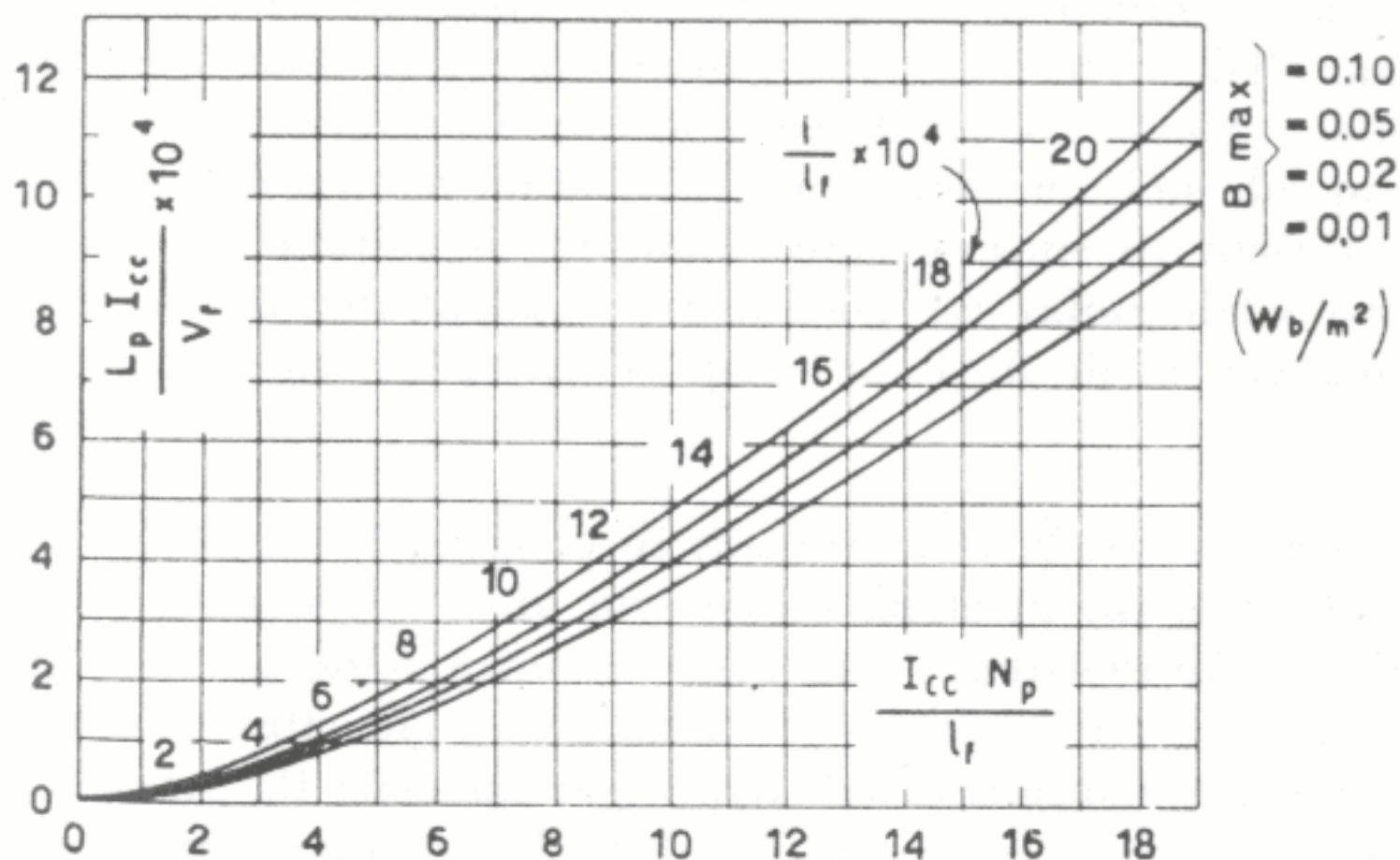


Fig. 87. - Grafico per calcolo induttanze di B.F. percorse da c.c.

con trasformatori di uscita per stadi asimmetrici e l'altro applicabile con trasformatori per stadi controfase.

Il primo procedimento si avvale delle curve di fig. 87 da cui è ricavabile anche la lunghezza i dell'intraferro.

Dati necessari sono: il numero delle spire del primario N_p , il valore medio della corrente di placca I_{cc} , la sezione S e la lunghezza l_f del circuito magnetico (volume del ferro $V_f = Sl_f$), ed infine l'induzione massima B'_{max} determinata nel nucleo da una tensione alternativa pari alla decima parte della tensione V_p (tensione primaria in corrispondenza della piena uscita).

Il valore B'_{max} , che permette di scegliere la curva più adatta, corrisponde alla decima parte del valore B_{max} prefissato. Esprimendo l_f e V_f rispettivamente in cm. ed in cm^3 , l'induttanza risulta in henry.

Il secondo procedimento richiede l'uso delle curve di fig. 88, da cui, per un valore dell'induzione alternativa de-

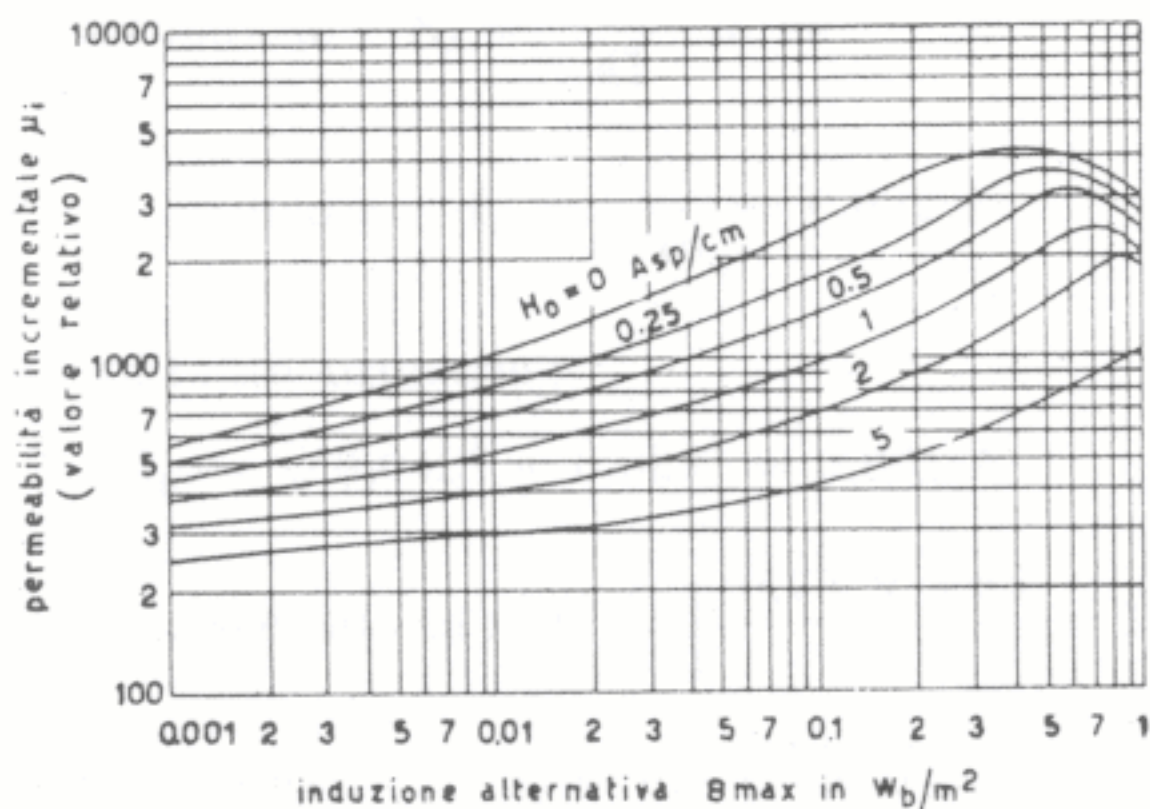


Fig. 88. - Permeabilità differenziale in funzione di H_0 e B_{max} , di lamierino al silicio 4%.

dotta come sopra (B'_{max}), si ricava la *permeabilità differenziale* relativa del nucleo. Se lo stadio controfase è quasi perfettamente bilanciato dal lato c. c., ossia se la differenza fra le correnti di riposo delle due valvole è trascurabile, la curva da scegliersi è quella che corrisponde ad un valore zero del campo magnetizzante c. c. ($H_0 = 0$). Se invece esiste un certo squilibrio fra le correnti anzidette (la massima tolleranza ammessa è che una sia inferiore all'altra di circa il 10%), la curva da scegliersi è quella che si riferisce ad un valore di H_0 più prossimo al valore del campo

c. c. creato sul nucleo. Tale valore calcolato in asp/cm, è dedotto dalla relazione:

$$H_0 = \frac{N_p (I_{cc_1} - I_{cc_2})}{l_f}$$

dove con I_{cc_1} ed I_{cc_2} si intendono le correnti medie di placca dei due rami in opposizione.

Ottenuto il valore della permeabilità (μ_i), l'induttanza dell'avvolgimento primario è:

$$L_p = \frac{1,256 N_p^2 S \mu_i}{l_f \times 10^8} \text{ (in Henry)}$$

Nota: La permeabilità offerta da una sostanza ferromagnetica ad una forza magnetizzante alternativa sovrapposta ad una forza magnetizzante continua è detta *permeabilità differenziale, incrementale o apparente* (simbolo μ_{Δ} oppure μ_i). Tale permeabilità aumenta con l'aumentare della densità di flusso alternativo (fino al punto in cui il nucleo è saturato), e diminuisce con l'aumentare della magnetizzante c. c.; ad una potenza di uscita minima dello stadio corrisponde quindi una induttanza minima del primario. In pratica si considera come termine di confronto il valore d'induttanza realizzato per un valore della tensione alternativa primaria pari ad 1/10 della massima tensione V_p .

Esempio di progetto di trasformatore d'uscita per stadio asimmetrico. — In uno stadio finale in cui è montata una valvola 6AQ5 esistono le seguenti condizioni di lavoro: $P = 4,25$ watt, $R_a = 5000$ ohm, $Z_b = 3$ ohm, $I_{cc} = 0,042$ A. Calcolare gli elementi costruttivi del trasformatore ammettendo una frequenza di taglio di 85 p/s ed un rendimento alle frequenze medie di circa il 75%.

rapporto spire : $n = \sqrt{\frac{5000}{3}} = 41$

tensione del primario : $V_p = \sqrt{4,25 \times 5000} = 146V$

sezione approssimata del nucleo :

$$S' \simeq \sqrt{\frac{350 \times 4,25}{85}} \simeq 4,18 \text{ cm}^2$$

sezione effettiva (da fig. 89) :

$$S = 0,85 \times 2,2 \times 2,3 = 4,3 \text{ cm}^2$$

spire del primario ($B_{\max} = 0,4 \text{ W}_b/\text{m}^2$) :

$$N_p = \frac{146 \times 10^4}{4,44 \times 85 \times 0,4 \times 4,3} = 2.450$$

spire del secondario : $N_s = \frac{2.450}{41} = 60$

corrente c.a. primaria : $I_p = \frac{4,25}{146} = 0,029 \text{ A}$

corrente risultante primaria :

$$I'_p = \sqrt{0,042^2 + 0,029^2} = 0,051 \text{ A}$$

corrente c. a. secondaria : $I_s = \sqrt{\frac{0,75 \times 4,25}{3}} = 1 \text{ A}$

diametro filo primario : $d_p = 0,8 \sqrt{0,051} = 0,18 \text{ mm}$

diametro filo secondario : $d_s = 0,8 \sqrt{1} = 0,8 \text{ mm}$

La scelta del lamierino è subordinata all'area della finestra, che per questi piccoli trasformatori deve essere almeno uguale a 3,5 volte la sezione totale delle spire. Calcoliamo per il nostro caso tale sezione totale e confrontiamola con l'area della finestra del lamierino di fig. 89 :

$$A = 3,5 \left(\frac{\pi d_p^2 N_p}{4} + \frac{\pi d_s^2 N_s}{4} \right) = 2,75 (d_p^2 N_p + d_s^2 N_s)$$

$$A = 2,75 (0,18^2 \times 2450 + 0,8^2 \times 60) = 324 \text{ mm}^2$$

$$\text{area finestra} = 11 \times 32 = 352 \text{ mm}^2.$$

Il primario consta di circa 21 strati, di 118 spire ciascuno, separati da carta paraffinata dello spessore di 0,04 mm. Il secondario consta di due strati, di 30 spire ciascuno, separati da carta prespan dello spessore di 0,1 mm. Fra il primario ed il secondario si metterà un isolamento costituito da due giri di carta prespan di spessore 0,15 mm.

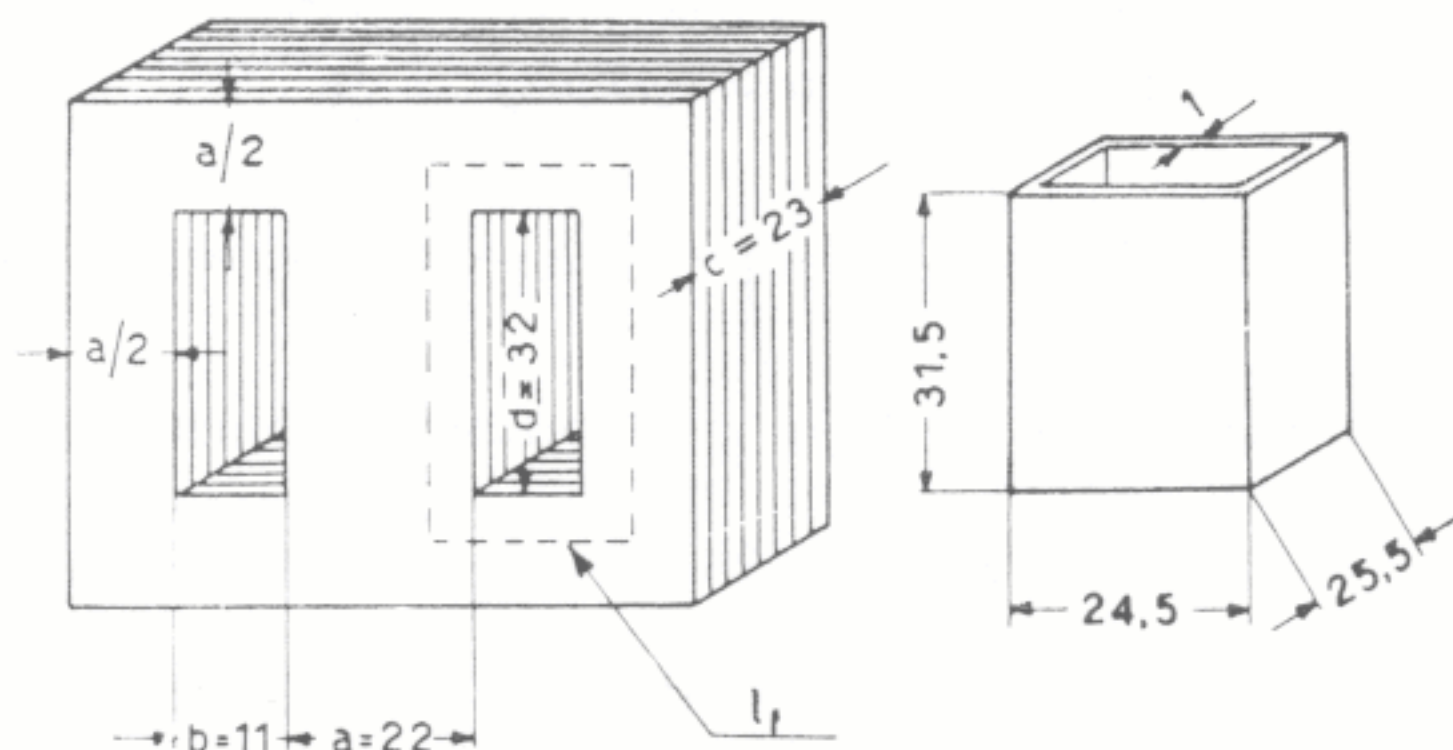


Fig. 89. - Pacco lamellare e relativo cartoccio (misure in mm.).

Verifica dell'induttanza primaria. — Dalla fig. 89 si rileva che la lunghezza del circuito magnetico ed il volume del ferro sono:

$$l_f = 2a + 2b + 2d = 4,4 + 2,2 + 6,4 = 13 \text{ cm.}$$

$$V_f = S l_f = 4,3 \times 13 = 56 \text{ cm}^3.$$

Si ha quindi:

$$\frac{I_{cc} N_p}{l_f} = \frac{0,042 \times 2450}{13} = 7,9$$

e dalle curve di fig. 87, per una induzione alternativa uguale a 0,4/10 ossia di 0,04 W_b/m^2 :

$$\frac{L_p I_{cc}^2}{V_f} 10^4 = 3,15 \quad ; \quad \frac{i}{l_f} 10^4 = 11$$

da cui:

$$L_p = \frac{3,15 \times 56}{0,042^2 \times 10^4} = 10 \text{ henry}$$

$$i = \frac{11 \times 13}{10^4} = 0,0143 \text{ cm.}$$

L'intraferro pratico, cioè lo spessore di carta paraffinata da interporre fra gli « E » e gli « I » dei lamierini, sarà di $0,0143/2$ cm., ossia di 0,07 mm. circa.

La reattanza del primario alla minima frequenza di lavoro è:

$$2 \pi f_{\min} L_p = 6,28 \times 85 \times 10 = 5338 \Omega$$

valore che risponde egregiamente alla condizioni di minima sufficienza determinata da R_a .

Esempio di progetto di trasformatore d'uscita per stadio controfase. — In uno stadio finale ove è montato un push-pull di 6AQ5 si hanno le seguenti condizioni di lavoro: $P = 8,5$ W, $R_a = 10000 \Omega$, $Z_b = 3 \Omega$, $I_{cc} = 0,042$ A per valvola. Calcolare gli elementi costruttivi del trasformatore ammettendo una f_{\min} di 70 p/s ed un rendimento, alle frequenze medie, di circa l'80%.

rapporto spire :

$$n = \sqrt{\frac{10000}{3}} = 58$$

tensione primaria :

$$V_p = \sqrt{8,5 \times 10000} = 292 \text{ V}$$

sezione approssimata del nucleo :

$$S' = \sqrt{\frac{2,50 \times 8,5}{70}} = 5,5 \text{ cm}^2$$

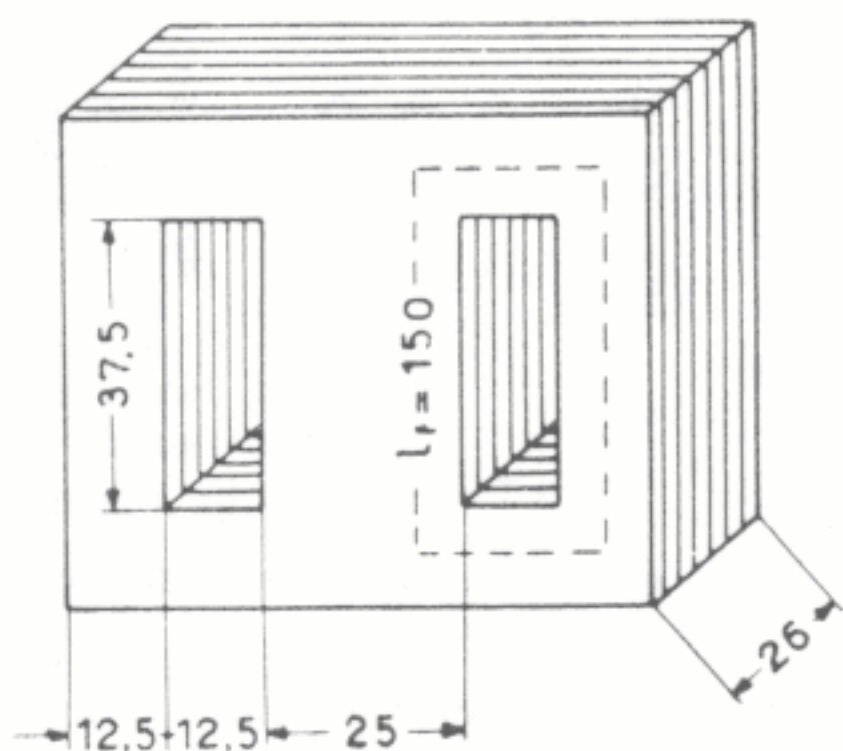


Fig. 90. - Pacco lamellare del trasformatore d'uscita per stadio controfase.

sezione effettiva (da fig. 90) :

$$S = 0,85 \times 2,5 \times 2,6 = 5,52 \text{ cm}^2$$

spire primarie ($B_{\max} = 0,6$) :

$$N_p = \frac{292 \times 10^4}{4,44 \times 70 \times 0,6 \times 5,52} = 2830$$

spire secondarie : $N_s = \frac{2830}{58} = 49$

corrente c.a. primaria : $I_p = \frac{8,5}{292} = 0,029 \text{ A}$

corrente risultante per ogni sezione primaria :

$$I'_p = \sqrt{0,042^2 + 0,029^2} = 0,051 \text{ A}$$

corrente secondaria : $I_s = \sqrt{\frac{0,8 \times 8,5}{3}} = 1,5 \text{ A}$

diametro filo primario : $d_p = 0,8 \sqrt{0,051} = 0,18 \text{ mm.}$

diametro filo secondario : $d_s = 0,8 \sqrt{1,5} = 1 \text{ mm.}$

Ammettendo una differenza di 4 m/A tra le correnti di riposo delle due valvole, il campo magnetico c. c. nel nucleo viene ad essere:

$$H_o = \frac{I_{cc} N_p}{l_f} = \frac{0,004 \times 2830}{15} = 0,75 \text{ asp/cm.}$$

Dalle curve di fig. 88, per un valore di $H_o = 0,75$ asp/cm ed un valore di $B'_{\max} = 0,6/10 = 0,06 \text{ W}_b/\text{m}^2$, la permeabilità differenziale risulta essere:

$$\mu_i = 900 .$$

L'induttanza dell'avvolgimento primario è quindi:

$$L_p = \frac{1,256 \times 2830^2 \times 5,52 \times 900}{15 \times 10^8} = 33,3 \text{ henry}$$

e la sua reattanza induttiva:

$$2 \pi f_{\min} L_p = 6,28 \times 70 \times 33,3 = 14600 \Omega .$$

Questo valore della reattanza, come si vede, è alquanto superiore al minimo accettabile di 10000 Ω .