

# SCHEMA DI CALCOLO DI UN TRASFORMATORE DI USCITA

2424

C. N.

Per quanto nella maggior parte dei casi ogni trasformatore di uscita venga calcolato con grande rapidità riferendosi ad altri trasformatori aventi caratteristiche simili, ed operando con coefficienti di proporzionalità — procedimento che la pratica di tutti i giorni ha sancito come uno dei più semplici e dei più precisi — pure nel caso in cui non si possa seguire questo procedimento semplicista, è necessario adottare il metodo fondamentale di calcolo. Di questo metodo vogliamo trattare nelle presenti note; ed il modo scelto per l'esposizione riteniamo sia praticamente il più gradito dal lettore e nel contempo il più esauriente. Eseguiremo il calcolo di un tipico trasformatore di uscita portando giustificazione di ogni passaggio e di ogni operazione; ne risulterà chiaramente messo in evidenza il procedimento, che potrà senz'altro essere applicato per il calcolo di qualsiasi trasformatore di uscita per stadi funzionanti in classe A.

Consideriamo di dovere adattare l'impedenza di un altoparlante a bobina mobile al circuito anodico di un pentodo di potenza tipo EL5. La valvola ha le seguenti caratteristiche di funzionamento:

- tensione anodica 250 volt
- tensione di griglia schermo 275 volt
- corrente anodica 72 mamp
- resistenza interna 33000 ohm.

Desiderando sfruttare totalmente la valvola è necessario realizzare quei dati di funzionamento: otterremo una potenza di 9 watt circa nel carico anodico con una distorsione totale del 10%. L'impedenza del carico esterno, stabilita dal costruttore della valvola, è di 3500 ohm.

Come elementi di partenza riteniamo che sia stato stabilito in precedenza:

- a) la gamma di riproduzione (frequenza minima di taglio e frequenza massima di taglio) (1);
- b) il rendimento del trasformatore di uscita;
- c) il tipo di lamierino, la sua forma, e la sezione del nucleo;
- d) il tipo di altoparlante.

Il calcolo del trasformatore serve a stabilire il numero di spire ed il diametro del filo del primario e del secondario.

Le frequenze di taglio massima e minima siano rispettivamente 5000 e 50 Hz. Essendo dato il tipo di altoparlante da impiegare sono noti i valori di impedenza della bobina

1) Considerando 1 la risposta a 1000 Hz, si definisce frequenza di taglio quella frequenza alla quale la risposta si riduce a  $1/\sqrt{2}$ . Questa definizione coincide anche con le considerazioni di carattere acustico. Infatti è noto che l'orecchio percepisce differenze di livello di almeno 3 db, che riportati in rapporto di tensioni o di correnti danno

$$-3 \text{ db} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$

mobile corrispondenti alle suddette frequenze; poniamo siano rispettivamente 15 e 7 ohm (2).

Il rendimento di un buon trasformatore di uscita si aggira di solito intorno al 90%; poniamo che nel nostro caso sia necessario avere un rendimento piuttosto elevato e precisamente del 96%. Poichè con buona approssimazione si può ritenere che le perdite siano totalmente localizzate negli avvolgimenti, avremo così fissato il valore della perdita globale (3):

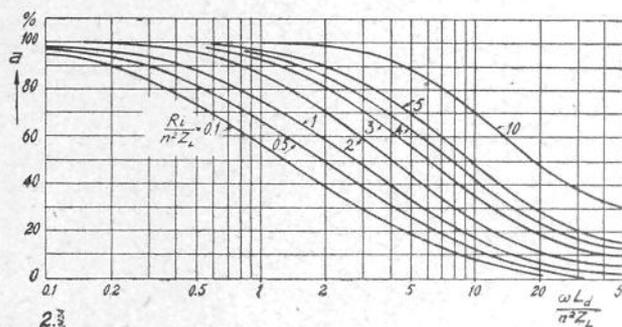
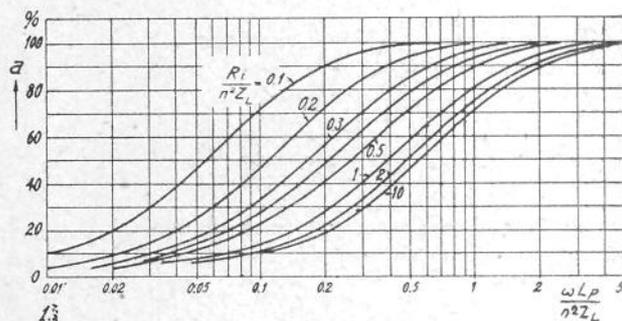
$$R_1 + n^2 R_2 = 200 \Omega$$

essendo

$R_1$  = la resistenza dell'avvolgimento primario,

$R_2$  = la resistenza dell'avvolgimento secondario

$n = \frac{N_1}{N_2}$  il rapporto tra le spire dell'avvolgimento primario e quelle dell'avvolgimento secondario (rapporto di trasformazione).



2) E' noto che la bobina mobile di un altoparlante elettrodinamico presenta valori di impedenza diversi al variare della frequenza. Per il calcolo dei trasformatori di uscita si considera come valore medio dell'impedenza quello corrispondente a 1000 Hz. L'impedenza inoltre presenta un massimo alla frequenza propria del cono e, avendo carattere induttivo, aumenta quasi uniformemente alle frequenze maggiori di 1000 Hz.

3) La perdita globale dovuta alla resistenza degli avvolgimenti, risulta dallo schema equivalente del trasformatore. Essa è costituita dalla resistenza del primario  $R_1$  e da quella del secondario riportata al primario  $n^2 R_2$ .

Il calcolo dei valori richiesti per l'induttanza primaria e per l'induttanza dispersa può essere molto rapidamente eseguito con l'aiuto delle curve di fig. 1 e di fig. 2 (ved. Appendice I e II).

Poniamo

- $R_i$  = resistenza interna della valvola,
- $Z_L$  = impedenza della bobina mobile,
- $L_p$  = induttanza dell'avvolgimento primario,
- $L_d$  = induttanza dispersa globale,
- $\omega = 2 \pi f$

Abbiamo allora a 50 Hz, frequenza minima di taglio,

$$Z_L = 7 \Omega$$

$$\frac{R_i}{n^2 Z_L} = \frac{33000}{3500} = 9,4$$

e dalla fig. 1, per  $a = 70,7\%$  ricaviamo

$$\frac{\omega L_p}{n^2 Z_L} = 1, \text{ da cui}$$

$$L_p = \frac{n^2 Z_L}{\omega} = \frac{3500}{2 \pi 50} = 11 \text{ Henry.}$$

A 5000 Hz avremo invece

$$Z_L = 15 \Omega$$

$$n^2 Z_L = \frac{15}{7} 3500 = 7500 \Omega$$

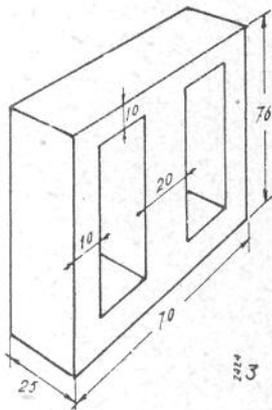
$$\frac{R_i}{n^2 Z_L} = \frac{33000}{7500} = 4,4$$

e dalla fig. 2, per  $a = 70,7\%$  ricaviamo

$$\frac{\omega L_d}{n^2 Z_L} = 4,5, \text{ da cui}$$

$$L_d = \frac{4,5 n^2 Z_L}{\omega} = \frac{4,5 \cdot 7500}{2 \pi 5000} = 1,1 \text{ Henry.}$$

Si abbia a disposizione un nucleo di dimensioni date, tali come risultano dalla fig. 3, formato di lamierini di



ferro al 4% di silicio. Per esso risultano i seguenti dati:

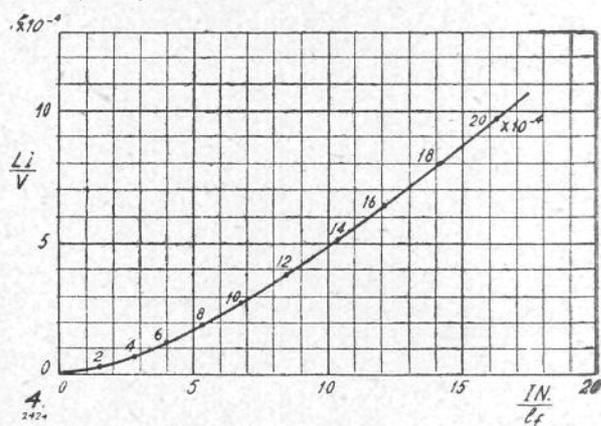
Sezione del nucleo  $S = 5 \text{ cm}^2$

Lunghezza del circuito magnetico  $l_f = 18 \text{ cm.}$

Volume del ferro  $V = S l_f = 91 \text{ cm}^3$

Poichè nell'avvolgimento primario del trasformatore circola la corrente anodica della valvola finale, è necessario stabilire il traferro ottimo corrispondente al valore della corrente continua nel primario, delle dimensioni del nucleo e del numero delle spire dell'avvolgimento primario.

Allo scopo faremo uso del grafico di fig. 4 — valido solamente per lamierino di ferro con 4% di silicio — (ved. App. II).



Chiamando  $I$  la corrente continua nel primario,  $\alpha = \frac{l_a}{l_f}$  il rapporto tra le dimensioni del traferro e del circuito magnetico, abbiamo

$$\frac{L_p I^2}{V} = \frac{11 (72.10^{-3})^2}{91} = 6,3 \cdot 10^{-4}$$

Dalla fig. 4 ricaviamo per intersezione i seguenti valori:

$$\alpha = \frac{l_a}{l_f} = 16 \cdot 10^{-1}$$

$$\frac{I n_1}{l_f} = 12$$

e da queste espressioni si ottiene infine

$$N_1 = 12 \frac{l_f}{I} = 12 \frac{18}{72.10^{-3}} = 3000 \text{ spire}$$

$$l_a = \alpha l_f = 16 \cdot 10^{-1} \cdot 18 = 0,029 \text{ cm.} = 0,3 \text{ mm.}$$

Abbiamo stabilito in precedenza la perdita globale negli avvolgimenti. Poichè come è noto, le perdite nel rame in tutti i trasformatori sono minime quando sono eguali le perdite nei singoli avvolgimenti, possiamo porre  $R_1 = 100$

**A. MARCUCCI & C. - MILANO**

VIA FRATELLI BRONZETTI 37 - TELEF. 52.775

Macchine avvolgitrici per radioriparatori

Attrezzi speciali per radiotecnici

Materiale per scuole di radiotelegrafia

Strumenti di misura

Microfoni e diaframmi piezoelettrici

Accessori Radio

**FIERA CAMPIONARIA DI MILANO - PADIGLIONE N. 2632**

ohm. Riservando all'avvolgimento primario metà dello spazio utile nella finestra del lamierino, avremo una lunghezza media di spira di circa 12 cm. La lunghezza totale del filo per il primario sarà perciò

$$3000 \times 12 \text{ cm.} = 360 \text{ mt.}$$

La resistenza per metro sarà

$$\frac{100}{360} = 0,277 \Omega$$

a cui corrisponde un diametro del filo di rame di 0,285 mm. Sceglieremo per ovvie ragioni il diametro di 0,3 mm. In tal caso la densità di corrente sarà di  $\frac{72 \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{0,3} = 1,02$

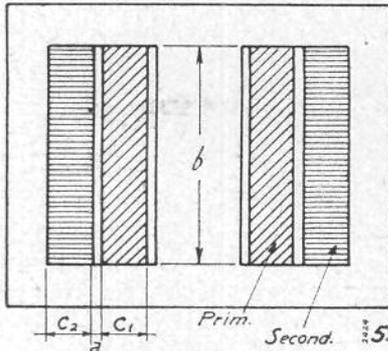
amp/mm., valore pienamente accettabile. Inoltre la resistenza del primario risulterà di 90 ohm. Lo spessore dell'avvolgimento risulterà di circa 6 mm. L'avvolgimento secondario sarà posto sopra il primario interponendo uno strato isolante di 0,5 mm.

Il numero delle spire dell'avvolgimento secondario viene stabilito dal rapporto di trasformazione

$$n = \frac{N_1}{N_2} = \sqrt{\frac{Z_p}{Z_L}} = \sqrt{\frac{3300}{7}} = 21,7$$

$$N_2 = \frac{N_1}{n} = \frac{3000}{21,7} = 138 \text{ spire.}$$

Affinchè esso si riporti sul primario con una resistenza eguale a quella di questo avvolgimento occorre adottare un filo di diametro  $\sqrt{n}$  volte maggiore di quello del pri-



mario. Il diametro del filo per l'avvolgimento secondario sarà allora  $0,3\sqrt{21,7} = 1,4$  mm. Per il secondario la lunghezza media della spira è di circa 16 cm.: il filo avrà in totale una lunghezza di  $138 \times 16$  cm. = 22 mt. ed una resistenza

$$R_2 = 0,25 \Omega$$

Si avrà quindi

$$R_1 + n^2 R_2 = 90 + 0,25 (21,7)^2 \approx 207 \Omega.$$

L'impedenza di carico risulta essere di

$$3300 + 207 \approx 3500 \Omega.$$

Il rendimento del trasformatore a 1000 Hz è dato da (4)

$$\frac{3300}{3500} 100 = 94 \%$$

4) Il rendimento di un trasformatore, considerando lo schema equivalente a rapporto unitario, diventa

$$\eta = \frac{W_U}{W_L} = \frac{n^2 Z_L}{R_1 + n^2 (R_2 + Z_L)} = \frac{n^2 Z_L}{Z_p}$$

Occorre ora esaminare se l'induttanza dispersa di questo trasformatore avrà il valore richiesto. Il calcolo dell'induttanza dispersa globale può essere fatto mediante l'espressione

$$L_d = L_{d1} + n^2 L_{d2} = 0,4 \frac{N_1^2}{b} l_m (3a + c_1 + c_2) 10^{-8} \text{ Henry}$$

nella quale si è posto (vedere fig. 5)

$l_m$  = lunghezza media delle spire,

$b$  = altezza dell'avvolgimento,

$a$  = spessore isolante tra i due avvolgimenti,

$c_1$  = spessore dell'avvolgimento primario,

$c_2$  = spessore dell'avvolgimento secondario,

tutto in cm.

Nel nostro caso avremo  $l_m = 14$  cm.,  $b = 5$  cm.,  $a = 0,05$  cm.,  $c_1, c_2 = 0,6$  cm., e quindi

$$L_d = 0,4 \frac{3000^2}{5,6} 14 (3 \times 0,05 + 0,6 + 0,6) 10^{-8} =$$

$$= 1,21 \text{ Henry}$$

Vedremo infine quale sarà il valore dell'induzione nel nucleo del trasformatore. Quando la valvola fornisce la massima potenza (9 watt) ai capi dell'impedenza di carico (3500 ohm) si avrà una tensione

$$E = \sqrt{9 \times 3500} = 177 \text{ volt}$$

Dalla nota espressione

$$E = 4,4 f N_1 S B 10^{-8}$$

si ricava l'induzione

$$B = \frac{E}{4,4 f N_1 S} 10^8 \text{ gauss,}$$

che risulta tanto più alta quanto minore è la frequenza. Poichè la frequenza minima che ci interessa è 50 Hz,  $B$  verrà calcolato per questo valore di  $f$ , e tenendo presente che la tensione ai capi del carico si è ridotta, a questa frequenza, di  $\sqrt{2}$  volte rispetto a 1000 Hz. Avremo allora

$$B = \frac{177\sqrt{2}}{4,4 \times 50 \times 3000 \times 5} = 3800 \text{ gauss.}$$

Si ammette che nei buoni trasformatori l'induzione massima a 50 Hz non superi il valore di 4000. Il nostro trasformatore funzionerà quindi in condizioni perfettamente accettabili, tanto più se si tiene conto che a frequenze così basse la valvola finale non dovrà mai fornire tutta la potenza e che alle frequenze più elevate l'induzione diminuisce.

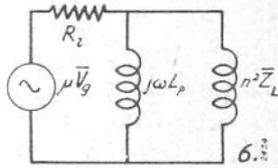
MICROFONI  
RADIOPRODOTTI

« do. re. mi. »

Posteggi 2654 - 2675  
Padiglione Radio  
FIERA DI MILANO

APPENDICE I

Lo schema equivalente di uno stadio di amplificazione finale, alle frequenze basse risulta essere in definitiva quello di fig. 6. Per lo studio del comportamento del cir-



cuito al variare di  $f$  si considerano le correnti circolanti nei vari rami giacchè, come è noto, la resa acustica di un altoparlante è proporzionale alla corrente nella bobina mobile.

Essendo  $a = \frac{i}{i_{max}}$  il rapporto tra la corrente nella bobina mobile per una frequenza qualsiasi e la corrente massima che si verifica per  $j\omega L_p \gg n^2 Z_L$ , si ha infine

$$a = \frac{(R_i + n^2 \bar{Z}_L) j\omega L_p}{(R_i + n^2 \bar{Z}_L) j\omega L_p + R_i n^2 \bar{Z}_L}$$

la quale per  $\bar{Z}_L$  reale (resistivo) diventa

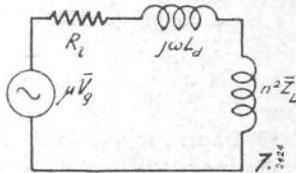
$$a = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{n^2 Z_L}{\omega L_p}\right)^2} \frac{1}{1 + \left(\frac{n^2 Z_L}{R_i}\right)^2}}$$

Il valore di  $a$  in % è stato tracciato in fig. 1 in funzione di  $\frac{n^2 Z_L}{\omega L_p}$  avendo preso come parametro il rapporto

$$\frac{R_i}{n^2 Z_L}$$

APPENDICE II

Lo schema equivalente di uno stadio di amplificazione finale alle frequenze elevate risulta essere in definitiva



quello di fig. 7. Tenendo presenti le considerazioni svolte nell'Appendice I, e ponendo  $L_d = L_{d1} + n^2 L_{d2}$ , si avrà  $i_{max}$  per  $\omega L_d \ll (n^2 Z_L + R_i)$ .

Allora avremo

$$a = \frac{i}{i_{max}} = \frac{R_i + n^2 \bar{Z}_L}{R_i + n^2 Z_L + j\omega L_d}$$

In questo caso non si può considerare  $Z_L$  esclusivamente resistiva; una buona approssimazione si ha ponendo  $Z_L$  formata di una parte reale e di una parte immaginaria eguali fra loro, sicchè

$$\bar{Z}_L = \frac{Z_L}{\sqrt{2}} (1 + j)$$

Si ha allora infine

$$a = \frac{\sqrt{1 + \left(1 + \frac{R_i \sqrt{2}}{n^2 Z_L}\right)^2}}{\left(1 + \frac{R_i \sqrt{2}}{n^2 Z_L}\right) + \left(1 + \frac{\omega L_d \sqrt{2}}{n^2 Z_L}\right)^2}$$

In fig. 2 è stato tracciato  $a$  in % in funzione di  $\frac{\omega L_d}{n^2 Z_L}$

avendo preso come parametro il rapporto  $\frac{R_i}{n^2 Z_L}$ .

APPENDICE III.

Quando un avvolgimento con nucleo di ferro è percorso da corrente continua e da corrente alternata, esiste un certo valore ottimo di traferro col quale si ottiene il massimo valore di induttanza. Un semplice metodo per determinare, in un dato caso, il valore ottimo di traferro è stato sviluppato da Hanna (1).

Indicando con

$\mu = \frac{B}{H}$  la permeabilità normale del ferro,

$\Delta\mu = \frac{\Delta B}{\Delta H}$  la permeabilità differenziale,

$N_1$  il numero di spire,

$l_i$  la lunghezza media del circuito magnetico (cm),

$l_a$  la lunghezza del traferro (cm),

$I$  la corrente continua (amp),

$V = Sl_i$  il volume del ferro (cm<sup>3</sup>)

$$\alpha = \frac{l_i}{l_a}$$

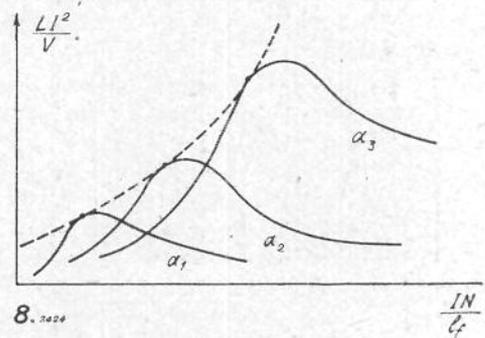
per la magnetizzazione con corrente continua, si trova

$$\frac{I N_1}{l_i} = \frac{B}{0,4 \pi} \left( \frac{1}{\mu} + \alpha \right)$$

e per la corrente alternata

$$\frac{L I^2}{V} = \frac{B^2}{0,4 \pi} \frac{\left( \frac{1}{\mu} + \alpha \right)^2}{\frac{1}{\mu} + \alpha} 10^9$$

Per un dato tipo di ferro, essendo noti  $\mu$  e  $\Delta\mu$  in fun-



zione di  $B$ , si possono tracciare varie curve di  $\frac{L I^2}{V}$  in funzione di  $\frac{I N_1}{l_i}$  per diversi valori di  $\alpha$  (fig. 8). L'involuppo

di queste curve (indicato nel grafico di fig. 4 per il ferro con 4% di silicio) permette quindi la soluzione del problema della ricerca del valore più favorevole del traferro in funzione dei vari elementi caratteristici dell'avvolgimento.



Nota. - 1) Journal of the American Institute of Elec. Eng., 46, 1927.

Al prossimo numero :

La descrizione, corredata di schemi e fotografie, di un interessante : "Misuratore universale provavalvole-selettore,, di U. Disnan.