

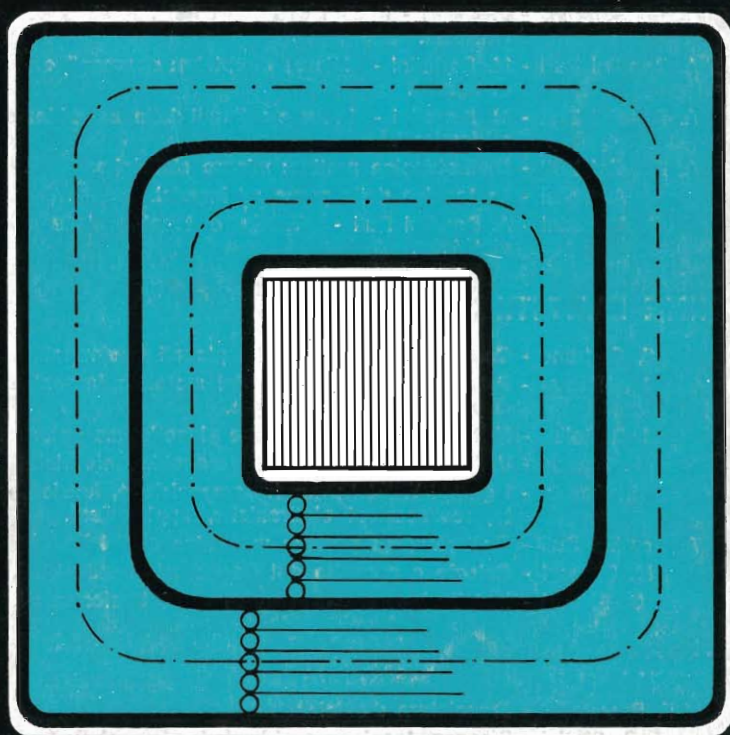
quaderni di elettrificazione

ernesto carbone

17

IV edizione

la costruzione e il calcolo dei  
**piccoli**  
**trasformatori**



editoriale delfinò milano

Seguendo costantemente le norme CEI, le opere della **EDITORIALE DELFINO** facilitano la formazione professionale nella scuola e nell'industria.

ERNESTO CARBONE

## **DISEGNO ELETTRTECNICO**

- G. Del Monaco - **Convenzioni per impianti di energia.**
- G. Del Monaco - **Lo schema elettrico funzionale.**
- G. Del Monaco - **Atlante dei circuiti.**
- G. Del Monaco - V. Re - **Disegno elettrotecnico ed elettromeccanico.**

## **MISURE ELETTRICHE**

- E. Cometta - L. Cibrario - **Unità di misura.**
- D. Armanini - **Trasformatori per misura e protezione.**
- E. Cometta - **Misura delle temperature.**
- A. Bandini Buti - **I nomogrammi per l'elettrotecnico.**
  - A. Bossi - E. Coppi - **Metodi di misura nei circuiti a corrente continua.**
- A. Bandini Buti - M. Bertolini - **Misure elettriche: strumenti e metodi di misura.**
- A. Bandini Buti - M. Bertolini - **Prove e collaudi delle macchine e degli impianti.**
- A. Bandini Buti - **Elettrotecnica pratica: misure elettriche.**
  - A. Bossi - **La tecnica delle prove ad impulsi.**
- D. Armanini - A. Bandini Buti - **Teoria e tecnica delle misure elettriche.**

## **LA COSTRUZIONE E IL CALCOLO DEI PICCOLI TRASFORMATORI**

## **MACCHINE ELETTRICHE**

- E. Carbone - **Costruzione e calcolo dei piccoli trasformatori.**
- M. Rossini - **Progettazione e calcolo dei motori asincroni trifasi di piccola e media potenza.**
- M. Bertolini - **Motori elettrici di piccola e piccolissima potenza.**
- F. Pezzoli - V. Re - **Protezione delle macchine elettriche.**
- P. L. Cerato - **I gruppi Ward Leonard: composizione, funzionamento, realizzazioni elettroniche, applicazioni.**
- A. Bandini Buti - **Elettrotecnica pratica: macchine elettriche.**
- M. Borsani - **Calcolo e progetto dei trasformatori industriali.**
- G. Paleari - **Installazione e manutenzione dei trasformatori.**

## **MECCANICA**

- F. Pasqualini - **Tracciatura d'officina.**
- C. Clerici - **Disegno tecnico: problemi fondamentali grafici e geometrici.**
- C. Clerici - **Convenzioni del disegno tecnico e degli organi delle macchine.**

EDITORIALE DELFINO - MILANO

(Segue in terza di copertina)

Copyright 1966 by

©

EDITORIALE DELFINO

Via S. D'Orsenigo 25/27 - Milano

## CAPITOLO I

### PRINCIPI GENERALI

Il trasformatore è un apparecchio elettrico che funziona in corrente alternata e serve per trasformare una data tensione o corrente in un'altra di valore prefissato.

Si costruiscono trasformatori di tutte le dimensioni, da piccolissimi di pochi ettogrammi per campanelli, a grossissimi dal peso di varie decine di tonnellate per la trasmissione a distanza di energia elettrica ad altissime tensioni.

Il trasformatore consta di un circuito magnetico (nucleo di ferro) e di due o più circuiti elettrici (avvolgimenti) (v. fig. 1); quindi costruttivamente il trasformatore è costituito da lamierino magnetico, da rame, raramente alluminio, e da materiale isolante. Il circuito al quale viene applicata la tensione di alimentazione dicesi primario; il circuito dal quale si preleva la tensione trasformata dicesi secondario.

Il funzionamento del trasformatore è reversibile, cioè ogni circuito può funzionare da primario. Così un trasformatore con rapporto 220/100 V può essere alimentato a 220 V ed erogare a 100 V come può alimentarsi a 100 V ed erogare a 220 V, a meno della diversa caduta di tensione al secondario.

Il lamierino magnetico e il rame sono detti materiali attivi del trasformatore.

Noi qui ci occuperemo solo di piccoli trasformatori monofasi di tensione per potenze da 10 a 1000 VA, del tipo a raffreddamento naturale in aria, con un solo primario e un solo secondario.

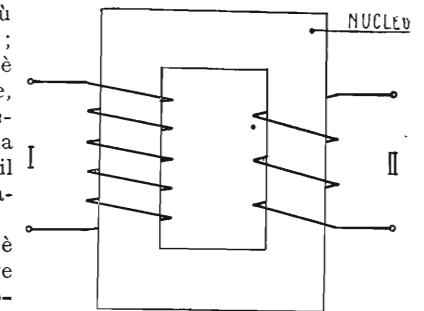


Fig. 1 - Elementi del trasformatore.

I - avvolgimento primario  
II - avvolgimento secondario  
Nucleo o circuito magnetico

L'energia elettrica immessa nel trasformatore nel passare dal primario al secondario attraversa uno stadio intermedio in cui cambia natura, ossia dallo stato elettrico passa allo stato magnetico e viceversa.

Negli schemi per impianti elettrici il trasformatore monofase a due avvolgimenti viene rappresentato come nelle figure 2. Nel trasformatore abbiamo perdite nel nucleo e perdite negli avvolgimenti che si manifestano sotto forma di riscaldamento. Occorre pertanto che il trasformatore sia situato in ambiente a libera circolazione di aria che permetta la dissipazione naturale del calore prodotto.

E' ovvio che lo sfruttamento del lamierino magnetico e degli avvolgimenti debba essere tale che in essi non vengano generate temperature pericolose. Il materiale più delicato è l'isolamento degli avvolgimenti la cui durata determina praticamente la vita del trasformatore.

Per l'isolamento di conduttori viene usato: seta, raion, cotone, carta, e

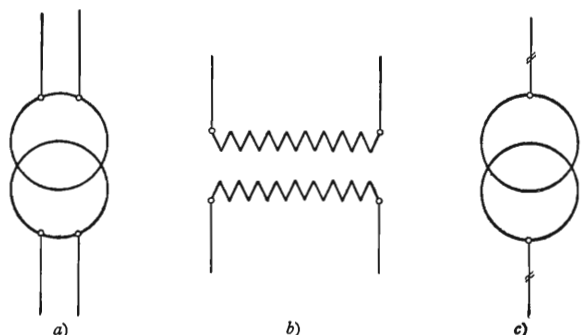


Fig. 2 - Rappresentazione grafica del trasformatore monofase a due avvolgimenti - a) bifilare - b) schematico - c) unifilare.

l'avvolgimento risultante può o no essere impregnato con vernici speciali aventi, oltre a buone proprietà isolanti, anche qualità cementanti e di protezione contro gli agenti atmosferici. L'isolamento con simili materiali organici impregnati dicesi isolamento di classe A.

Alla classe A appartiene anche il filo smaltato tipo oleoresinoso.

Per temperature più alte vengono usati conduttori isolati con mica, amianto, filato di vetro (materiali di classe B) e smalti sintetici (materiali di classe E).

Le norme per le macchine elettriche stabiliscono dei limiti di temperatura che non dovrebbero superarsi se si vuole una buona conservazione della macchina. Questi limiti sono indicati sotto forma di sovratemperatura ammissibili sull'ambiente. L'ambiente aria ammesso è di 40° C massimi.

Le ultime norme CEI prendono in considerazione per trasformatori a secco gli isolanti di classe A, B ed E.

Le tabelle I e II riportano i valori di sovratemperatura e temperature effettive ammesse negli avvolgimenti in aria rispettivamente secondo le norme italiane CEI e norme tedesche VDE.

L'aumento di temperatura con il metodo per resistenza si ottiene misurando l'aumento di resistenza degli avvolgimenti dall'inizio alla fine della prova.

Si misura perciò la resistenza iniziale  $R_i$  che deve essere fatta a temperatura  $t_i$  esattamente conosciuta; in genere sarà quella dell'ambiente quando l'avvolgimento sia stato inattivo per un tempo sufficientemente lungo. Indi si rileva la resistenza  $R_f$  dell'avvolgimento caldo al termine della prova. Il riscaldamento dell'avvolgimento si ottiene mettendo il trasformatore da provare in funzione al suo carico nominale e tenendolo fino a che esso non abbia raggiunto la temperatura di regime. La temperatura di regime si ritiene raggiunta quando il trasformatore non aumenta più la sua temperatura. In altre

TABELLA I — SOVRATEMPERATURE E TEMPERATURE EFFETTIVE AMMISSIBILI NEGLI AVVOLGIMENTI DEI TRASFORMATORI IN ARIA (Norme CEI)

Avvolgimento con isolamento in	Misura con il metodo per resistenza		Misura a mezzo termometro	
	Sovratemperatura media	Temperatura effettiva media	Sovratemperatura del punto accessibile più caldo	Temperatura effettiva del punto accessibile più caldo
Cotone, seta, raion, carta (avvolg. impregnato) Smalto tipo oleoresinoso (fili smaltati) (Isol. classe A)	55° C	95° C	65° C	105° C
Smalto tipo sintetico (fili smaltati) (Isol. classe E)	65° C	105° C	75° C	115° C
Mica, amianto, vetro e altre sostanze inorganiche combinate con materiale organico (Isol. classe B)	75° C	115° C	85° C	125° C

Per il nucleo è ammesso di misurare, sulla sua superficie, a mezzo termometro, una sovratemperatura di 55° C (cioè temperatura effettiva di 95° C).

parole il trasformatore non accumula più calore; tanto calore viene generato e tanto ne viene dissipato.

Con la formula seguente si determina la temperatura finale  $t_f$  per avvolgimenti di rame:

$$(1) \quad t_f = t_i + \frac{R_f - R_i}{R_i} (234,5 + t_i) \text{ (}^\circ\text{C)}$$

A chiarimento facciamo un esempio. Sia  $t_i = 20^\circ\text{C}$  e  $R_i = 100\text{ ohm}$  rispettivamente la temperatura e la resistenza dell'avvolgimento a freddo da provare. A caldo, con avvolgimento a regime, si misura  $R_f = 120\text{ ohm}$ . La temperatura finale raggiunta sarà:

$$t_f = 20 + \frac{120 - 100}{100} (234,5 + 20) \\ = 20 + 0,20 \times 254,5 = 20 + 50,9 = 70,9 \text{ }^\circ\text{C}$$

La sovratemperatura sarà 50,9° C.

TABELLA II — SOVRATEMPERATURE E TEMPERATURE EFFETTIVE AMMISSIBILI NEGLI AVVOLGIMENTI DEI TRASFORMATORI IN ARIA (Norme tedesche VDE)

Avvolgimento con isolamento in		Misura con il metodo per resistenza	
		Sovratempera- tura media	Temperat. ef- fettiva media
Cotone, seta, raion, carta	non impregnato	50° C	85° C
	impregnato	60° C	95° C
Smalto .....		60° C	95° C

TABELLA III — SOVRATEMPERATURE E TEMPERATURE EFFETTIVE AMMISSIBILI NEGLI AVVOLGIMENTI DEI TRASFORMATORI IN ARIA NEL CASO DI CORTO CIRCUITO E PER BREVE TEMPO (Norme VDE)

Avvolgimento con isolamento in		Sovratempera- tura media	Temperat. ef- fettiva media
Cotone, seta, raion, carta	non impregnato	90° C	125° C
	impregnato	100° C	135° C
Smalto .....		120° C	155° C

Determinato l'aumento percentuale della resistenza dell'avvolgimento, il corrispondente aumento di temperatura può pure leggersi direttamente dalle curve della figura 3, per temperature ambiente di 10° - 20° e 30° C.

La temperatura degli avvolgimenti, determinata con il metodo per resistenza, è la temperatura media del rame.

I punti più caldi bisogna invece determinarli con il metodo termometrico.

La misura delle temperature con il metodo termometrico si effettua a mezzo di termometri ad alcool o a mercurio o con termocoppie. Il termometro si applica sulla parte accessibile ritenuta più calda avendo cura di realizzare un contatto termico il migliore possibile e con le condizioni di ventilazione normali del trasformatore.

Le temperature indicate nelle tabelle 1 e 2 sono le massime ammesse quando il trasformatore sia destinato a funzionamento continuo alla sua piena potenza e sia portato perciò a regime.

Nella tabella III riportiamo dalle norme tedesche VDE i valori di temperatura che sono tollerati negli avvolgimenti quando il trasformatore funzioni per breve tempo con il secondario in corto circuito e il primario alimentato alla sua tensione normale (temperatura misurata con il metodo della resistenza).

Le temperature della tabella III sono anche ammissibili, sempre per pochi minuti, qualora, fuori dei limiti delle norme, si debba progettare un trasformatore particolarmente economico. Per esempio un trasformatore destinato a servizio speciale di breve durata il cui intervallo di riposo sia sufficientemente

lungo perchè il trasformatore ritorni alla temperatura dell'ambiente (servizio di durata limitata).

Infatti per il materiale isolante non esiste una temperatura ben definita oltre la quale esso si guasti rapidamente e al disotto della quale non si deteriori

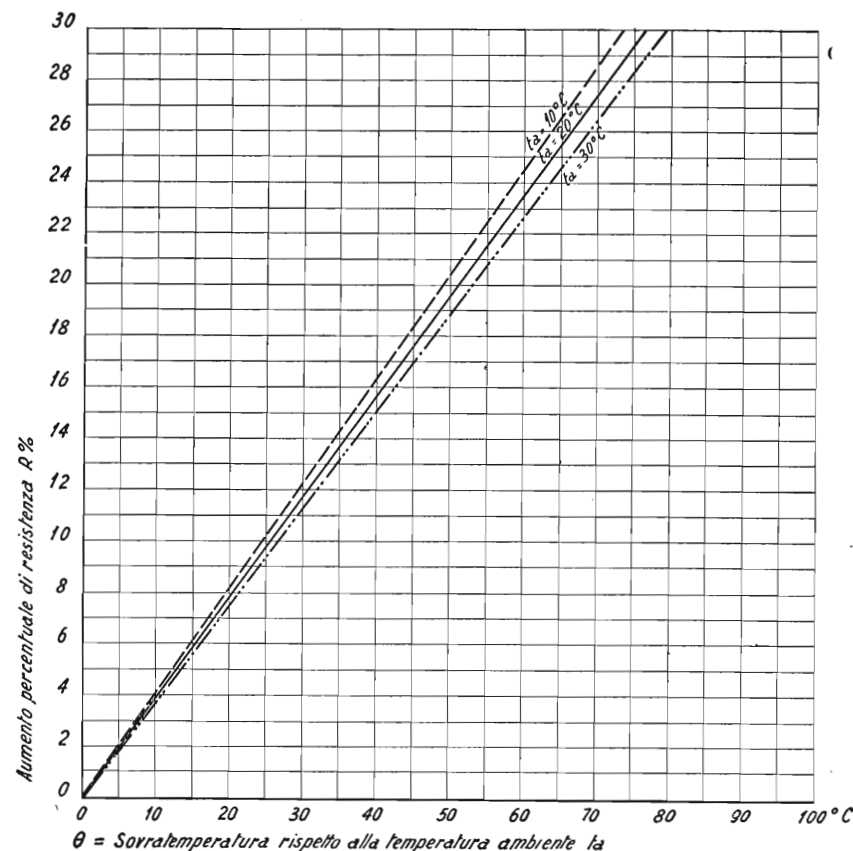


Fig. 3 - Sovratemperature in funzione dell'aumento percentuale di resistenza.

**Esempio.** - Attraverso la misura delle resistenze a freddo ( $R_f$ ) e a caldo ( $R_r$ ) dell'avvolgimento si determina l'aumento percentuale ( $R\%$ ). Supposto:  $R_f=100$  ohm;  $R_r=118$  ohm;  $R\% = \frac{118-100}{100} = 18\%$ . In corrispondenza  $R\% = 18$  ed al valore della temperatura ambiente  $t_a$  (supposto = 20° C) leggeremo sulle ascisse il valore di 46° C di sovratemperatura. In effetti quindi, la temperatura reale dell'avvolgimento sarà: 20 + 46 = 66° C.

affatto. Praticamente il deterioramento del materiale isolante avviene a tutte le temperature ed è funzione della durata del suo riscaldamento.

Pertanto è possibile sottoporre il materiale isolante a temperature effettive intorno ai 150° C come indicato nella tabella III, a condizione che queste punte di riscaldamento siano di breve durata.

CENNI SUL FUNZIONAMENTO

Si abbia un circuito magnetico chiuso sul quale sono avvolti due avvolgimenti, uno di alimentazione (primario) e l'altro di erogazione (secondario) (vedi fig. 4). Se si alimenta tra 1 e 1 il primario a mezzo di una corrente alternata si genera un flusso alternato che si concatena con ambedue gli avvolgi-

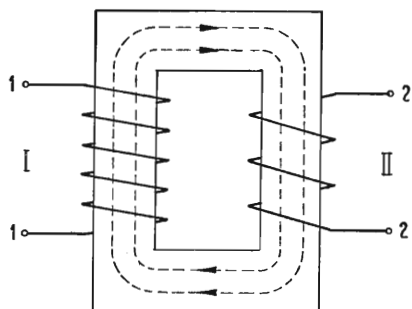


Fig. 4 - Nucleo a circuito chiuso con linee di flusso che concatenano simultaneamente l'avvolgimento I e II.

menti. Al secondario tra 2 e 2 si manifesta quindi una tensione alternata; ma finché il secondario rimane aperto in esso non può circolare corrente. Il funzionamento con secondario aperto dicesi funzionamento a vuoto del trasformatore e la corrente che circola nel primario dicesi corrente a vuoto  $I_0$ . Essa è la risultante della corrente di magnetizzazione  $I_m$  e della corrente  $I_a$  richiesta per fare fronte alle perdite nel nucleo (vedi fig. 5).

La corrente di magnetizzazione è una corrente sfasata in ritardo di  $90^\circ$

sulla tensione, che, come dice la parola, serve a magnetizzare il nucleo. Le spire  $N_1$  del primario moltiplicate per la  $I_m$  diconsi ampère-spire ( $N_1 I_m$ ). di magnetizzazione.

La  $I_a$  invece è la componente attiva in fase con la tensione e sofferisce alle perdite di Foucault e di isteresi nel nucleo.

Essendo la corrente di magnetizzazione notevolmente maggiore della  $I_a$ , la corrente a vuoto risultante è fortemente sfasata in ritardo rispetto alla tensione e pertanto il trasformatore a vuoto si comporta come una bobina di impedenza assorbendo dalla linea di alimentazione una potenza fortemente svattata. La corrente a vuoto si esprime in percento della corrente normale del funzionamento a carico e per piccoli trasformatori da 10 a 1000 VA è dell'ordine del  $30\% \div 10\%$  (il valore massimo per i trasformatori più piccoli).

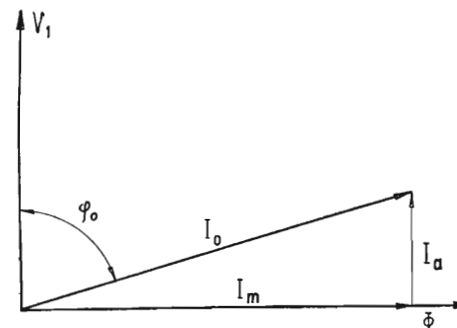


Fig. 5 - Rappresentazione vettoriale dello sfasamento della corrente a vuoto rispetto alla tensione primaria.

- $I_0$  = corrente a vuoto =  $\sqrt{I_a^2 + I_m^2}$
- $I_a$  = componente attiva della corrente a vuoto
- $I_m$  = componente reattiva o di magnetizzazione
- $\phi_0$  = angolo di sfasamento tra corrente a vuoto  $I_0$  e tensione  $V_1$  nel funzionamento a vuoto del trasformatore.

La corrente a vuoto aumenta con l'aumentare del numero dei giunti e della lunghezza del circuito magnetico.

Chiudendo il circuito secondario con una resistenza in esso circola una corrente e la corrente primaria aumenta in proporzione di quella richiesta dal secondario. Cioè il trasformatore regola automaticamente la potenza assorbita dal primario proporzionandola a quella richiesta dal secondario. Questo anche significa che se si richiede un carico superiore al dimensionamento dei conduttori gli avvolgimenti bruciano. La corrente  $I_1$  del primario a carico normale è notevolmente superiore alla corrente  $I_0$  a vuoto. Inoltre  $I_1$  risulta quasi in fase con  $V_1$  per cui il trasformatore a carico funziona con un fattore di potenza ( $\cos \phi$ ) assai superiore che a vuoto.

Quando la potenza assorbita dal secondario corrisponde alla potenza per cui il trasformatore è stato calcolato si dice che il trasformatore lavora a pieno carico. Se invece la potenza richiesta è, per esempio, la metà di quella per cui il trasformatore è stato previsto, si dice che il trasformatore lavora a metà carico.

Mentre i motori, essendo apparecchi utilizzatori, hanno un proprio fattore di potenza ben definito e pertanto hanno la potenza espressa dal prodotto:  $W = V I \cos \varphi$  dove:  $W$  = watt assorbiti;  $V$  = tensione in volt;  $I$  = corrente in ampere;  $\cos \varphi$  = fattore di potenza, i trasformatori, essendo apparecchi di alimentazione, forniscono una potenza che è soggetta volta per volta al  $\cos \varphi$  dell'apparecchio utilizzatore derivato. Quindi per rendere la potenza indipendente dal  $\cos \varphi$  del carico utilizzatore essa si indica di solito a mezzo della potenza apparente ossia dal semplice prodotto volt  $\times$  ampere (potenza per trasformatori monofasi).

Quando al secondario del trasformatore si applica un apparecchio utilizzatore la tensione secondaria subisce un abbassamento di valore. Lo scarto tra il valore a vuoto e quello a carico dicesi caduta di tensione. Essa si esprime in per cento del valore della tensione secondaria a vuoto.

$$(2) \quad 100 \frac{V_{2v} - V_{2c}}{V_{2v}} = v_2 \%$$

La caduta di tensione oltrechè dalle caratteristiche del trasformatore dipende dal  $\cos \varphi$  dell'apparecchio utilizzatore. Così uno stesso trasformatore ha cadute diverse a secondo che alimenta un carico resistivo a  $\cos \varphi = 1$  (come lampade a filamento incandescente, fornelli e stufe a resistenza) o un carico induttivo a  $\cos \varphi = 0,7$  (come un motore).

D'altra parte la corrente ammissibile negli avvolgimenti del trasformatore è proporzionata alla sezione dei conduttori, ossia per un dato trasformatore essa è costante. Ne deriva quindi che la massima potenza erogabile da un trasformatore corrisponde a quella di un carico con  $\cos \varphi = 1$ .

Noi ci riferiamo qui a trasformatori previsti per alimentare carichi a  $\cos \varphi = 1$  per cui i watt assorbiti coincidono con i VA.

Abbiamo visto che eccitando il trasformatore si stabilisce nel nucleo un flusso magnetico alternato. Esso è prodotto dalla corrente magnetizzante, che fluisce nelle spire del primario.

Per una legge fondamentale dell'elettrotecnica questo flusso induce negli avvolgimenti con esso concatenati una forza elettromotrice il cui valore è dato dall'espressione:

$$(3-a) \quad E = 4,44 f N \Phi$$

dove:  $E$  = tensione indotta agli estremi dell'avvolgimento in volt

$f$  = frequenza in periodi al secondo

$N$  = numero di spire dell'avvolgimento

$\Phi$  = flusso generato espresso in weber

La stessa (3-a) ci permette di stabilire il flusso quando al circuito sia impressa la tensione  $V_1$  alla frequenza  $f$

$$(3-b) \quad \Phi = \frac{V_1}{4,44 f N}$$

Essendo il flusso e la sua frequenza eguali tanto per l'avvolgimento primario di  $N_1$  spire che per l'avvolgimento secondario di  $N_2$  spire, le tensioni in-

dotte nei due avvolgimenti stanno fra loro nel rapporto delle spire, per cui si può scrivere:

$$(4) \quad \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$E_1$  e  $E_2$  = tensioni indotte nel primario e secondario

$N_1$  e  $N_2$  = spire del primario e secondario.

Il rapporto delle spire  $N_1/N_2 = \tau$  dicesi rapporto di trasformazione del trasformatore.

Poichè a vuoto la caduta di tensione al secondario è trascurabile, le tensioni ai capi del primario e del secondario  $V_1$  e  $V_2$  possono confondersi con le tensioni indotte  $E_1$  e  $E_2$  per cui nel funzionamento a vuoto il rapporto tra la tensione primaria e quella secondaria è praticamente eguale al rapporto delle spire, cioè:

$$(5) \quad \frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Quando si alimenta un apparecchio utilizzatore nel secondario passa una corrente di senso opposto alla primaria per cui le amperespire primarie e secondarie si contrastano fino a lasciare sussistere solo le amperespire di magnetizzazione necessarie per la creazione del flusso, il quale perciò è praticamente costante al variare del carico.

Perciò le amperespire che si vengono ad aggiungere al primario sono eguali ma di segno contrario a quelle del secondario.

Nel caso di pieno carico la corrente a vuoto è una piccola percentuale della corrente di carico per cui in via approssimativa si può scrivere:

$$(6) \quad I_1 N_1 = I_2 N_2$$

Le relazioni (3), (5) e (6) sono fondamentali per l'impostazione del calcolo dei trasformatori.

In rapporto allo sfruttamento dei materiali attivi dobbiamo tuttavia considerare ancora due formule, cioè la densità di corrente nel rame e la densità di flusso (induzione) nel nucleo.

La densità di corrente indica quanti ampere si ammettono per ogni millimetro quadrato di sezione del conduttore dell'avvolgimento e la indicheremo con  $\delta$ :

$$(7) \quad \delta = \frac{I}{S_{cu}} = \frac{\text{corrente in ampere}}{\text{sezione conduttore in mm}^2} = \left( \text{densità di corrente } \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right)$$

La densità di flusso  $\mathfrak{B}$  nel ferro è espressa dal rapporto:

$$(8) \quad \mathfrak{B} = \frac{\Phi}{S_m^2} = \frac{\text{flusso (weber)}}{\text{sezione effettiva del nucleo in m}^2} = \left( \text{induzione in } \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} \right)$$

Quando, come di solito, la sezione effettiva del nucleo è data in  $\text{cm}^2$  il valore del flusso in weber è dato da:

$$(9) \quad \mathfrak{B} S_{fe} \times 10^{-4} = \Phi \text{ (Wb)}$$

Allora la (3-a) si può scrivere:

$$(10) \quad E = 4,44 f N \mathfrak{B} S_{fe} \times 10^{-4} \text{ (volt)}$$

dove  $f$  = frequenza in periodi al secondo

$N$  = numero di spire dell'avvolgimento

$\mathfrak{B}$  = induzione in  $\text{Wb/m}^2$

$S_e$  = sezione effettiva del nucleo in  $\text{cm}^2$

*Nota:* Ricordiamo le seguenti relazioni tra il sistema Giorgi (volt, secondo, metro) da noi qui usato e il sistema C.G.S. elettromagnetico (centimetro, grammo, secondo).

flusso  $\Phi = 1$  weber (Wb) = 1 volt secondo (sistema Giorgi) =  
=  $10^8$  maxwell (sistema C.G.S.)

induzione  $\mathfrak{B} = 1 \text{ Wb/m}^2$  (sistema Giorgi) =  $10^4$  gaus (sistema C.G.S)

TAB. IV — LAMIERE PER TRASFORMATORI

T I P O N.	1	2	3	4
Lamiera spessore 0,5 mm, legata al silicio .....	0,5 % SI	1 % SI	2 % SI	4 % SI
Perdita specifica $ws$ (W/kg) a 1 $\text{Wb/m}^2$ e 50 Hz .....	3,6	3	2,3	1,7
T I P O N.	5	6	7	
Lamiera spessore 0,35 mm, legata al silicio .....	4 % SI	4 % SI	4 % SI	
Perdita specifica $ws$ (W/kg) a 1 $\text{Wb/m}^2$ e 50 Hz .....	1,3	1,08	0,8	

(1) La classificazione delle lamiere in tipo 1, 2, 3, ..., è stata fatta per nostra comodità e non ha alcun riscontro in commercio.

TAB. V — PERDITE IN W/kg A 50 Hz PER LAMIERE IN COMMERCIO

L A M I E R A T I P O (v. nota Tab. IV)	Valori dell'induzione $\mathfrak{B}$ in $\text{Wb/m}^2$			
	0,8	1,0	1,2	1,5
N. 1 - spessore 0,5 mm.	2,10	3,60	5,30	8,60
N. 2 - spessore 0,5 mm	1,85	3,00	4,50	7,40
N. 3 - spessore 0,5 mm	1,42	2,50	3,45	5,60
N. 4 - spessore 0,5 mm	1,06	1,70	2,50	4,00
N. 5 - spessore 0,35 mm	0,84	1,30	1,96	3,25
N. 6 - spessore 0,35 mm	0,68	1,08	1,58	2,55
N. 7 - spessore 0,35 mm	0,52	0,80	1,16	1,86



## PERDITE NEL TRASFORMATORE

Come in tutte le macchine anche nel trasformatore si hanno perdite che si manifestano nei materiali attivi. Abbiamo cioè perdite nel ferro e perdite nel rame.

## A) PERDITE NEL FERRO DEL NUCLEO.

Le perdite nel nucleo sono costituite da perdite di natura elettrica (per correnti parassite) e perdite di natura magnetica (per isteresi).

Le perdite per correnti parassite costituiscono dal 20 al 40 % delle perdite nel nucleo; la rimanente parte dell'80 ÷ 60 % è costituita dalle perdite per isteresi.

## a) Perdite di natura elettrica; ossia perdite per correnti parassite.

Se il nucleo fosse costituito da una sbarra di ferro massiccio, le correnti indotte in esso produrrebbero alte perdite le quali darebbero luogo a un forte riscaldamento del ferro. Per tato, per limitare queste perdite, il nucleo viene laminato, ossia formato da tati sottili lamierini di spessore 0,35 — 0,50 mm debolmente isolati tra loro.

Per ostacolare ulteriormente la circolazione di queste correnti parassite si aumenta la resistività del ferro usandolo in lega con piccole percentuali di silicio. Si ottengono in tal modo le cosiddette lamiere legate.

Le perdite per correnti parassite variano direttamente con il quadrato dello spessore del lamierino, con il quadrato dell'induzione, ossia della tensione di eccitazione, con il quadrato della frequenza e inversamente alla resistività della lamiera.

## b) Perdite di natura magnetica ossia per isteresi.

Il ferro oppone una certa inerzia alla variazione del campo magnetico cui è sottoposto per cui i valori dell'induzione seguono con un certo ritardo (isteresi) i valori del campo magnetico. In altre parole il passaggio dell'energia dallo stato elettrico a quello magnetico avviene con una certa perdita per isteresi. Essa dipende dalla qualità del materiale e non dalla forma del nucleo; quindi la laminazione del nucleo non influisce su di essa.

Le perdite per isteresi aumentano all'incirca con il quadrato dell'induzione, ossia della tensione di eccitazione, e con la frequenza.

La separazione delle perdite ha solo scopo di indagini.

Nella pratica si determina sperimentalmente il valore complessivo di perdita traducendone le leggi di variazione in funzione della frequenza e dell'induzione. Perciò i lamierini vengono catalogati in commercio secondo la loro perdita teorica per kg determinata con l'apparecchio di EPSTEIN. Questo apparecchio consiste essenzialmente di un nucleo magnetico campione eseguito con striscie della lamiera in prova. Il nucleo porta avvolgimenti di caratteristiche note.

Alimentando l'apparecchio di EPSTEIN, a una data frequenza, con valori diversi di tensione (a forma d'onda praticamente sinusoidale) si può tracciare la curva di perdita del lamierino in prova.

Diamo nella tabella IV la cifra di perdita in watt per kg, per  $\mathfrak{B} = 1 \text{ Wb/m}^2$  e  $f = 50 \text{ Hz}$ , di alcuni tipi di lamiera in commercio.

Si può ritenere con discreta approssimazione che, a pari frequenza, per valori di  $\mathfrak{B}$  compresi tra 0,8 e 1,4  $\text{Wb/m}^2$  la perdita teorica vari con il quadrato dell'induzione.

Così riferendoci alla lamiera tipo (1) si ha:

$$\begin{array}{ll} \text{per } \mathfrak{B} = 0,8 \text{ Wb/m}^2 & 3,6 \times 0,8^2 = 2,3 \text{ watt/kg} \\ \text{per } \mathfrak{B} = 1,2 \text{ Wb/m}^2 & 3,6 \times 1,2^2 = 5,2 \text{ watt/kg} \end{array}$$

Per valori di frequenza diversi da 50 Hz la perdita varia nel rapporto delle frequenze (per frequenze tra 40 e 60 Hz).

Es.: A 42 Hz le perdite diminuiscono, a pari induzione, nel rapporto  $42/50 = 0,84$ . Perciò la lamiera (1) per  $\mathfrak{B} = 1 \text{ Wb/m}^2$  e frequenza = 42 Hz ha perdita  $0,84 \times 3,6 = 3,02 \text{ W/kg}$ .

Quindi possiamo determinare con sufficiente approssimazione la perdita per kg di lamierino, ad una induzione e frequenza qualunque, semplicemente con la seguente formula:

$$(11) \quad \text{W/kg} = \frac{f}{50} w_s \mathfrak{B}^2$$

dove:

- $f$  = frequenza in periodi al secondo della tensione di alimentazione
- $w_s$  = perdita specifica a 1  $\text{Wb/m}^2$  per 50 Hz (in base al tipo di lamierino: vedi tab. IV)
- $\mathfrak{B}$  = valore dell'induzione considerata espressa in  $\text{Wb/m}^2$

Crediamo utile riportare nella tabella V i valori teorici di perdita, dati dalle ferriere per 50 Hz, a diversi valori di induzione.

Nella determinazione delle perdite reali del nucleo di un trasformatore i valori teorici di perdita sopra riportati vanno maggiorati di circa il 20 % per tenere conto del peggioramento di caratteristiche che il lamierino subisce in conseguenza della tranciatura e di altri maltrattamenti a cui è sottoposto.

In definitiva le perdite reali nel nucleo si possono calcolare con la formula seguente:

$$(12) \quad W_{fe} = 1,2 \frac{f}{50} w_s \mathfrak{B}^2 \text{ kg}_{fe} \text{ (watt)}$$

dove:

$W_{fe}$  = perdita reali in watt del nucleo  
 $f$  = frequenza della tensione di alimentazione  
 $ws$  = perdita specifica teorica del tipo di lamiera scelta a 1 Wb/m<sup>2</sup> (tab. IV)  
 $\mathfrak{B}$  = valore dell'induzione in Wb/m<sup>2</sup>  
 $kg_{fe}$  = peso in kg del lamierino del nucleo.

#### B) PERDITE NEL RAME.

Nei piccoli trasformatori che trattiamo le perdite nel rame si riducono alle sole perdite ohmiche perchè avendosi conduttori sottili e frequenze non elevate le perdite per correnti parassite sono trascurabili.

Pertanto possiamo scrivere:

$$(13) \quad W_{cu} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \text{ (watt)}$$

dove:

$W_{cu}$  = perdita totale in Watt nel rame  
 $I_1$  = corrente in ampere nel primario  
 $I_2$  = correnti in ampere nel secondario  
 $R_1$  = resistenza in ohm dell'avvolgimento primario  
 $R_2$  = resistenza in ohm dell'avvolgimento secondario

La resistenza di un conduttore elettrico si calcola:

$$(14) \quad R = \rho \frac{l}{s} \text{ (ohm)}$$

dove:

$R$  = resistenza in ohm alla temperatura t<sup>o</sup> C  
 $\rho$  = resistenza specifica (resistività in  $\Omega$  mm<sup>2</sup>/m alla temperatura t<sup>o</sup> C)  
 $l$  = lunghezza del conduttore in metri  
 $s$  = sezione del conduttore in mm<sup>2</sup>

La resistenza dei metalli aumenta con la temperatura.

Per rame elettrolitico dei conduttori elettrici si assume  $\rho = 0,0175 \Omega$  mm<sup>2</sup>/m per temperatura di 15 °C.

Per temperatura di 75 °C  $\rho = 0,021$ .

Convenzionalmente le perdite sono riferite a 75 °C.

Può riuscire comodo il calcolo delle perdite ohmiche nel rame in base al peso del conduttore senza fare intervenire nè la sua lunghezza nè la sezione. Abbiamo allora:

$$W_{cu} = 2,37 \delta^2 kg_{cu} \text{ (W a 750 C)}$$

dove:

$\delta$  = densità di corrente  
 $kg_{cu}$  = peso del conduttore in kg

*Esempio:* In un conduttore di rame avente peso di 100 grammi e densità eguale a un 1 A/mm<sup>2</sup> si hanno  $2,37 \times 1^2 \times 0,1 = 0,237$  watt. Invece per  $\delta = 2$  A/mm<sup>2</sup> si hanno  $2,37 \times 2^2 \times 0,1 = 0,95$  watt.

#### RENDIMENTO DEI TRASFORMATORI

Conoscendo le perdite nel rame e nel ferro si può determinare il rendimento del trasformatore:

$$(15) \quad \eta = \frac{VA_{sec}}{VA_{sec} + W_{fe} + W_{cu}} \times 100$$

dove:

$\eta$  = rendimento percentuale del trasformatore  
 $VA_{sec}$  = potenza resa al secondario  
 $W_{fe}$  = perdita nel ferro in W  
 $W_{cu}$  = perdita nel rame in W

Quanto più grande è la potenza di un trasformatore, tanto migliore di solito è il suo rendimento. A titolo di orientamento diamo i seguenti valori di rendimenti per potenze da:

3 a	10 VA	—	60 - 70 %
10 a	30 VA	—	65 - 80 %
30 a	50 VA	—	75 - 85 %
50 a	100 VA	—	80 - 90 %
100 a	1000 VA	—	oltre il 90 %

CAPITOLO IV

NUCLEO

Il nucleo o circuito magnetico ha lo scopo di raccogliere e convogliare il flusso magnetico generato dagli avvolgimenti. Il nucleo costituisce un circuito magnetico chiuso che nei piccoli trasformatori monofasi viene realizzato in tre forme: nucleo a mantello (fig. 6-a), nucleo a due gambe (fig. 6-b) e nucleo ad anello o toroidale (fig. 6-c).

Le forme generalmente usate sono le prime due.

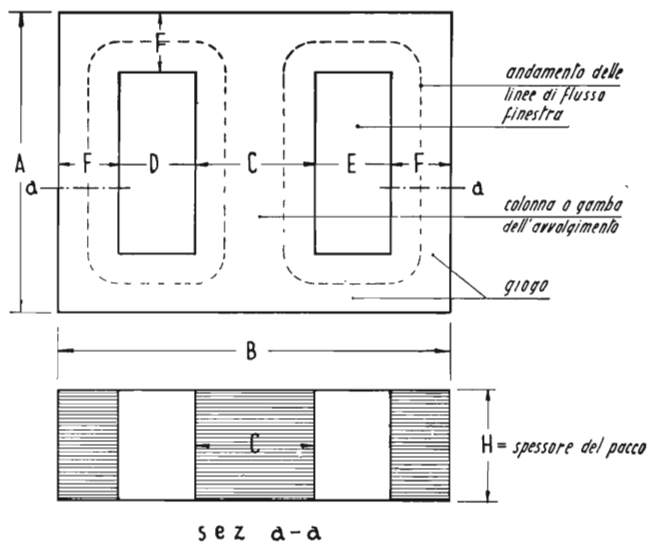


Fig. 6a - Nucleo monofase a mantello.

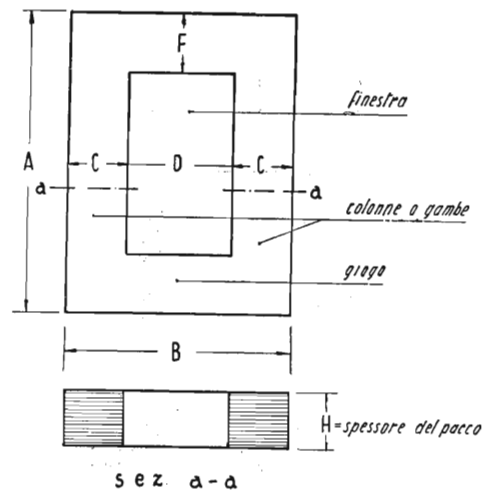


Fig. 6b - Nucleo monofase a due gambe.

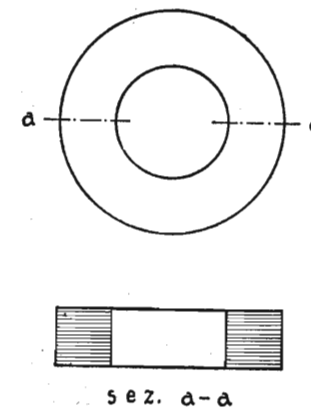


Fig. 6c - Nucleo ad anello.

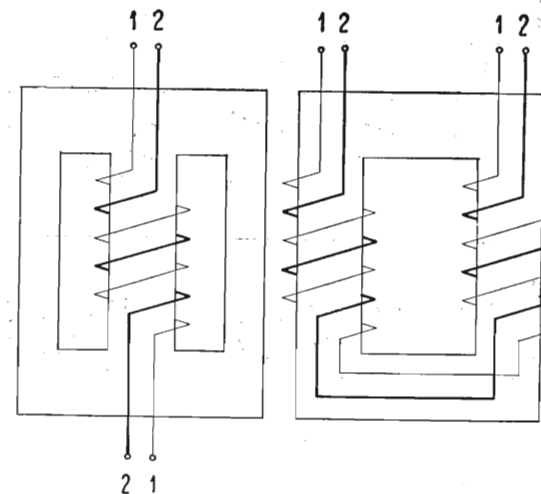


Fig. 7a - Nucleo monofase a mantello: la sola colonna centrale porta gli avvolgimenti. 1-1 morsetti dell'avvolgimento primario. 2-2 morsetti dell'avvolgimento secondario.

Fig. 7b - Nucleo monofase a due gambe - Due bobine, eguali, una su ogni gamba.

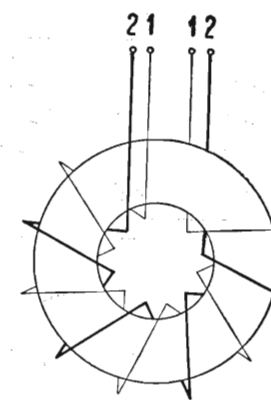


Fig. 7c - Nucleo monofase ad anello avvolto.

Premettiamo che nella costruzione di trasformatori normali è necessario che l'avvolgimento primario e secondario siano avvolti uno sopra l'altro, o per lo meno sulla stessa gamba, in modo che ambedue siano concatenati con lo stesso flusso, al fine di limitare la caduta di tensione al secondario.

Solo per costruzioni speciali in cui sono richieste forti cadute di tensioni il primario si avvolge su una gamba diversa da quella del secondario.

Nel nucleo a mantello (fig. 7-a) si ha una sola bobina, comprendente gli avvolgimenti primario e secondario, che viene infilata sulla gamba centrale. Le due gambe esterne non portano avvolgimenti e costituiscono la chiusura del circuito della gamba centrale.

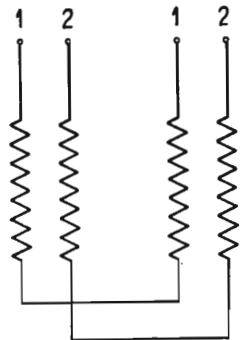


Fig. 8a - Avvolgimento primario e secondario ambedue connessi in serie.

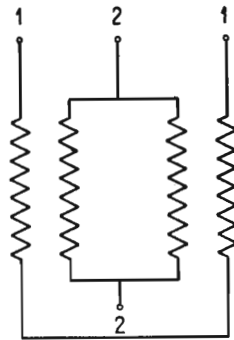


Fig. 8b - Avvolgimento primario in serie e avvolgimento secondario in parallelo.

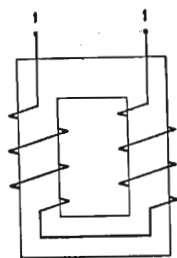


Fig. 9 - Bobine primarie ambedue avvolte nello stesso senso, connesse in serie.

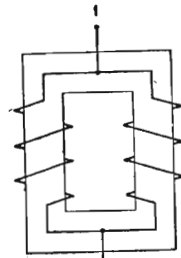


Fig. 10 - Bobine primarie avvolte in senso opposto, connesse in parallelo.

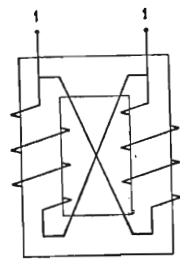


Fig. 11 - Bobine primarie avvolte nello stesso senso, connesse in parallelo.

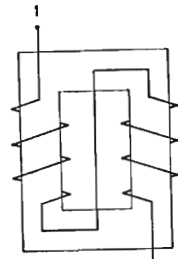


Fig. 12 - Bobine primarie avvolte in senso opposto, connesse in serie.

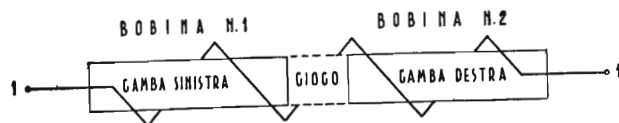


Fig. 13 - Bobine in serie - È come se si avesse un'unica bobina distesa sul nucleo reso rettilineo.

Pertanto la dimensione  $F$  nel nucleo a mantello è generalmente la metà di  $C$ . Nel nucleo a due gambe (fig. 7-b) le bobine sono due, ognuna comprendente metà spire del primario e metà spire del secondario, che possono essere indipendentemente connesse in serie o in parallelo tra loro. Cioè un avvolgimento, per esempio il primario, può avere le due gambe in serie e il secondario le due gambe in parallelo (v. fig. 8-a e 8-b). Il parallelo si usa quando, avendo forti correnti, occorre sdoppiare i conduttori. Naturalmente nell'eseguire le connessioni tra bobine di due gambe bisogna porre attenzione che le tensioni non si annullino. Nelle figure 9, 10, 11, 12 diamo le connessioni corrette che per chiarezza sono riferite ad un solo avvolgimento. Una regola semplice per ricordare il senso di avvolgimento di due bobine da connettersi in serie è pensare di continuare l'avvolgimento alla seconda gamba attraverso il giogo. Infatti i due avvolgimenti in serie possono considerarsi l'uno come la continuazione dell'altro; ovvero come un unico avvolgimento del nucleo reso rettilineo (v. fig. 13). Mentre per il nucleo a mantello e per quello a due gambe gli avvolgimenti vengono preparati a parte su forme e si possono quindi eseguire a macchina, il nucleo ad anello non permette una disposizione uniforme dell'avvolgimento (per la differenza tra diametro interno ed esterno) ed esige che le spire vengano avvolte direttamente su esso e a mano. Data questa difficoltà e il maggior sfrido per la tranciatura il nucleo toroidale è poco usato benché magneticamente sia superiore agli altri tipi, potendo essere eseguito senza giunti.

I nuclei, qualunque ne sia la forma, sono costituiti da tanti lamierini sovrapposti; ogni lamierino ha lo spessore di 0,35 o 0,5 mm.

Essi vengono isolati tra loro mediante un sottile foglio di carta o a mezzo vernice speciale applicata su una faccia ossia verniciando un lamierino sì e l'altro no. Si tiene conto dello spessore dell'isolamento introducendo nel calcolo della sezione netta della gamba un coefficiente di stipamento  $K_s$  che indichiamo nella tabella VI.

TAB. VI — ISOLAMENTO DEL LAMIERINO

Lamierino magnetico Spessore del foglio	Fattore di stipamento $K_s$	
	con carta	con vernice
0,35 mm .....	1,11	1,09
0,5 mm .....	1,08	1,06

Variando il numero dei lamierini sovrapposti è facile variare la sezione del nucleo. Generalmente è bene che lo spessore  $H$  del nucleo corrisponda alla larghezza  $C$  della gamba dell'avvolgimento in modo da avere la minima lunghezza di spira dell'avvolgimento.

Per quanto riguarda il tipo dei giunti magnetici questo può essere del tipo a lamierini intercalati (fig. 14) o a lamierini affacciati (fig. 15). Il tipo a lamierini affacciati facilita molto il montaggio dell'avvolgimento e l'impaccatura dei lamierini. Però è più complessa la chiusura del nucleo dovendo prevedere dei tiranti a vite per tenere i gioghi ben serrati contro le colonne. Per evitare che i

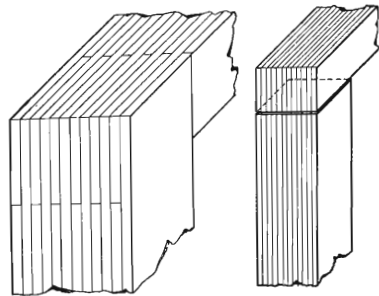


Fig. 14  
Giunto a lamiera intercalate.

Fig. 15  
Giunto a lamiera affacciate.

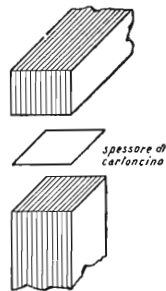


Fig. 16  
Cartoncino isolante nei giunti per evitare che i lamierini della colonna mettano in corto circuito quelli del giogo.

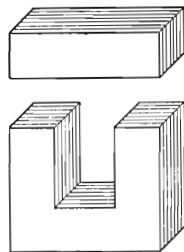


Fig. 17  
Nucleo con giunti affacciate per il giogo superiore e giunti intercalati nell'inferiore.

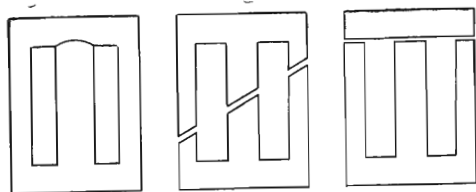


Fig. 18 Fig. 19 Fig. 20  
Diverse forme di giunti di lamierini tranciati.

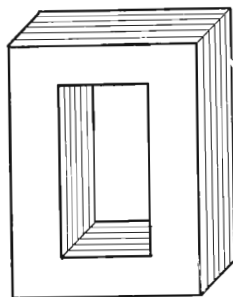


Fig. 21  
Nucleo a due gambe realizzato con lamierini tagliati con la taglierina.

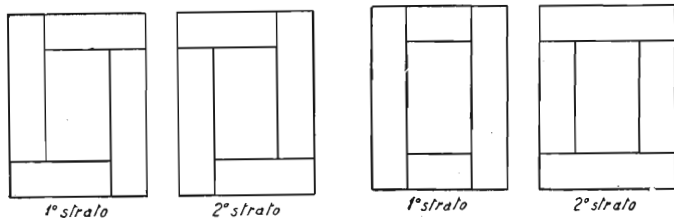


Fig. 22 Fig. 23  
Diversi sistemi di taglio ed impaccatura per realizzare il nucleo della fig. 20.

lamierini dei gioghi mettano in corto circuito quelli delle gambe e viceversa, il che comporterebbe aumento di perdite per il formarsi di correnti parassite, nelle parti affacciate viene interposto un foglio di carta, o cartoncino, di spessore  $0,03 \div 0,04$  mm (v. fig. 16).

Alle volte si usa il giunto affacciato per uno dei gioghi mentre l'altro si fa del tipo intercalato (fig. 17). In commercio esistono lamierini tranciati sia per nuclei a mantello che per nuclei a due gambe con un numero limitato di giunti.

Nel tipo a mantello i più piccoli hanno un solo taglio sulla gamba centrale (fig. 18), i più grandi invece sono composti di due parti uguali che vengono affacciate (fig. 19 e fig. 20). Per formare il nucleo a giunti sfalsati i singoli lamierini vengono infilati nel rocchetto dell'avvolgimento disposti alternativamente in un senso e nell'altro in modo che i tagli di due strati vicini siano fra loro sfalsati.

Un nucleo di facile costruzione, perchè i lamierini si possono tagliare con una semplice taglierina, è quello a due gambe rappresentato in fig. 21. Esso è costituito solamente da due formati di lamierino disposti alternativamente in modo da avere giunti intercalati. Si hanno però quattro giunti invece dei due esistenti per lamierini tranciati speciali. Le figg. 22 e 23 indicano due tipi di taglio dei lamierini per impaccatura a giunti sfalsati. Completato il pacco dei lamierini essi vanno stretti a mezzo di una salda legatura con cordicella ritorta, in modo che non possano vibrare e risultare rumorosi.

Per i nuclei tranciati i fornitori dei lamierini di solito hanno già serrapacchi e calotte adatte al nucleo e agli avvolgimenti.

In Italia non si è ancora effettuata la normalizzazione dei lamierini tranciati per piccoli trasformatori.

Però alcune ditte hanno costituito delle serie proprie con rapporti ben definiti tra le dimensioni.

Riportiamo, a titolo di esempio, alcune relazioni relative alle dimensioni che caratterizzano i lamierini di una nota ditta:

- la larghezza  $C$  della gamba centrale è il doppio della larghezza  $D$  della finestra  $C = 2D$ ;
- l'altezza  $E$  della finestra è il triplo della sua larghezza  $E = 3D$ ;
- la larghezza  $D$  della finestra è uguale alla larghezza  $F$  del giogo  $D = F$ ;
- rapporto fra l'area piena del lamierino e l'area della finestra:

$$\frac{\text{area piena del lamierino}}{\text{area libera della finestra}} = 5$$

## AVVOLGIMENTI E RELATIVI ROCCHETTI

Nei piccoli trasformatori gli avvolgimenti primario e secondario di solito sono avvolti uno sopra l'altro e formano una unica bobina. Il conduttore viene avvolto a spirale in più strati su un rocchetto che ha la funzione sia di isolamento verso il nucleo che di sostegno degli avvolgimenti.

Il rocchetto di solito si costruisce in carta o cartoncino incollato in modo da risultare sottile e nello stesso tempo robusto e rigido.

Si può fabbricare un rocchetto servendosi di una forma di legno sulla quale si avvolge della carta in più strati, incollati tra loro con colla da falegname o gomma arabica.

Si prevede la carta più larga dell'altezza del rocchetto, si taglia agli estremi lungo gli spigoli e queste parti si ripiegano e incollano alle due flange, le quali in tal modo vengono rigidamente fissate al corpo del rocchetto.

L'uscita dei capi dell'avvolgimento all'esterno del rocchetto avviene attraverso fori praticati nelle flange in corrispondenza della zona non coperta dalle lamiere del nucleo. Le uscite sono sempre punti delicati specialmente quando il filo è sottile e facile a rompersi. In questi casi si saldano i capi dell'avvolgimento, e le eventuali prese, a sottili lastre di rame le quali si possono facilmente fermare sul rocchetto e portare all'esterno. Le lastre saranno isolate tra fogli di carta.

Invece di lastre di rame può usarsi treccia flessibile di rame che può facilmente piegarsi senza eccessivo pericolo di spezzarsi.

Le spire sul cartoncino vengono avvolte a spirale, una accanto all'altra fino a riempire la lunghezza del rocchetto; formano cioè un primo strato sopra il quale vengono avvolti altri strati fino ad esaurire le spire richieste.

Tra gli strati può essere interposto un sottile foglio di carta. Alle volte l'interstrato si pone tra ogni strato, altre volte tra gruppi di strati.

La carta ha il triplice compito di irrigidire la bobina, di rendere gli strati uniformi, non permettendo l'incastro delle spire nello strato sottostante e di assicurare un adeguato isolamento.

Naturalmente, per quanto sottile, l'interstrato incide assai sull'utilizzazione dello spazio disponibile per l'avvolgimento e l'utilizzazione è tanto minore quanto più piccolo è il diametro del filo.

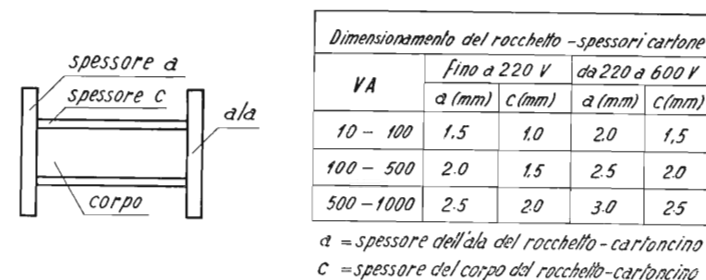


Fig. 24 - Dimensionamento del rocchetto di sostegno degli avvolgimenti in funzione della potenza del trasformatore e del valore più alto della tensione degli avvolgimenti.

L'uso degli interstrati è basato su criteri vari, quale il diametro del filo, il tipo di isolamento e la tensione che risulta tra strati.

La fig. 24 dà alcune misure per il dimensionamento del rocchetto.

Tra avvolgimento primario e avvolgimento secondario verrà sempre disposto una fasciatura di carta il cui spessore sarà in relazione al valore della tensione degli avvolgimenti.

La bobina finita sarà a sua volta fasciata con nastro di cotone, o carta, metà sovrapposto in modo che gli avvolgimenti risultino ben legati e protetti.

Infine la bobina finita potrà, dopo eventuale primo essiccamento in stufa, essere immersa in vernice Sterling o lacche equivalenti, che, a seconda del tipo, potranno esigere un asciugamento ancora in stufa.

PROCEDIMENTO DI CALCOLO

Il progetto di un trasformatore può eseguirsi in numerose soluzioni, potendosi alterare, entro limiti abbastanza vasti, il rapporto tra il peso del lamierino magnetico e quello del rame.

Talvolta saranno esigenze di ingombro o di ripartizione perdite, più sovente il fattore economico, cioè il rapporto tra il costo rame e costo lamierino, a indicare se è da preferirsi un nucleo più grande con meno rame ad uno più piccolo con più rame.

Per trasformatori che debbono rimanere con il primario inserito di continuo, pur avendo il secondario che eroga corrente solamente ad intervalli (per esempio l'alimentazione di un frigorifero attraverso un trasformatore) (\*) sarà consigliabile cercare di ridurre al minimo le perdite a vuoto nel ferro e perciò si preferirà un peso di nucleo piuttosto piccolo.

Se nulla è precisato il trasformatore si intende per servizio continuo.

Quando si esige un funzionamento particolare esso deve essere esplicitamente indicato nella richiesta.

Ricordiamo brevemente:

— il numero di spire aumenta diminuendo la sezione della colonna del ferro;

— la sezione del conduttore degli avvolgimenti è indipendente dalla sezione della colonna del ferro, cioè dal numero di spire.

Pertanto aumentando la sezione del ferro in genere si risparmia rame e viceversa.

Generalmente per limitare le perdite, e la corrente a vuoto, oltre che il ronzio del nucleo (dovuto alle vibrazioni dei lamierini) si lavora intorno a 1,2

(\*) Spesso si preferisce inserire e disinserire il carico agendo sul circuito secondario e non sul primario, lasciando in tal modo il trasformatore eccitato di continuo e ciò per sottrarre gli apparecchi alimentati dal trasformatore alle sovratensioni di estracorrenti originate nel trasformatore stesso.

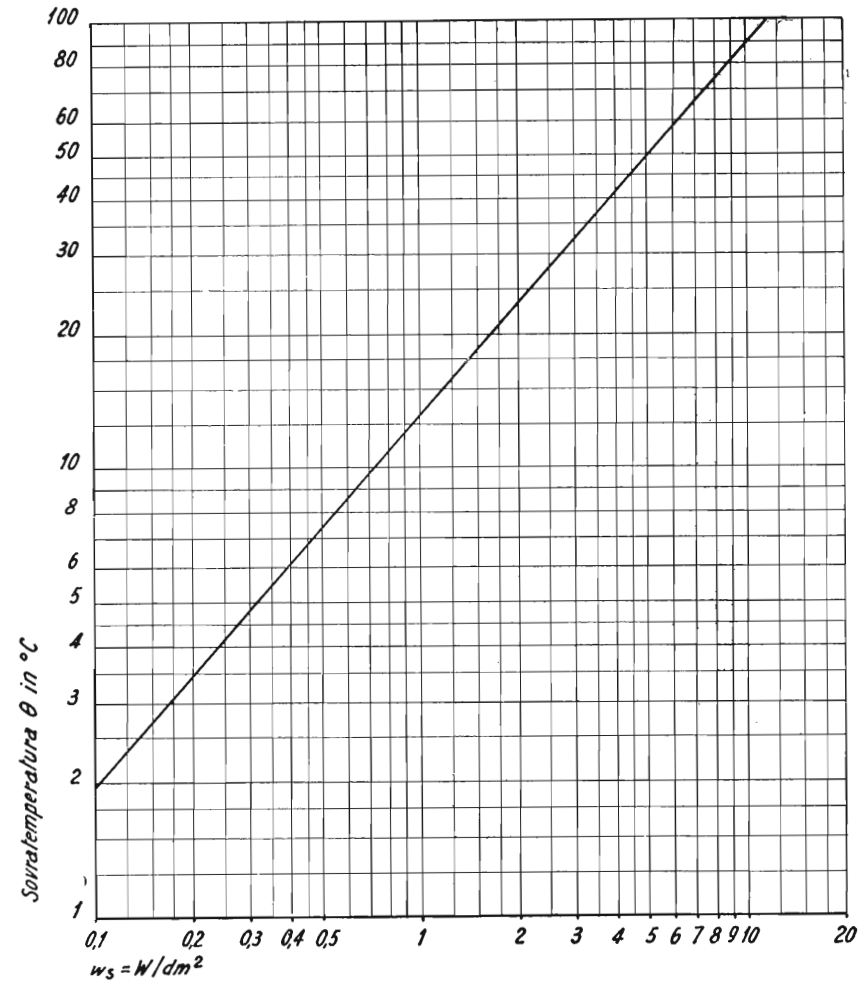


Fig. 25 - Sopraelevazione sull'ambiente della temperatura media a regime per piccole bobine in aria (altezza massima 1,5 dm) su nucleo eccitato.

La formula esponenziale corrispondente è:  $\theta = 13 w_s^{0,84}$ ; dove  $\theta$  = sopra elevazione media in gradi della bobina sull'ambiente.

$w_s$  = watt nella bobina per dm<sup>2</sup> di superficie disperdente.

Esempio: con  $w_s = 5$  W/dm<sup>2</sup> si legge una sopraelevazione di 50° C.

Se la temperatura dell'ambiente è di 40° C la temperatura raggiunta dalla bobina è di 50° + 40° = 90° C.

Wb/m<sup>2</sup>. Con lamiera a bassa perdita, se non ha importanza la rumorosità del nucleo, si può arrivare fino a 1,5 Wb/m<sup>2</sup>.

Data la disposizione delle lamelle e la loro vasta superficie esposta le per-

dite generate nel lamierino vengono in genere facilmente dissipate e quindi di esse, almeno dal lato riscaldamento, non ci preoccuperemo.

Cercheremo invece di valutare il riscaldamento degli avvolgimenti per potere determinare la massima corrente ammessa in essi nel rispetto delle sovratemperature delle Norme. Sul riscaldamento degli avvolgimenti è basata la nostra impostazione di calcolo.

La curva di riscaldamento dalla quale sono derivate le tabelle di calcolo, 1 ÷ 8 (pag. 45 ÷ 57), è data dalla fig. 25 e vale per piccole bobine di avvolgimenti aventi un'altezza massima di circa 1,5 dm e disposti in ambiente a libera circolazione d'aria.

In base ai watt per dm<sup>2</sup> di superficie disperdente si leggono le sovratemperature medie raggiunte negli avvolgimenti.

Esempi: avendo 2 W/dm<sup>2</sup> si ha 23,5° C di sovratemperatura sull'ambiente; con 5 W/dm<sup>2</sup> si ha 50° C di sovratemperatura sull'ambiente.

I watt da dissipare sono le perdite calcolate negli avvolgimenti e la superficie disperdente (espressa in dm<sup>2</sup>) si può ritenere eguale a 1,5 volte la superficie cilindrica esterna della bobina. Questa è una valutazione semplificata: infatti la superficie disperdente reale è costituita:

- a) dalla superficie libera cilindrica esterna della bobina;
- b) dalle superfici degli spessori delle due testate della bobina, la cui efficienza è però diminuita dal ricoprimento delle flange del rocchetto;
- c) dalla superficie interna della bobina affacciata al nucleo, attraverso il quale, perchè di solito è a temperatura inferiore a quella della bobina a pieno carico, avviene pure una dispersione di calore.

La somma delle superfici b) e c) si ritiene equivalente a metà della superficie a) per cui, come detto sopra, la superficie disperdente effettiva totale si assume sia una volta e mezza quella della superficie a).

Ne deriva che la corrente ammessa nel conduttore diminuisce con l'aumento dello spessore della bobina.

Nelle tavole da 1 a 8 (pag. 45 ÷ 57) sono riportate le varie curve per la determinazione delle grandezze che interessano il calcolo.

La loro applicazione è riportata al calcolo dettagliato di un piccolo trasformatore monofase a mantello da 300 VA. (tav. 9 a pag. 58 e seguenti). Altri esempi di calcolo di trasformatori a mantello sono stati invece eseguiti su moduli dai quali è più facile avere una visione d'insieme di tutti gli elementi del trasformatore.

Il procedimento di calcolo indicato nelle tavole 1 ÷ 8 è valido sia per i trasformatori a mantello che a due colonne. Tuttavia, per questi ultimi — essendo l'avvolgimento suddiviso in due parti — è opportuno tenere presenti alcune lievi varianti di impostazione, come è indicato nel capitolo che segue.

## CAPITOLO VII

### TRASFORMATORE MONOFASE CON NUCLEO A DUE COLONNE

Il calcolo, come è stato detto nel capitolo precedente, si conduce in modo analogo a quanto indicato per il nucleo a mantello, ad eccezione dei seguenti punti:

— scelta delle dimensioni del formato del nucleo:

$$A \times B \text{ (cm}^2\text{)} = 50 \sqrt{VA/fB} \text{ (nucleo a due colonne, due colonne avvolte)}$$

$$A \times B \text{ (cm}^2\text{)} = 80 \sqrt{VA/fB} \text{ (nucleo a mantello, una colonna avvolta)}$$

$$\text{— volt/spira} = \frac{VA \times (I + v\%)}{A/\text{cm}^2 \times (D' \times E')} \text{ (nucleo a 2 colonne)}$$

$$\text{— volt/spira} = \frac{2 \times VA \times (I + v\%)}{A/\text{cm}^2 \times (D' \times E')} \text{ (nucleo a mantello)}$$

— per il nucleo a due colonne lo spessore dell'avvolgimento si determina in base alla dimensione  $D'$  del rocchetto, la quale dimensione è un po' minore della metà della finestra  $D$ ;

— per il nucleo a mantello lo spessore dell'avvolgimento si determina in base alla  $D'$  che è un poco inferiore al totale della finestra  $D$ .

Per il nucleo a due gambe avremo pertanto gli avvolgimenti ripartiti su due bobine eguali, una per ogni gamba, ognuna composta di metà spire del primario e metà spire del secondario.

Le bobine in genere si prevedono per la connessione in serie. La disposizione in parallelo si effettua quando si abbiano forti correnti e occorra quindi disporre due conduttori in parallelo.

*Esempio di calcolo di trasformatore monofase su nucleo a due colonne.*

Elementi noti: 300 VA;  $f = 50$  Hz

$$V_1 = 220 \text{ V}, \quad V_2 = 160 \text{ V a } \cos \varphi = 1$$

Elementi prefissati: nucleo a due colonne:



- lamierini spessore 0,35 mm; isol. carta; perdita  $ws = 1,96 \text{ W/kg}$  a  $1,2 \text{ Wb/m}^2$ ;
  - avvolgimenti in filo rame smalto normale.
- Elementi di orientamento per l'impostazione del calcolo:
- scelta delle dimensioni del formato del nucleo:

$$A \times B \text{ (cm}^2\text{)} = 50 \sqrt{300/50 \times 1,2} = 112 \text{ cm}^2$$

Poniamo che il nucleo disponibile più prossimo risulti:

$$A \times B = 15 \times 9 = 135 \text{ cm}^2$$

ed abbia le seguenti dimensioni (fig. 26):

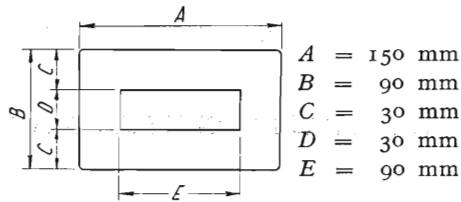


Fig. 26

Ogni rocchetto sarà eseguito per avere (fig. 27):

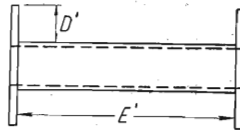


Fig. 27

$$\begin{aligned}
 D' &= 12 \text{ mm} \\
 E' &= 85 \text{ mm} \quad D' \times E' = 10,2 \text{ cm}^2 \\
 gi &= 0,5 \text{ mm (gioco radiale interno)} \\
 c &= 1,5 \text{ mm (spessore del rocchetto)} \\
 a &= 2 \text{ mm (spessore dell'ala)}
 \end{aligned}$$

Dalla tav. 3 determiniamo il rendimento  $\eta = 91,5 \%$ .

Dalla tav. 4 la caduta al secondario  $v \% = 3,5$ .

Primario:

$$V_1 = 220 \text{ V}, \quad I_1 = \frac{300}{0,915 \times 220} = 1,49 \text{ A}$$

Secondario:

$$V_{2c} = 160 \text{ V}, \quad V_{2v} = 160 \times 1,035 = 166 \text{ V},$$

$$I_2 = \frac{300}{160} = 1,88 \text{ A}.$$

Per spessore di avvolgimento di 15 mm dalle tavole 5 e 6a abbiamo:

Primario:

$$\begin{aligned}
 d_1 &= 0,9, \quad d'_1 = 0,97, \quad n_1 = 9,8, \\
 \text{mm}^2 &0,636, \quad A/\text{cm}^2 = 97, \quad \delta = 2,34
 \end{aligned}$$

Secondario:

$$\begin{aligned}
 d_2 &= 1,0, \quad d'_2 = 1,08, \quad n_2 = 8,8, \\
 \text{mm}^2 &0,785, \quad A/\text{cm}^2 = 98, \quad \delta = 2,39.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V/\text{sp} &= \frac{VA \times (1 + v\%)}{A/\text{cm}^2 \times (D' \times E')} = \frac{300 \times 1,035}{97,5 \times 10,2} = 0,312; \\
 \text{sp}/V &= 3,2
 \end{aligned}$$

$$N_1 = 3,2 \times 220 = 704 \text{ spire totali (due gambe)}$$

$$N_2 = 3,2 \times 166 = 532 \text{ spire totali secondarie (due gambe)}$$

$$N_{1/2} = 352 \text{ spire primarie per ogni bobina}$$

$$N_{2/2} = 266 \text{ spire secondarie per ogni bobina}$$

Spire per strato:

$$\text{I) } 8,5 \times 9,8 = 83 \text{ spire}$$

$$\text{II) } 8,5 \times 8,8 = 75 \text{ spire}$$

Numero di strati:

$$\text{I) } 352 : 83 = 4,24 = 5 \text{ strati}$$

$$\text{II) } 226 : 75 = 3,55 = 4 \text{ strati}$$

Spessore radiale:

$$\text{I) } 0,97 \times 5 = 4,85$$

$$0,1 \times 4 = 0,40$$

$$z_e = 5,25 \text{ mm}$$

$$\text{II) } 1,08 \times 4 = 4,32$$

$$0,10 \times 3 = 0,30$$

$$z_i = 4,62 \text{ mm}$$

Ingombro assiale:

$$\text{I) } 0,97 \times 84 = 81,5 \text{ mm}$$

$$\text{II) } 1,08 \times 76 = 82 \text{ mm}$$

Ingombro radiale totale:

$$2 gi + 2 c + z_i + z_i + 2 i + z_e + z_e + 2 \text{ fasc.}$$

Disposizione radiale:

$$\begin{aligned}
 2 gi & 1,00 & C &= 30 \\
 2 c & 3,00 & H &= 42,5 \text{ (spessore del pacco)} \\
 z i & 4,62 & & 72,5 \times 2 = 145 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$8,62 \text{ (v)}$$

Spira media II:

$$l_i = 145 + 4 \times 8,62 = 179,5 \text{ mm}$$

$$z_i$$

$$2 i$$

$$z_e$$

$$19,49 \text{ (w)}$$

Spira media I:

$$l_e = 145 + 4 \times 19,49 = 223 \text{ mm}$$

$$2,00$$

$$26,74 \text{ mm} < 30 \text{ mm (D)}$$

Peso del rame:

$$\text{I) } 8,9 \times 2 \times 352 \times 0,636 \times 223 \times 10^{-6} = 0,89 \text{ kg}$$

$$\text{II) } 8,9 \times 2 \times 266 \times 0,785 \times 179,5 \times 10^{-6} = 0,67 \text{ kg}$$

$$1,56 \text{ kg}$$

Perdite  $I^2 R$  nel rame:

$$\text{I) } 2,37 \times 2,34^2 \times 0,89 = 11,6 \text{ watt}$$

$$\text{II) } 2,37 \times 2,39^2 \times 0,67 = 9,1 \text{ watt}$$

$$20,7 \text{ watt tot.}$$

Peso del lamierino:

$$A \times B - D \times E = 108 \text{ cm}^2$$

$$7,7 \times 108 \times 4,25/1,09 \times 10^{-3} = 3,24 \text{ kg}$$

Perdite nel lamierino:

$$1,2 \times 1,96 \times 3,24 = 7,6 \text{ watt}$$

Verifica della caduta di tensione al secondario:

$$\frac{11,6}{1,49} \frac{532}{704} + \frac{9,1}{1,88} = 5,9 + 4,85 = 10,75 \text{ volt}$$

La tensione a vuoto secondaria dovrebbe quindi essere di:

$$160 + 10,75 = 170,75 \text{ volt}$$

Dobbiamo quindi aumentare le spire secondarie da 522 a 547.

Verifica del rendimento:

$$\frac{300}{300 + 20,7 + 7,6} = 91,3 \% \text{ (previsto } 91,5 \% \text{)}$$

## PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO E IMPOSTAZIONE DI CALCOLO DEGLI AUTOTRASFORMATORI

### Generalità

Si abbia un nucleo con un solo avvolgimento, per esempio, di 10 spire, e questo sia alimentato a 100 volt. Derivando dallo stesso avvolgimento due prese, comunque situate, tra i loro estremi risulta una tensione che è proporzionale al numero di spire incluse tra le prese, come se si avesse un avvolgimento secondario separato. Possiamo quindi scrivere, come per un trasformatore a due avvolgimenti:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

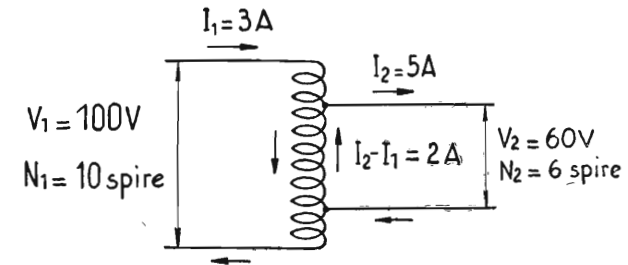


Fig. 28 - Schema di principio dell'autotrasformatore.

Nel nostro esempio (fig. 28):

$$V_2 = V_1 N_2 / N_1 = \frac{100 \times 6}{10} = 60 \text{ V}$$

D'altra parte sappiamo che la corrente che fluisce nel secondario è in ogni istante di segno opposto alla corrente nel primario, essendo le amperepire del primario eguali alle amperepire secondarie. Infatti trascurando la corrente a vuoto, si può scrivere:  $N_1 I_1 = N_2 I_2$ .

Ritornando alla nostra figura, appare quindi che nel tratto di avvolgimento che funge da secondario la corrente che vi passa è la differenza tra la corrente secondaria e la corrente primaria (nel nostro caso  $5A - 3A = 2A$ ).

Un circuito sifatto rappresenta il circuito di un autotrasformatore (fig. 28). Pertanto l'autotrasformatore è un trasformatore particolare avente un unico avvolgimento, che può considerarsi come risultante dalla sovrapposizione del circuito primario al circuito secondario.

#### Considerazioni sull'autotrasformatore.

Si possono considerare nell'autotrasformatore due parti dell'avvolgimento: la I (fig. 29) che appartiene solamente al circuito a maggior tensione e la II che è in comune sia al circuito di alta tensione che al circuito di bassa tensione.

La parte I la denomineremo avvolgimento *serie* e la parte II avvolgimento *comune*.

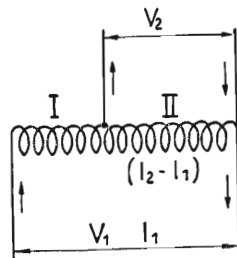


Fig. 29 - Suddivisione dell'avvolgimento in un autotrasformatore.

Essendo la corrente del primario  $I_1$  in opposizione alla corrente secondaria  $I_2$ , l'avvolgimento comune (II) viene percorso dalla differenza delle due correnti  $I_2 - I_1$  e perciò è possibile fare una economia nella sezione del conduttore.

Trascurando perdite, cadute e corrente a vuoto possiamo per l'autotrasformatore monofase scrivere:

$$\text{— potenza prelevata dalla linea} = \text{potenza resa} = \text{potenza passante, ossia:} \\ V_1 I_1 = V_2 I_2 = VA \quad (1)$$

— potenza nell'avvolg. serie = potenza nell'avvolg. comune = potenza interna, ossia:

$$(V_1 - V_2) I_1 = V_2 (I_2 - I_1) = VA_i \quad (2)$$

La potenza espressa nella (1) dicesi potenza nominale o potenza passante dell'autotrasformatore; quella espressa nella (2) è la potenza trasformata o potenza interna dell'autotrasformatore.

Il rapporto tra la potenza interna e la potenza passante:

$$\frac{V_1 - V_2}{V_1} = K_r$$

è il rapporto di riduzione dell'autotrasformatore.  $V_1$  è la maggiore delle due tensioni. Quindi è anche:

$$VA \times K_r = VA_i$$

posia la potenza interna di un autotrasformatore si ottiene moltiplicando la potenza passante per il rapporto di riduzione  $K_r$  dell'autotrasformatore.

Ad esempio un autotrasformatore da 300 VA con rapporto 120/160 V avrà la potenza interna:

$$VA_i = 300 \frac{160 - 120}{160} = 300 \times 0,25 = 75 \text{ VA}$$

Ossia l'autotrasformatore da 300 VA, rapporto 120/160 V equivale ad un trasformatore della potenza nominale di 75 VA con rapporto 120/40 V.

Da quanto sopra, risulta che il calcolo dell'autotrasformatore si può effettuare considerando di avere un trasformatore in cui il primario abbia una tensione  $V_1 - V_2$  con corrente  $I_1$ ; e il secondario una tensione  $V_2$  con corrente  $I_2 - I_1$ .

I valori percentuali della caduta di tensione, delle perdite e della corrente a vuoto vengono calcolati riferendoli dapprima alla potenza del trasformatore equivalente, cioè alla potenza interna dell'autotrasformatore. I corrispondenti valori riferiti alla potenza passante dell'autotrasformatore sono quindi ottenuti moltiplicando i valori sopra trovati per il rapporto di riduzione

$$\frac{V_1 - V_2}{V_1} = K_r$$

Di solito l'autotrasformatore si definisce in base alla sua potenza passante e non in base alla sua potenza interna. Questa sarebbe complessa da definire quando l'autotrasformatore avesse più prese. La potenza passante interessa chi si serve dell'autotrasformatore mentre la potenza interna dà al progettista un'indicazione per il suo dimensionamento.

Per il calcolo delle sezioni dei conduttori nei diversi tratti tra le prese è opportuno preparare una tabella delle correnti considerando i diversi funzionamenti uno alla volta. I valori massimi per ogni tratto servono a determinare la sezione più opportuna del conduttore.

#### Uso, vantaggi e svantaggi dell'autotrasformatore.

L'autotrasformatore può essere tanto elevatore che abbassatore. Esso è tanto più conveniente quanto minore è il rapporto di riduzione, cioè quanto più la tensione primaria è vicina alla secondaria. In genere si ricorre all'autotrasformatore quando il rapporto tra le tensioni non è superiore a tre, avendosi in tal caso ancora una sensibile economia di materiale.

Avendo minori dimensioni, anche il costo è minore; inoltre si hanno perdite minori, caduta secondaria inferiore e minore corrente a vuoto in confronto al trasformatore di egual potenza.

L'autotrasformatore presenta però anche svantaggi che principalmente riguardano la sicurezza nei confronti dell'isolamento. Infatti, essendo gli avvolgimenti metallicamente connessi tra loro, ogni circuito è soggetto ai disturbi generati nell'altro. In particolare una terra accidentale sul lato alta tensione può portare il circuito di bassa tensione ad assumere il potenziale dell'alta tensione.

Perciò quando si richiede una certa sicurezza di isolamento (per esempio alimentazione di strumenti di laboratorio), è preferibile usare il trasformatore anziché l'autotrasformatore.

**Esempio di autotrasformatore con più rapporti di tensione.**

Faremo l'esempio di un autotrasformatore con alimentazione a 160 V, 50 Hz e due prese secondarie per 120 e 220 V, ambedue per erogare, non simultaneamente, una potenza di 400 VA.

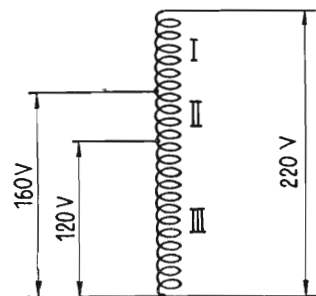


Fig. 30 - Avvolgimento di un autotrasformatore a più rapporti.

Le due prese dividono l'avvolgimento in tre parti I, II, III (fig. 30), ognuna delle quali percorsa da correnti massime diverse. I valori delle correnti massime di ogni tratto I, II, III moltiplicati per le rispettive tensioni parziali ci danno tre potenze (VA)<sub>I</sub>, (VA)<sub>II</sub> e (VA)<sub>III</sub> la cui semisomma diremo potenza equivalente interna dell'autotrasformatore. In base a questa potenza viene dimensionato l'autotrasformatore.

Consideriamo separatamente i due funzionamenti possibili, trascurando, per semplicità, perdite, corrente a vuoto e cadute.

1°) Funzionamento: Rapporto 160/220 V, 400 VA

$$400 \frac{220 - 160}{220} = \frac{60}{220} 400 = 109 \text{ VA}$$

corrente di linea:

$$I_1 = \frac{400}{160} = 2,5 \text{ A}$$

corrente di linea:

$$I_2 = \frac{400}{220} = 1,82 \text{ A}$$

corrente nell'avvolgimento tratto I (avvolg. serie)

$$1,82 \text{ A}, 60 \text{ V}$$

corrente nell'avvol. tratti II, III (avvolg. comune):

$$2,5 - 1,82 = 0,68 \text{ A}, 160 \text{ V}$$

Deve anche verificarsi:

$$1,82 \text{ A} \times 60 \text{ V} = 0,68 \text{ A} \times 160 \text{ V} = 109 \text{ VA}$$

2°) Funzionamento: Rapporto 160/120 V, 400 VA

$$\frac{160 - 120}{160} 400 = \frac{40}{160} 400 = 100 \text{ VA}$$

corrente di linea:

$$I_1 = \frac{400}{160} = 2,5 \text{ A}$$

corrente di linea:

$$I_2 = \frac{400}{120} = 3,33 \text{ A}$$

corrente nell'avvolg. tratto II (avvolg. serie)

$$2,5 \text{ A}, 40 \text{ V}$$

corrente nell'avvolg. tratto III (avvolg. comune):

$$3,33 - 2,5 = 0,83 \text{ A}, 120 \text{ V}$$

$$2,5 \text{ A} \times 40 \text{ V} = 0,83 \times 120 \text{ V} = 100 \text{ VA}$$

Possiamo riportare in una tabella i valori trovati sopra.

	tratto I	tratto II	tratto III
a 220 V secondari a 120 V secondari	1,82 A —	0,68 A 2,5 A	0,68 A 0,83 A
Correnti massime .....	1,82 A	2,5 A	0,83 A
Tensione per grad. ....	60 V	40 V	120 V
Pot. mass. per grad. ....	109 VA	100 VA	100 VA

La potenza equivalente sarà:

$$\frac{109 + 100 + 100}{2} = 154 \text{ VA}$$

In base a questa potenza sceglieremo le dimensioni del formato del nucleo e poi il calcolo procede nel modo solito.

Usando un nucleo a mantello abbiamo:

$$A \times B \text{ (cm}^2\text{)} = 80 \sqrt{154/1,2 \times 50} = 128 \text{ cm}$$

Useremo nucleo  $A \times B = 120 \text{ cm}^2$ .

— Dimensioni principali del nucleo:

$$\begin{aligned} A &= 100 \text{ mm} \\ B &= 120 \text{ mm} \\ C &= 40 \text{ mm} \\ D &= 20 \text{ mm} \\ E &= 60 \text{ mm} \end{aligned}$$

— Rocchetto:

$$\begin{aligned} D' &= 16,5 \text{ mm} & D' \times E' &= 8,75 \text{ cm}^2 \\ E' &= 53 \text{ mm} \end{aligned}$$

— Filo rame smaltato normale. Spessore dell'avvolg. 15 mm ( $D' = 16,5 \text{ mm}$ ):

$$\begin{aligned} \text{I)} & A \ 1,82, \ d_1 = 1,0, \ d'_1 = 1,08, \\ & n_1 = 8,8, \ A/\text{cm}^2 = 98, \ 0,785 \text{ mm}^2 \\ \text{II)} & A \ 2,50, \ d_2 = 1,25, \ d'_2 = 1,34, \\ & n_1 = 7,1, \ A/\text{cm}^2 = 99, \ 1,226 \text{ mm}^2 \\ \text{III)} & A \ 0,83, \ d_3 = 0,70, \ d'_3 = 0,76, \\ & n_1 = 12,5, \ A/\text{cm}^2 = 97, \ 0,385 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{— V/spira} &= \frac{109}{98 \times 8,75} + \frac{100}{99 \times 8,75} + \\ &+ \frac{100}{97 \times 8,75} = 0,36 \text{ (spire/V} = 2,78) \end{aligned}$$

— Spessore del pacco:

$$\begin{aligned} H &= 37 \text{ mm}, \quad k_s = 1,09, \\ S_{fe} &= 13,5 \text{ cm}^2 \text{ (sez. utile col)} \end{aligned}$$

— Numero delle spire:

$$\begin{aligned} \text{I)} & 2,78 \times 60 = 167 \\ \text{II)} & 2,78 \times 40 = 111 \\ \text{III)} & 2,78 \times 120 = 334 \end{aligned}$$

— Numero delle spire per strato: ( $E' = 53 \text{ mm}$ ):

$$\begin{aligned} \text{I)} & 53 \times 8,8 = 47 \text{ spire per strato} \\ \text{II)} & 53 \times 7,1 = 38 \text{ spire per strato} \\ \text{III)} & 53 \times 12,5 = 67 \text{ spire per strato} \\ & 1,08 \times 48 = 52 \text{ mm (53)} \\ & 1,34 \times 39 = 52 \text{ mm (53)} \\ & 0,76 \times 68 = 52 \text{ mm (53)} \end{aligned}$$

— Numero degli strati:

$$\begin{aligned} \text{I)} & 167 : 47 = 3,55 = 4 \text{ strati} \\ \text{II)} & 111 : 38 = 2,92 = 3 \text{ strati} \\ \text{III)} & 334 : 67 = 4,97 = 5 \text{ strati} \end{aligned}$$

— Spessore degli avvolgimenti:

$$\begin{aligned} \text{I)} & 1,08 \times 4 = 4,32 \text{ mm} \\ & \text{interst. } 0,1 \times 3 = 0,30 \text{ mm} \\ & \quad \quad \quad 4,62 \text{ mm} \\ & \quad \quad \quad \text{uso } 4,70 \text{ mm} \\ \text{II)} & 1,34 \times 3 = 4,02 \\ & 0,1 \times 2 = 0,20 \\ & \quad \quad \quad 4,22 \text{ mm} \\ & \quad \quad \quad \text{uso } 4,30 \text{ mm} \\ \text{III)} & 0,76 \times 5 = 3,80 \\ & 0,1 \times 4 = 0,40 \\ & \quad \quad \quad 4,20 \text{ mm} \\ & \quad \quad \quad \text{uso } 4,30 \text{ mm} \end{aligned}$$

— Disposizione radiale degli avvolgimenti e spire medie:

$$\begin{aligned} 1,5 \text{ (= } 2 \text{ gi)} + 3 \text{ (= } 2 \text{ c)} + \\ + 4,7 \text{ (= avvolg. I)} &= 9,20 \text{ mm} \\ 9,20 + 4,7 \text{ (avvolg. I)} + 1 \text{ (= } 2 \text{ i')} + \\ + 4,3 \text{ (= avvolg. II)} &= 19,20 \text{ mm} \\ 19,20 + 4,3 \text{ (avvolg. II)} + 1 \text{ (= } 2 \text{ i')} + \\ + 4,3 \text{ (= avvolg. III)} &= 28,80 \text{ mm} \end{aligned}$$

Perimetro nucleo:

$$C + H = 40 + 37 = 77 \times 2 = 154 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \text{spira media lI} &= 154 + 4 \times 9,2 = 191 \text{ mm} \\ \text{spira media lII} &= 154 + 4 \times 19,2 = 231 \text{ mm} \\ \text{spira media lIII} &= 154 + 4 \times 28,8 = 269 \text{ mm} \end{aligned}$$

Peso del rame:

$$\begin{aligned} \text{I)} & 8,9 \times 0,785 \times 167 \times 191 \times 10^{-6} = 0,223 \text{ kg} \\ \text{II)} & 8,9 \times 1,226 \times 111 \times 231 \times 10^{-6} = 0,280 \text{ kg} \\ \text{III)} & 8,9 \times 0,385 \times 334 \times 269 \times 10^{-6} = 0,308 \text{ kg} \\ & \text{peso totale rame} = 0,811 \text{ kg} \end{aligned}$$

Peso del lamierino magnetico (lamierino spess. 0,35: isolato carta):

$$7,7 \times 96 \times \frac{3,7}{1,09} \times 10^{-3} = 2,51 \text{ kg}$$

Perdite a vuoto: (lam. tipo 1,3 W/kg a 50 Hz per  $B = 1 \text{ Wb/m}^2$ ):

$$1,2 \times 1,96 \times 2,51 = 5,9 \text{ W}$$

Caratteristiche elettriche dipendenti dal rame:

1°) Funzionamento; rapporto 160/220 V, 400 VA (109 VA<sub>i</sub>).

Perdite del rame:

$$\begin{aligned} \text{I)} & A/\text{mm}^2 = 1,82/0,785 = 2,32 \\ & 2,32^2 \times 2,37 \times 0,223 = 2,85 \text{ watt} \\ \text{II)} & A/\text{mm}^2 = 0,68/1,226 = 0,555 \\ & 0,555^2 \times 2,37 \times 0,28 = 0,21 \text{ watt} \\ \text{III)} & A/\text{mm}^2 = 0,68/0,385 = 1,77 \\ & 1,77^2 \times 2,37 \times 0,308 = 2,3 \text{ watt} \end{aligned}$$

Rendimento (riferito alla potenza passante):

$$\eta = \frac{400 \times 100}{400 + 5,9 + 5,36} = 97 \%$$

Caduta di tensione al secondario:

Il metodo più semplice e rapido consiste nel determinare la caduta percentuale riferita alla potenza passante, cioè:

$$\frac{\text{perdite nel rame} \times 100}{\text{VA passanti}} = v\%$$

Nel nostro esempio:

$$100 \frac{3,06 + 2,3}{400} = 100 \frac{5,36}{400} = 1,35 \% \text{ (caduta percent. del second.)}$$

In altra maniera, essendo l'autotrasformatore in questo I funzionamento elevatore, si ha egualmente;

$$\frac{W \text{ nel serie}}{A \text{ serie}} + \frac{W \text{ nel comune}}{A \text{ comune}} \times \frac{\text{spire serie}}{\text{spire comune}} = \text{caduta in volt}$$

$$\frac{3,06}{1,82} + \frac{2,3}{0,68} \frac{167}{445} = 1,68 + 1,27 = 2,95 \text{ V}$$

ossia:

$$\frac{2,95 \times 100}{220} = 1,35 \%$$

2°) Funzionamento; rapporto 160/120 (abbassatore): 400 VA (100 VAi)

Perdite nel rame:

$$\text{II) (serie) } A/\text{mm}^2 = 2,5/1,226 = 2,04$$

$$2,04^2 \times 2,37 \times 0,28 = 2,77 \text{ W}$$

$$\text{III) (comune) } A/\text{mm}^2 = 0,83/0,385 = 2,15$$

$$2,15^2 \times 2,37 \times 0,308 = 3,37 \text{ W}$$

Rendimento (riferito alla potenza passante di 400 VA):

$$\eta = \frac{400 \times 100}{400 + 6,14 + 5,9} = 97 \%$$

Caduta di tensione al secondario:

$$\frac{\text{perdite nel rame} \times 100}{\text{VA passanti}} = v\% \text{ (caduta percentuale di tensione)}$$

$$\frac{6,14 \times 100}{400} = 1,53 \% \text{ (caduta in \%)}$$

$$1,53 \times 120/100 = 1,84 \text{ V (caduta in volt al secondario).}$$

In altra maniera, essendo l'autotrasformatore abbassatore, abbiamo:

$$\frac{W \text{ serie}}{A \text{ serie}} \times \frac{\text{spire comune}}{\text{spire totali}} + \frac{W \text{ comune}}{A \text{ comune}} \times \frac{\text{spire serie}}{\text{spire totali}} = \text{caduta in V}$$

$$\frac{2,77}{2,5} \times \frac{334}{445} + \frac{3,37}{0,83} \times \frac{111}{445} = 0,84 + 1,00 = 1,84 \text{ V}$$

Determinate le cadute di tensione al secondario si ritoccano le spire per riportare al valore calcolato le tensioni a vuoto al secondario.

TAVOLE

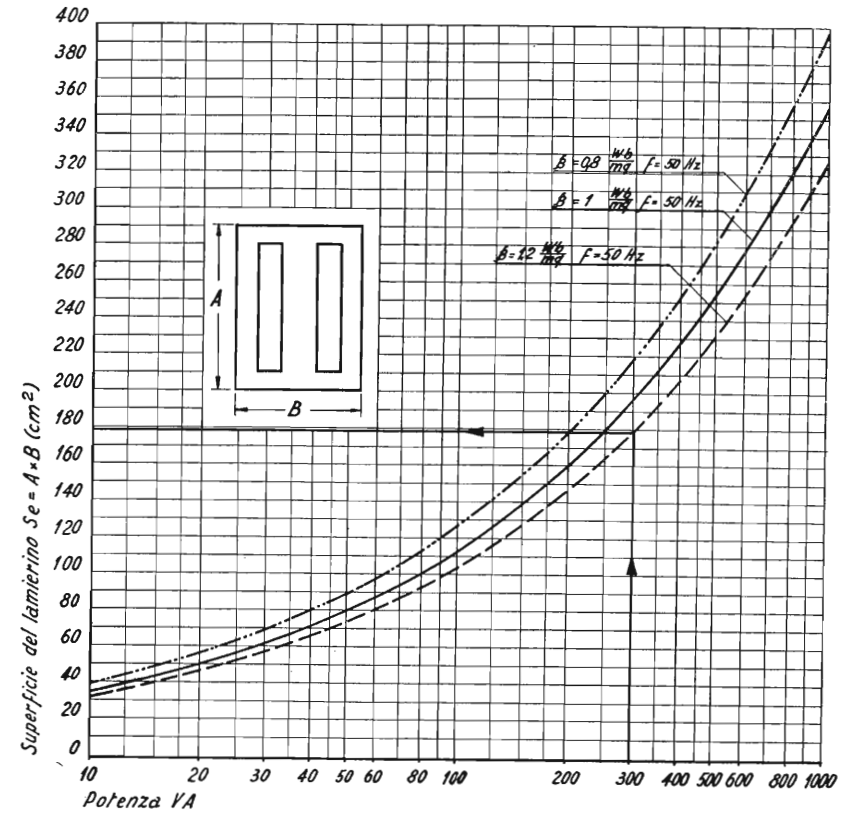
Calcolo piccoli  
trasformatori

DETERMINAZIONE APPROSSIMATA  
DEL FORMATO DEL LAMIERINO  
IN BASE ALLA POTENZA IN VA

Tavola

1

—  
Elettrificazione



Esempio: Per un trasformatore monofase da 300 VA la superficie del lamierino ( $A \times B$ ) sarà di circa  $180 \text{ cm}^2$  (adottando una induzione di  $1,2 \text{ Wb/m}^2$ )



Calcolo piccoli trasformatori	RELAZIONI PER IL DIMENSIONAMENTO DEI NUCLEI E DEI RELATIVI ROCCHETTI	Tavola <b>2 a</b>
—		
Elettrificazione		

**NUCLEO A MANTELLO**

$A \times B = S_l \text{ (cm}^2\text{)}$

$S_l = 80 \sqrt{\frac{V \Delta}{f \beta}}$

Coefficiente di stipamento  $K_s$

Tipo isolamento	$\Delta = 0,5$	$\Delta = 0,35$
Carta .....	1,08	1,09
Smalto .....	1,11	1,06

Spessore del pacco  $H$

$H = \frac{S_{fe}}{C} K_s \text{ (cm)}$

Numero dei lamierini

$N^\circ = 10 \frac{S_{fe}}{C \times \Delta}$

Peso del lamierino magnetico

$kg_{fe} = 7,7 \times S_u \times \frac{H}{K_s} \times 10^{-3} \text{ (kg)}$

( $H$  in cm ed  $S_u$  in  $cm^2$ )

$i'$  = spessore interstrato carta tra avvolg. interno ed esterno

$2g_i$  = giuoco interno del rocchetto

$2g_e$  = giuoco esterno dell'ala

$Z_e$  = spessore avvolgimento esterno

$Z_i$  = spessore avvolgimento interno

$a$  = spessore dell'ala

$c$  = spessore del rocchetto

Spira media avvolg. esterno  $l_e = 2(C + H) + 4w$      $w = v + Z_i + i' + Z_e$

Spira media avvolg. interno  $l_i = 2(C + H) + 4v$      $v = 2(g_i + c) + Z_i$

Calcolo piccoli trasformatori	DIMENSIONI DI ALCUNI FORMATI DI LAMIERINI E RELATIVI ROCCHETTI	Tavola <b>2 b</b>
—		
Elettrificazione		

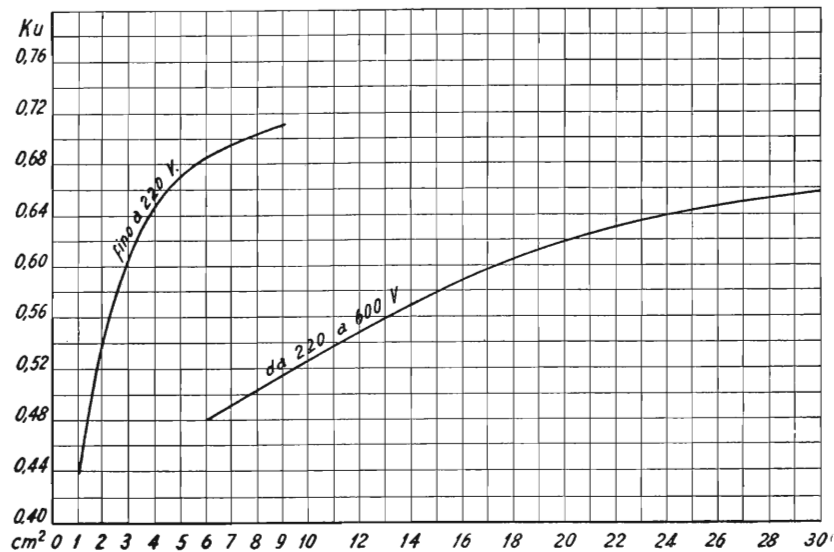
**LAMIERE A MANTELLO**

$A \times B$	$A \times B$	$D \times E$	$D \times E$	$C$	$S_u = \frac{A \times B}{2(D \times E)}$
mm	cm <sup>2</sup>	mm	cm <sup>2</sup>	mm	cm <sup>2</sup>
31,75 × 38,1	12,1	6,35 × 19,05	1,21	12,7	9,68
37 × 44	16,3	7,5 × 22	1,65	14	13,05
40 × 48	19,2	8 × 24	1,92	16	15,35
47,5 × 57	27,1	9,5 × 28,5	2,71	19	21,70
55,46 × 66,56	37,0	11,09 × 33,28	3,7	22,2	29,62
63,5 × 76,2	48,5	12,7 × 38,1	4,84	25,4	38,82
70,95 × 85,3	60,5	14,2 × 42,55	6,05	28,5	58,29
79,07 × 94,95	75	15,8 × 47,47	7,5	31,75	60
90 × 106	97,1	18 × 54	9,71	36	77,60
100 × 120	120	20 × 60	12	40	96
125 × 150	187,5	25 × 75	18,75	50	150
150 × 180	270	30 × 90	27	60	216

**ROCCHETTO DELL'AVVOLGIMENTO**

$A \times B$	$a$	$c$	$g_i$	$g_e$	$D' \times E'$	$D' \times E'$
mm	mm	mm	mm	mm	mm	cm <sup>2</sup>
31,75 × 38,1	1,5	1	0,5	0,5	4 × 14	0,56
37 × 44	1,5	1	0,5	0,5	5 × 17	0,85
40 × 48	1,5	1	0,5	1,0	5,5 × 19	1,045
47,5 × 57	1,5	1	0,5	1,0	7 × 23	1,61
55,46 × 66,56	1,5	1	0,5	1,0	8,5 × 27,5	2,34
63,5 × 76,2	1,5	1	0,5	1,5	9,7 × 32,6	3,2
70,95 × 85,3	1,5	1	0,5	1,5	11 × 37	4,07
79,07 × 94,95	1,5	1	0,5	1,5	12,5 × 42	5,25
90 × 108	2	1,5	0,75	1,25	14,5 × 48	7
100 × 120	2	1,5	0,75	1,25	16,5 × 53	8,75
125 × 150	2,5	2,0	0,75	1,25	21 × 67	14,1
150 × 180	2,5	2,5	0,75	1,50	25 × 82	20,5

Il primo gruppo di lamierini è della ditta Terzagò Tranciatura di Milano.

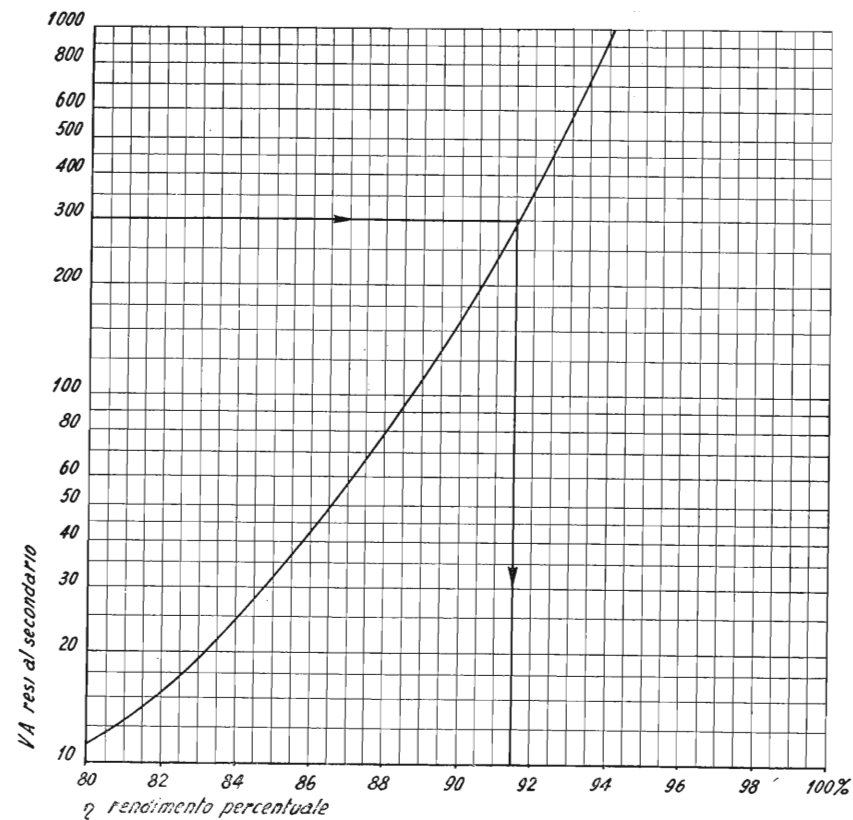


Le curve soprariportate danno l'andamento del rapporto  $K_u$  tra la sezione utile  $D' \times E'$  e la sezione lorda  $D \times E$  della finestra, ossia:

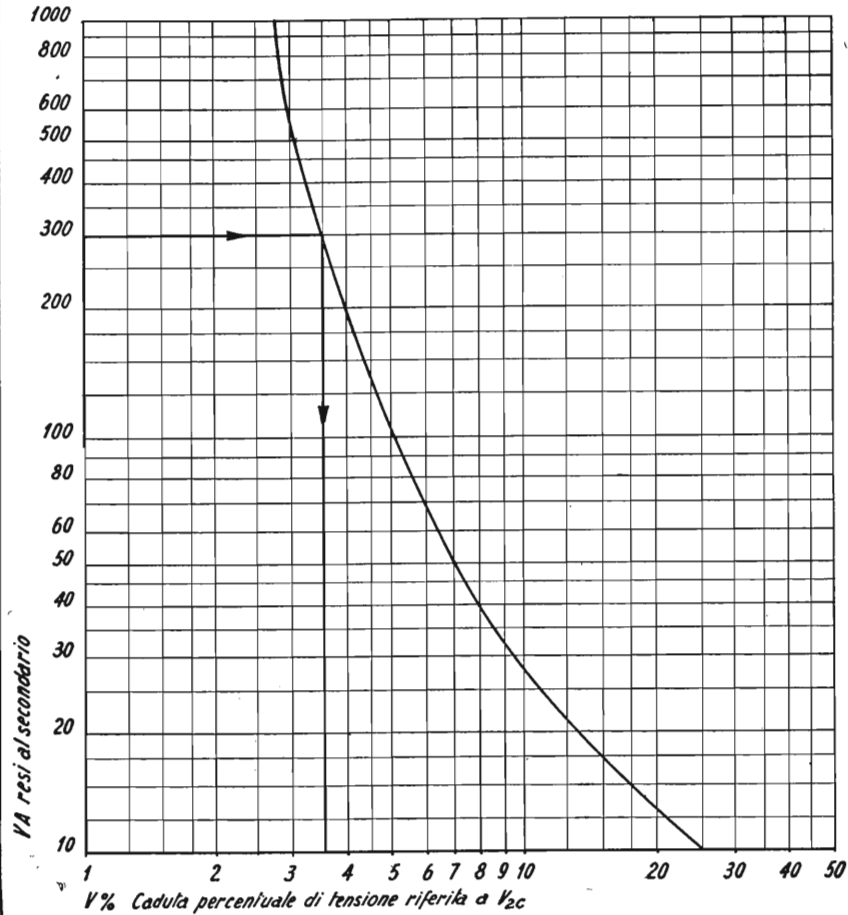
$$K_u = \frac{D' \times E'}{D \times E}$$

La curva superiore si riferisce a tensioni fino di 220 V e può essere prolungata; la curva inferiore vale invece per tensioni degli avvolgimenti da 220 a 600 V e viene impiegata per trasformatori di maggior potenza (dai 500 ai 1.000 VA). Queste curve hanno valore indicativo applicabile per determinare il valore della  $D' \times E'$  quando si conosce  $D \times E$  del formato del lamierino.

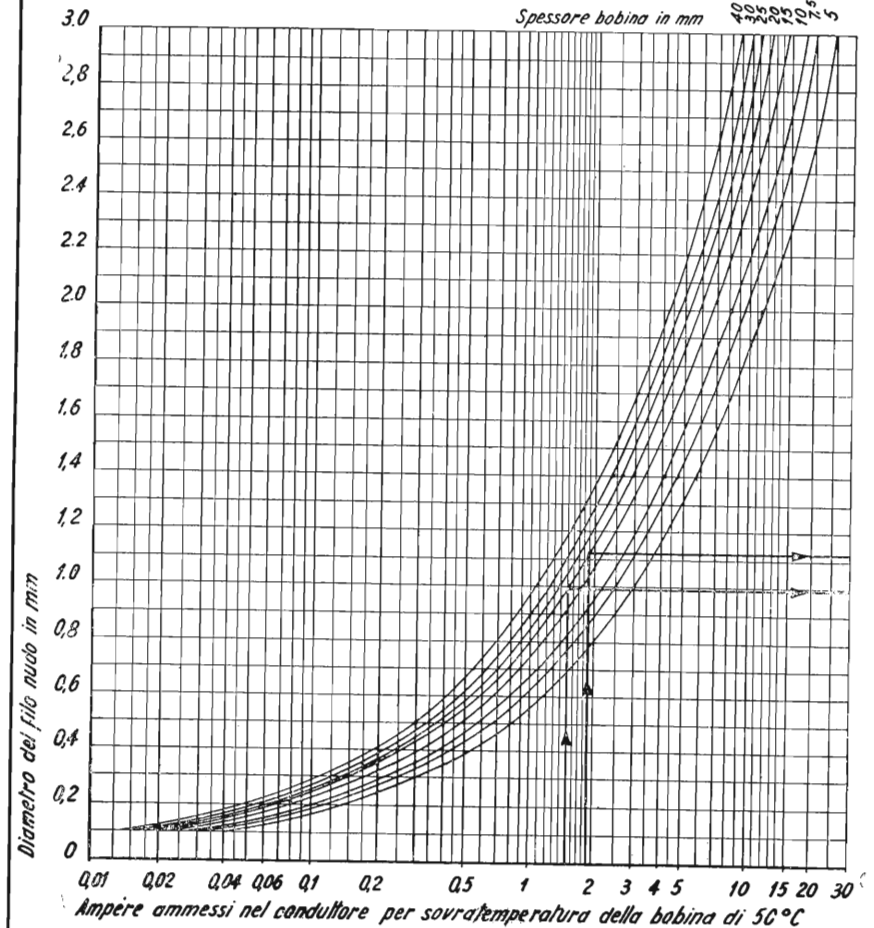
**Esempio:** Per un trasformatore da 600 VA, a 500 V (tensione massima), per il quale si è adottato un lamierino avente una finestra  $D \times E = 3 \times 8$  cm, l'area sarà di 24 cm². Lo spazio utile per gli avvolgimenti indicato  $D' \times E'$  sarà dato da  $0,64 \times 24 = 15,35$  cm², dove 0,64 è il coefficiente  $K_u$  letto sulla curva inferiore.



**Esempio:** Per un trasformatore monofase da 300 VA il rendimento percentuale è sull'ordine del 91,5%, ossia 0,915.



Esempio: Per un trasformatore monofase da 300 VA la caduta di tensione percentuale è sull'ordine di grandezza del 3,5%, ossia 3,5 volt ogni 100 volt del secondario.



Esempio: Ammesso lo spessore della bobina sia di 20 mm; che la corrente primaria  $I_1$  sia di 1,49 A; che la corrente secondaria  $I_2$  sia di 1,88 A, dovranno essere adottati i seguenti diametri di filo nudo: per il primario, in corrispondenza della corrente di 1,49 A, un filo del diametro 1 mm; per il secondario, in corrispondenza della corrente di 1,88 A, un filo del diametro di 1,1 mm.

Calcolo piccoli trasformatori										Tavola <b>6a</b>	
CARATTERISTICHE ED INGOMBRO DEL FILO SMALTATO NORMALE											
Elettrificazione											
$S_{cu}$ mm <sup>2</sup>	Ø nudo $d$ mm	Ø smal. $d'$ mm	$\frac{10}{d'K}$ $n_l$ Sp/cm	$K$	$d' + i$ mm	interst. $i$ mm	$n_s = \frac{n_l}{d' + i} \cdot 10$ $n_s$ Sp/cm <sup>2</sup>	$N_s$ Sp/cm <sup>2</sup> reali	Ø nudo $d$ mm		
0,00196	0,05	0,062	146	1,1	0,122	0,06	11 950	9 800	0,05		
0,0028	0,06	0,073	124	1,1	0,133	0,06	9 300	7 620	0,06		
0,00385	0,07	0,083	109	1,1	0,143	0,06	7 650	6 210	0,07		
0,00503	0,08	0,094	97	1,1	0,154	0,06	6 300	5 160	0,08		
0,0064	0,09	0,105	87	1,1	0,165	0,06	5 270	4 300	0,09		
0,00785	0,10	0,116	79	1,1	0,176	0,06	4 480	3 670	0,10		
0,0095	0,11	0,128	71	1,1	0,188	0,06	3 780	3 080	0,11		
0,0113	0,12	0,138	66	1,1	0,198	0,06	3 330	2 710	0,12		
0,0154	0,14	0,167	54,5	1,1	0,227	0,06	2 400	1 950	0,14		
0,0201	0,16	0,189	48	1,1	0,249	0,06	1 930	1 565	0,16		
0,0254	0,18	0,21	43	1,1	0,27	0,06	1 595	1 290	0,18		
0,0314	0,20	0,23	39,5	1,1	0,29	0,06	1 362	1 100	0,20		
0,038	0,22	0,25	36,4	1,1	0,31	0,06	1 175	946	0,22		
0,0491	0,25	0,28	32,5	1,1	0,34	0,06	956	767	0,25		
0,0616	0,28	0,32	28,4	1,1	0,38	0,06	747	597	0,28		
0,0707	0,30	0,34	28	1,05	0,44	0,1	635	505	0,30		
0,0804	0,32	0,36	26,4	1,05	0,46	0,1	573	455	0,32		
0,0962	0,35	0,39	24,4	1,05	0,49	0,1	497	394	0,35		
0,1257	0,40	0,45	21,2	1,05	0,55	0,1	385	303	0,40		
0,159	0,45	0,51	18,7	1,05	0,61	0,1	307	241	0,45		
0,196	0,50	0,56	17	1,05	0,66	0,1	257	200	0,50		
0,264	0,58	0,64	14,9	1,05	0,74	0,1	201	155	0,58		
0,283	0,60	0,66	14,4	1,05	0,76	0,1	190	147	0,60		
0,312	0,63	0,69	13,8	1,05	0,79	0,1	174	134	0,63		
0,385	0,7	0,76	12,5	1,05	0,86	0,1	145	111	0,70		
0,503	0,8	0,87	11	1,05	0,97	0,1	113	85,5	0,80		
0,636	0,9	0,97	9,8	1,05	1,07	0,1	91,5	69	0,90		
0,785	1,0	1,08	8,8	1,05	1,18	0,1	74,5	55	1,0		
0,95	1,1	1,19	8	1,05	1,29	0,1	62	45,6	1,1		
1,22	1,25	1,34	7,1	1,05	1,44	0,1	49,2	35,7	1,25		
1,539	1,4	1,49	6,4	1,05	1,59	0,1	40,2	28,9	1,4		
2,01	1,6	1,69	5,62	1,05	1,79	0,1	31,4	22,2	1,6		
2,54	1,8	1,90	5	1,05	2,00	0,1	25	17,4	1,8		
3,14	2,0	2,08	4,57	1,05	2,18	0,1	21	14,5	2,0		
3,8	2,2	2,29	4,15	1,05	2,39	0,1	17,4	11,9	2,2		
4,91	2,5	2,59	3,67	1,05	2,69	0,1	13,6	9,14	2,5		
6,16	2,8	2,89	3,3	1,05	2,99	0,1	11	7,2	2,8		
7,07	3	3,09	3,08	1,05	3,19	0,1	9,65	6,3	3,0		

(diametri isolati della Ditta Gronda Rabossi di Milano Bruzzano)

Calcolo piccoli trasformatori										Tavola <b>6b</b>	
CARATTERISTICHE ED INGOMBRO DEL FILO CON DOPPIA SPIRALE DI COTONE											
Elettrificazione											
$S_{cu}$ mm <sup>2</sup>	Ø nudo $d$ mm	Ø smal. $d'$ mm	$\frac{10}{d'K}$ $n_l$ Sp/cm	$K$	$d' + i$ mm	interst. $i$ mm	$n_s = \frac{n_l}{d' + i} \cdot 10$ $n_s$ Sp/cm <sup>2</sup>	$N_s$ Sp/cm <sup>2</sup> reali	Ø nudo $d$ mm		
0,0314	0,2	0,37	25,7	1,05	0,47	0,1	546	432	0,2		
0,038	0,22	0,39	24,3	1,05	0,49	0,1	496	392	0,22		
0,0491	0,25	0,44	21,6	1,05	0,54	0,1	400	314	0,25		
0,0616	0,28	0,47	20,2	1,05	0,57	0,1	354	278	0,28		
0,0707	0,30	0,49	19,4	1,05	0,59	0,1	329	258	0,30		
0,0804	0,32	0,51	18,6	1,05	0,61	0,1	305	239	0,32		
0,0962	0,35	0,54	17,6	1,05	0,64	0,1	275	215	0,35		
0,1257	0,40	0,59	16,1	1,05	0,69	0,1	233	181	0,40		
0,159	0,45	0,64	14,7	1,05	0,74	0,1	200	155	0,45		
0,196	0,50	0,69	13,7	1,05	0,79	0,1	174	134	0,50		
0,264	0,58	0,77	12,3	1,05	0,87	0,1	141	108	0,58		
0,283	0,60	0,79	12	1,05	0,89	0,1	135	103	0,60		
0,312	0,63	0,82	11,6	1,05	0,92	0,1	126	95,5	0,63		
0,385	0,70	0,89	10,7	1,05	0,99	0,1	108	81,5	0,70		
0,503	0,80	1,02	9,3	1,05	1,12	0,1	83	62,2	0,80		
0,636	0,90	1,12	8,5	1,05	1,22	0,1	69,6	51,5	0,90		
0,785	1,0	1,22	7,8	1,05	1,32	0,1	59	43,2	1,0		
0,95	1,1	1,32	7,2	1,05	1,42	0,1	50,6	36,5	1,1		
1,22	1,25	1,47	6,5	1,05	1,57	0,1	41,4	29,9	1,25		
1,539	1,40	1,64	5,8	1,05	1,74	0,1	33,3	23,7	1,4		
2,01	1,60	1,85	5,1	1,05	1,95	0,1	26,2	18,25	1,6		
2,54	1,80	2,06	4,6	1,05	2,16	0,1	21,3	14,7	1,8		
3,14	2,00	2,25	4,2	1,05	2,35	0,1	17,9	12,2	2,0		
3,8	2,2	2,54	3,9	1,05	2,55	0,1	15,3	10,3	2,2		
4,91	2,5	2,75	3,45	1,05	2,85	0,1	12,1	7,96	2,5		
6,16	2,8	3,07	3,1	1,05	3,18	0,1	9,75	6,3	2,8		
7,07	3,0	3,28	2,9	1,05	3,38	0,1	8,60	5,56	3,0		

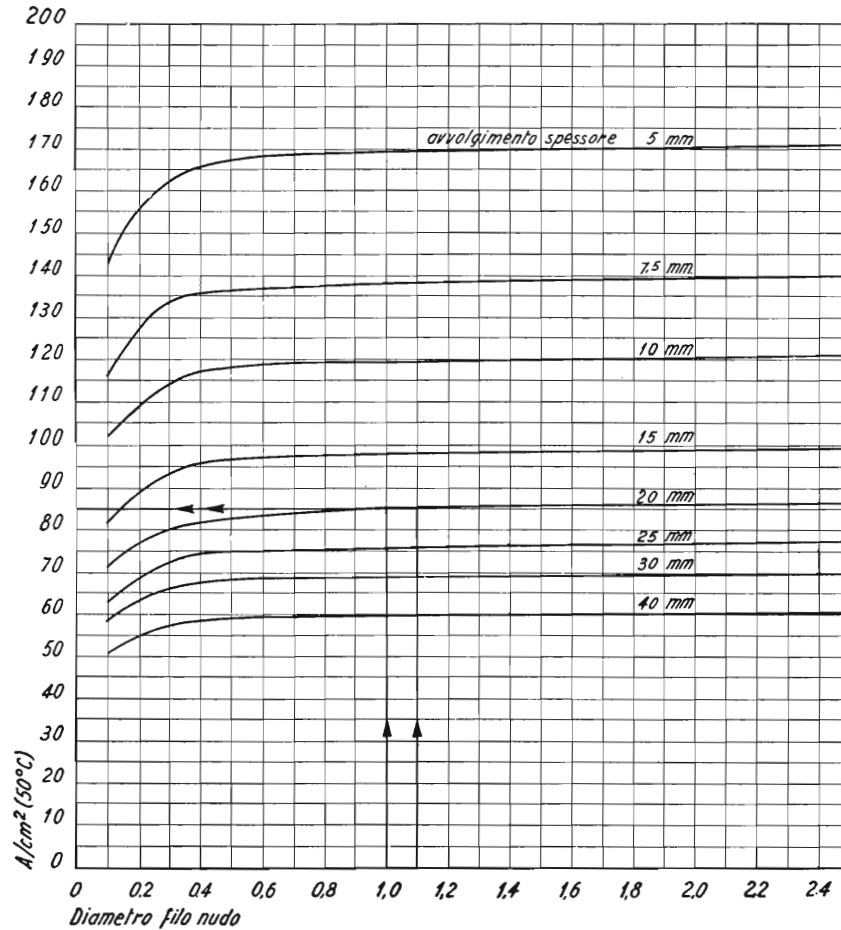
(diametri isolati della Ditta Gronda Rabossi di Milano Bruzzano)

Calcolo piccoli trasformatori

DETERMINAZIONE DEGLI AMPERE PER OGNI  $\text{cm}^2$  DI AREA DI FINESTRA DEL NUCLEO NOTO IL DIAMETRO DEL FILO NUDO  
Filo smaltato a  $50^\circ\text{C}$ .

Tavola  
**7a**

Elettrificazione



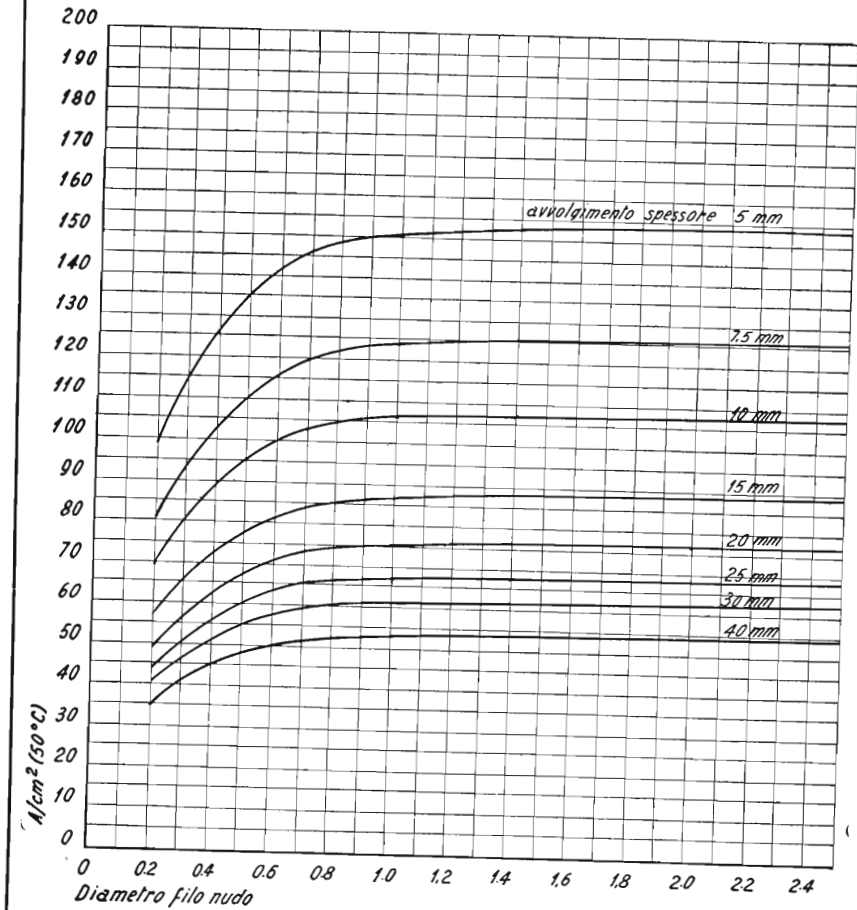
Esempio: Ammesso che lo spessore della bobina sia di 20 mm ed i diametri dei conduttori degli avvolgimenti primario e secondario siano rispettivamente 1 ed 1,1 mm, avremo 85 ampere per ogni  $\text{cm}^2$  di area della finestra del nucleo (essendo, nel tratto considerato la curva pressochè rettilinea).

Calcolo piccoli trasformatori

DETERMINAZIONE DEGLI AMPERE PER OGNI  $\text{cm}^2$  DI AREA DI FINESTRA DEL NUCLEO NOTO IL DIAMETRO DEL FILO NUDO  
Filo isolato cotone a  $50^\circ\text{C}$ .

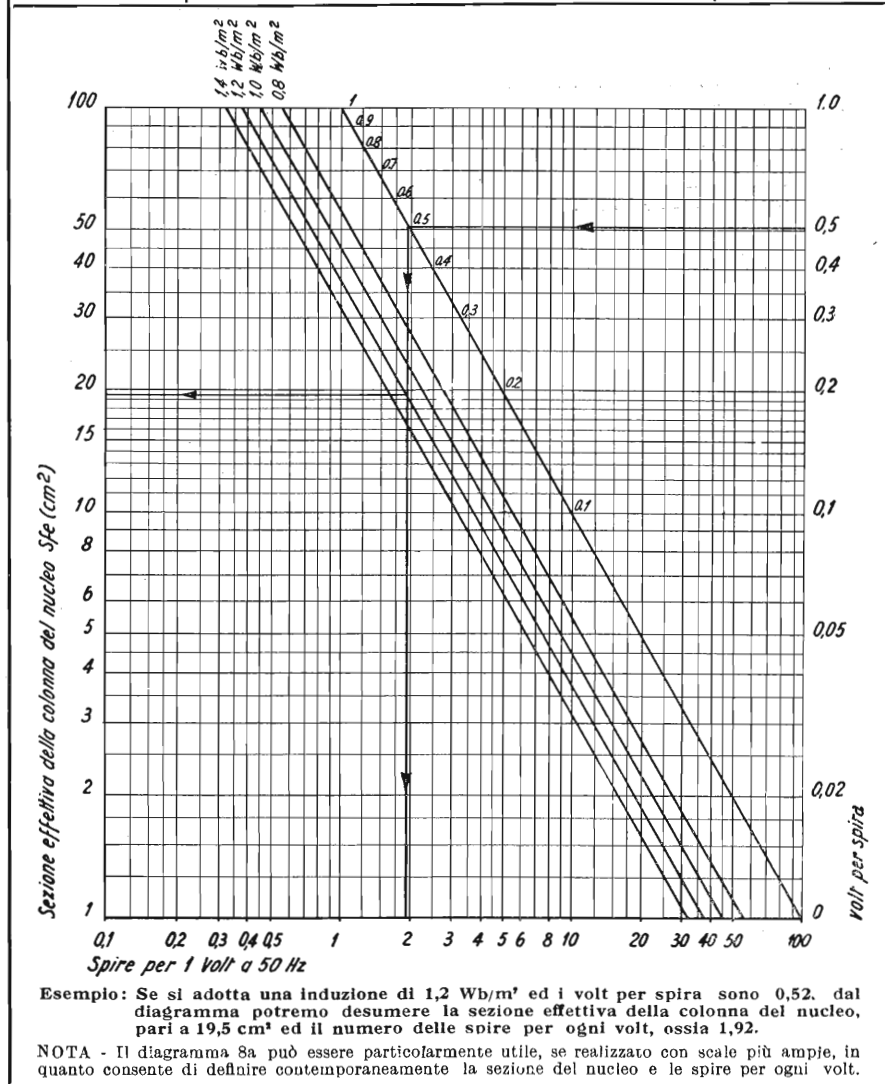
Tavola  
**7b**

Elettrificazione

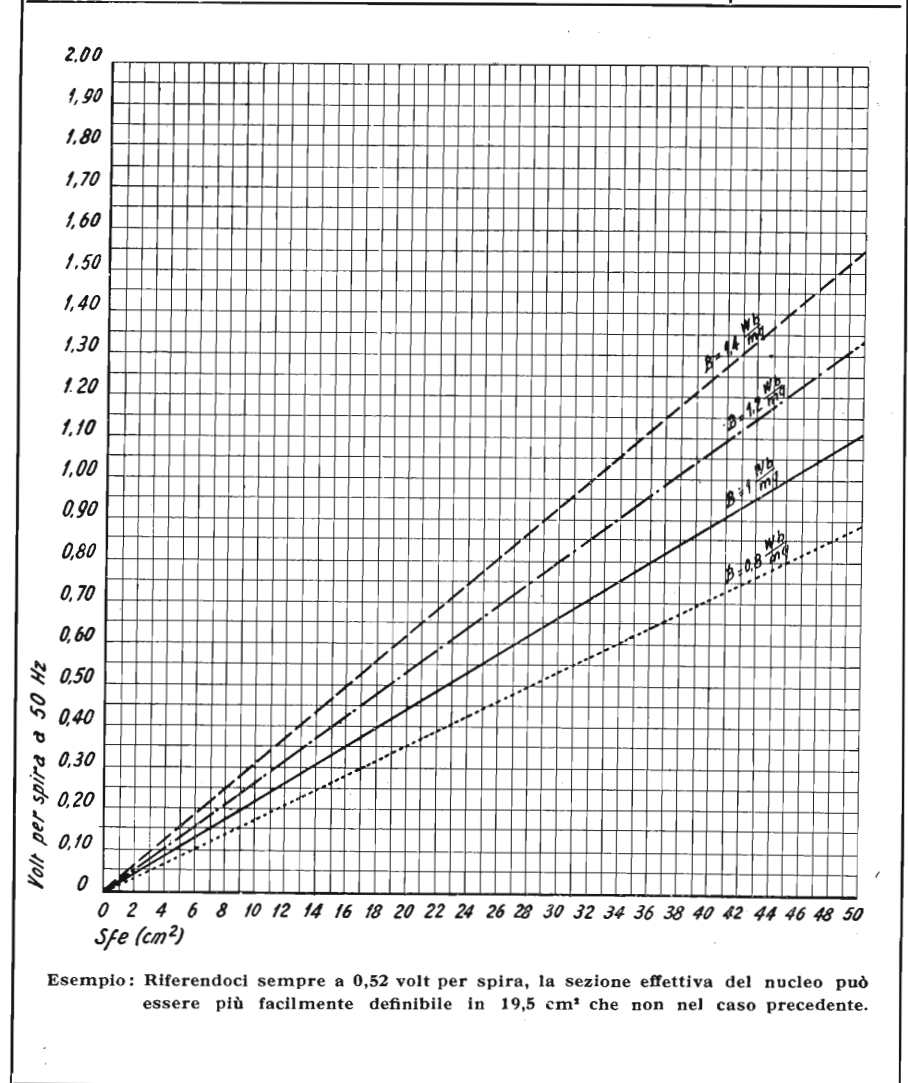


Esempio: Si procede come nel caso precedente.

Calcolo piccoli trasformatori	<b>DETERMINAZIONE DELLA SEZIONE EFFETTIVA DELLA COLONNA DEL NUCLEO</b> Quando siano noti i volt per spira (oppure le spire per volt).	Tavola
—		<b>8a</b>
Eletrificazione		



Calcolo piccoli trasformatori	<b>DETERMINAZIONE DELLA SEZIONE EFFETTIVA DEL NUCLEO QUANDO SONO NOTI I VOLT PER SPIRA</b> In effetti i valori di cui sopra sono già ricavabili dal diagramma 8a; qui sono riportati in un'altra scala per maggior chiarezza di lettura.	Tavola
—		<b>8b</b>
Eletrificazione		



Calcolo piccoli trasformatori	PROCEDIMENTO DI CALCOLO PER UN TRASFORMATORE MONOFASE DA 300 VA	Tavola <b>9</b>
—  Elettrificazione		
<p>Per il calcolo del trasformatore occorre che siano dati:</p> <p>1) la potenza resa al secondario in VA (o watt che assumiamo a <math>\cos \varphi = 1</math>).</p> <p>2) la tensione di alimentazione <math>V_1</math>.</p> <p>3) la frequenza della tensione di alimentazione in Hz.</p> <p>4) la tensione a carico del secondario (cioè volt letti ai morsetti dell'apparecchio utilizzatore) <math>V_{2c}</math>.</p> <p>Invece della potenza resa al secondario può essere data la corrente <math>I_2</math> assorbita dall'apparecchio utilizzatore.</p> <p>Allora è <math>V_{2c} \times I_2 = VA</math>.</p>	<p>Sia richiesto un trasformatore monofase in cui:</p> <p>1) Potenza = 300 VA</p> <p>2) <math>V_1 = 220</math> volt</p> <p>3) <math>f = 50</math> Hz</p> <p>4) <math>V_{2c} = 160</math> volt</p>	
<p>Prefissata la qualità del lamierino magnetico da usare ne conosciamo perciò le caratteristiche:</p> <p>a) perdita specifica teorica, <math>W/kg</math> (v. tab. IV-V pag. 12-13)</p> <p>b) spessore <math>\Delta</math> (0,5 oppure 0,35 mm)</p> <p>c) tipo di isolamento, smalto o carta e perciò si fissa il fattore di stipamento <math>K_s</math></p> <p>Inoltre stabiliamo il tipo di isolamento del filo e la sovratemperatura ammessa negli avvolgimenti.</p>	<p>Usiamo lamierino legato al silicio:</p> <p>a) tipo 1,3 W/kg a 50 Hz — 1 Wb/m<sup>2</sup> avente <math>w_s = 1,96</math> W/kg a 1,2 Wb/m<sup>2</sup> — 50 Hz</p> <p>b) spessore 0,35 mm</p> <p>c) fattore di stipamento per isolamento in carta <math>K_s = 1,09</math>.</p> <p>Stabiliamo per gli avvolgimenti:</p> <p>a) filo rame isolato smalto normale;</p> <p>b) sovratemperatura 50° C.</p>	
TAVOLA 1.	<p>Dalla tavola 1, in base alla potenza VA e al valore dell'induzione prescelta si determina il formato del lamierino <math>A \times B</math> in cm<sup>2</sup></p> <p style="text-align: center;">Formato del lamierino:</p> $(A \times B) = 80 \sqrt{\frac{300}{1,2 \times 50}} = 179 \text{ cm}^2$	
$(A \times B) = 80 \sqrt{\frac{VA}{B \times f}} \text{ (cm}^2\text{)}$		

TAVOLE 2a - 2b - 2c	
<p>Tra i formati disponibili si sceglie quello avente il valore <math>A \times B</math> più prossimo al valore sopra determinato.</p> <p>La tabella dà anche le altre dimensioni del nucleo e rocchetto, in particolare i valori <math>D \times E</math> e <math>(D' \times E')</math> (cm<sup>2</sup>).</p>	<p>Scelgo <math>A \times B = 187,5</math> (cm<sup>2</sup>) a cui corrisponde:</p> <p><math>D' = 21</math> mm</p> <p><math>E' = 67</math> mm    <math>D' \times E' = 14,1</math> cm<sup>2</sup></p> <p><math>C = 50</math> mm</p>
TAVOLA 3.	
<p>La tavola 3 ci dà un valore indicativo del rendimento <math>\eta</math> in funzione della potenza VA. Esso ci serve per calcolare la corrente del primario:</p> $I_1 = \frac{VA}{\eta V_1} \text{ (ampere)}$	<p>Troviamo <math>\eta = 91,5\% = 0,915</math>. Del primario conosciamo:</p> <p><math>V_1 = 220</math> volt</p> <p>Rimane da determinare:</p> $I_1 = \frac{300}{0,915 \times 220} = 1,49 \text{ A}$ $I_2 = \frac{300}{160} = 1,88 \text{ A}$
TAVOLA 4.	
<p>Con riferimento alla potenza, la tavola 4 ci fornisce un valore di orientamento per la caduta di tensione al secondario. Dalla caduta <math>v\%</math> risaliamo al valore della tensione secondaria a vuoto <math>V_{2v}</math> che è necessario conoscere per fissare le spire del secondario</p> $V_{2v} = (1 + v\%) V_{2c}$	<p>Per 300 VA troviamo</p> <p><math>v\% = 3,5\% = 0,035</math></p> <p><math>1 + 0,035 = 1,035</math></p> $V_{2v} = 1,035 \times 160 = 166 \text{ V}$
TAVOLA 5.	
<p>Questa tavola vale per sovratemperature dell'avvolgimento di 50° C.</p> <p>Essendo ormai determinate <math>I_1</math> e <math>I_2</math>, in base allo spessore della bobina, assunto eguale alla dimensione <math>D'</math> (mm) del rocchetto, si determina il diametro del filo nudo.</p>	<p>Usando filo isolato con smalto normale e prefissata sovratemp. <math>\theta = 50^\circ\text{C}</math> dobbiamo riferirci alla Tav. 5 da cui (essendo <math>D' = 21</math> mm):</p> <p><math>I_1 = 1,49 \rightarrow d_1 = 1</math> (spess. 20 mm)</p> <p><math>I_2 = 1,88 \rightarrow d_2 = 1,1</math> (spess. 20 mm)</p>
TAVOLA 6a (6b)	
<p>Tavola 6a - per filo smaltato normale.</p> <p>Tavola 6b - per filo con doppia spirale di cotone.</p> <p>Da queste tavole sono rilevabili la sezione del filo in mm<sup>2</sup> e il diametro <math>d'</math> e le spire per cm di lunghezza <math>n_l</math>.</p>	<p>I°) <math>d_1 = 1</math>                    <math>d'_1 = 1,08</math></p> <p>         <math>n_l = 8,8</math></p> <p>II°) <math>d_2 = 1,1</math>                <math>d'_2 = 1,19</math></p> <p>         <math>n_l = 8</math></p>

TAVOLA 7a (7b)

Tavola 7a - filo smalto normale  
 $\theta = 50^\circ \text{C}$

Tavola 7b - filo doppio cotone  
 $\theta = 50^\circ \text{C}$

In base al diametro nudo del filo e allo spessore della bobina ( $D'$ ) si determinano gli ampere per  $\text{cm}^2$  sia del primario che del secondario. La media tra i due valori sarà usata nella formula della determinazione dei volt/spira:

$$V/sp = \frac{2 \times VA \times (1 + v\%)}{A/\text{cm}^2 \times (D' \times E')}$$

$$\text{I}^\circ) d_1 = 1 \quad A/\text{cm}^2 = 85$$

(per spess. 20 mm)

$$\text{II}^\circ) d_2 = 1,1 \quad A/\text{cm}^2 = 85$$

(per spess. 20 mm)

$$V/sp = \frac{2 \times 300 \times 1,035}{85 \times 14,1} = 0,52$$

$$\text{spire per 1 volt} = \frac{1}{0,52} = 1,92$$

TAVOLA 8a (8b)

Dai  $V/sp$  (oppure spire/ $V$ ) e in base al valore dell'induzione prescelta si determina la sezione effettiva della colonna del nucleo

La formula è:

$$S_{fe} = \frac{V/sp \times 10^4}{4,44 \times f \times B} \quad (\text{cm}^2)$$

Dalla tabella 8a (8b) ovvero dalla formula si ha:

$$S_{fe} = \frac{0,52 \times 10^4}{4,44 \times 50 \times 1,2} = 19,5 \text{ cm}^2$$

#### NUCLEO - DIMENSIONI - PESO E PERDITE

Nota la sezione effettiva  $S_{fe}$  in  $\text{cm}^2$ , il fattore di stipamento  $K_s$  e la larghezza  $C$  della colonna del nucleo, si determina lo spessore  $H$  del pacco.

$$H = \frac{S_{fe}}{C} K_s \quad (\text{cm})$$

Il numero dei lamierini sarà:

$$\text{N}^\circ \text{ lamierini} = \frac{H \text{ (mm)}}{\Delta \times K_s}$$

Essendo:

$$S_{fe} = 19,5 \text{ cm}^2$$

$$K_s = 1,09$$

$$C = 5,0 \text{ cm}$$

$$H = \frac{19,5}{5} \cdot 1,09 = 4,25 \text{ cm}$$

$$\text{N}^\circ \text{ lamierini} = \frac{42,5}{0,53 \times 1,09} = 111$$

Il nucleo è ora determinato in tutte le sue dimensioni. Possiamo calcolarne il peso.

Posto:  $(A \times B) - 2(D \times E) = S_u$  ( $\text{cm}^2$ ) e assunto il peso specifico del lamierino eguale a  $7,7 \text{ kg/dm}^3$ , abbiamo con  $H$  in  $\text{cm}$ :

$$k_{gfe} = 7,7 \times S_u \cdot \frac{H}{K_s} \cdot 10^{-3} \quad (\text{kg})$$

Le perdite a vuoto sono:

$$W_{je} = 1,2 \times w_s \times K_{gfe} \quad (\text{watt})$$

Dalla Tav. 2 possiamo completare le dimensioni del nucleo:

$$A = 125 \quad B = 150 \quad C = 50$$

$$D = 25 \quad E = 75$$

$$F = 25 \quad H = 42,5$$

$$S_u = 187,5 - 2 \times 18,75 = 150 \text{ cm}^2$$

$$k_{gfe} = 7,7 \times 150 \cdot \frac{4,25}{1,09} \times 10^{-3} = 4,5 \text{ kg}$$

Essendo  $w_s = 1,96 \text{ W/kg}$  a  $1,2 \text{ Wb/m}^2 - 50 \text{ Hz}$  abbiamo:

$$W_{je} = 1,2 \times 1,96 \times 4,5 = 10,6 \text{ watt}$$

#### AVVOLGIMENTI - PESI E PERDITE

Determiniamo ora le spire primarie  $N_1$  e secondarie  $N_2$  conoscendo i volt a vuoto rispettivi e le spire per 1 volt.

$$N_1 = V_1 \times sp/V$$

$$N_2 = V_{2v} \times sp/V$$

Le spire per strato sono date per il I° e II°, essendo  $E'$  in  $\text{cm}$ , da:

$$E' \times n_l = \text{N}^\circ \text{ spire per strato}$$

Quindi ricaviamo il numero di strati:

$$\frac{\text{spire totali}}{\text{spire per strato}} = \text{N}^\circ \text{ di strati}$$

Possiamo ora definire l'ingombro degli avvolgimenti. Assialmente per  $d' \geq 0,3 \text{ mm}$ :

$$d' \times (\text{spire per strato} + 1) \geq E'$$

Radialmente:

$$d' \times \text{N}^\circ \text{ str.} + i \quad (\text{N}^\circ \text{ str.} - 1) = Z \quad (\text{spessore avvol.})$$

$$N_1 = 220 \times 1,92 = 422 \text{ spire primarie}$$

$$N_2 = 166 \times 1,92 = 318 \text{ spire secondarie}$$

$$\text{Spire per strato, essendo } E' = 6,7 \text{ cm:}$$

$$\text{I)} \quad 6,7 \times 8,8 = 59$$

$$\text{II)} \quad 6,7 \times 8 = 54$$

Numero di strati:

$$\text{I}^\circ) \quad \frac{422}{59} = 7,15 \quad (8 \text{ strati})$$

$$\text{II}^\circ) \quad \frac{318}{54} = 5,9 \quad (6 \text{ strati})$$

Ingombro assiale:

$$\text{I}^\circ) \quad 1,08 \times 60 = 65 \quad (E' = 67)$$

$$\text{II}^\circ) \quad 1,19 \times 55 = 65,5$$

Ingombro radiale:

$$\text{Spessore: I}^\circ) \quad 1,08 \times 8 = 8,64$$

$$\text{Interst.:} \quad 0,1 \times 7 = 0,70$$

$$Z_e = 9,34$$

$$\text{Spessore: II}^\circ) \quad 1,19 \times 6 = 7,14$$

$$\text{Interst.:} \quad 0,1 \times 5 = 0,5$$

$$Z_i = 7,64$$

Per determinare le lunghezze delle spire medie degli avvolgimenti occorre prima calcolare:

$$\text{II}^\circ) \text{ avv. interno: } 2c + 2g_i + Z_i = v \quad (\text{mm})$$

$$\text{I}^\circ) \text{ avv. esterno: } 2c + 2g_i + 2Z_i' + 2i' + Z_e = w \quad (\text{mm})$$

Per il nostro rocchetto è:  
 spessore  $c = 2 \text{ mm}$   
 gioco radiale  $g_i = 0,75 \text{ mm}$   
 $i'$  = spessore isolamento:  $0,5 \text{ mm}$  carta

$$\text{II}^\circ) \quad 2 \times 2 + 2 \times 0,75 + 7,64 = 13,14 = v$$

$$\text{I}^\circ) \quad 2 \times 2 + 2 \times 0,75 + 2 \times 7,64 + 2 \times 0,5 + 9,34 = 31,12 = w$$



Spire medie:  
 II°) avv. interno  $l_i = 2 (C + H) + 4v$  (mm)  
 I°) avv. esterno  $l_e = 2 (C + H) + 4w$  (mm)  
 dove  
 $c$  = spessore del rocchetto (v. Tav. 2)  
 $g_i$  = gioco radiale interno del rocchetto verso il nucleo  
 $Z_i$  = spessore dell'avvolg. secondario (interno)  
 $Z_e$  = spessore dell'avvolg. primario (esterno)  
 $i'$  = spessore dell'isolamento tra avvolgimento interno ed avvolgimento esterno  
 $l_i$  = spira media avvolg. secondario (interno)  
 (esterno).  
 $l_e$  = spira media avvolg. primario (esterno)  
 Peso del rame:  
 I°)  $8,9 \times l_e \times N_1 \times s_{c1} \times 10^{-6} =$   
 $= \text{kg}_{cu1}$  (kg)  
 II°)  $8,9 \times l_i \times N_2 \times s_{c2} \times 10^{-6} =$   
 $= \text{kg}_{cu2}$  (kg)  
 (dove  $l_e, l_i$  espressi in mm;  $s_{c1}, s_{c2}$  in  $\text{mm}^2$ )  
 Perdite nel rame, riferite a  $75^\circ\text{C}$ :  
 I°)  $W_1 = 2,37 \times \delta_1^2 \times \text{kg}_{cu1}$   
 II°)  $W_2 = 2,37 \times \delta_2^2 \times \text{kg}_{cu2}$   
 ( $\delta = A/\text{mm}^2$ ).

Spire medie, con  $C = 50$  e  $H = 42,5$ :  
 II°)  $l_i = 2 (50 + 42,5) + 4 \times$   
 $\times 13,14 = 237$  mm  
 I°)  $l_e = 2 (50 + 42,5) + 4 \times$   
 $\times 31,12 = 310$  mm  
 Peso del rame in kg:  
 I°)  $8,9 \times 310 \times 422 \times 0,785 \times$   
 $\times 10^{-6} = \dots\dots\dots 0,915$  kg  
 II°)  $8,9 \times 237 \times 318 \times$   
 $\times 0,95 \times 10^{-6} = \underline{0,640}$  kg  
 1,555 kg  
 Perdite nel rame, riferite a  $75^\circ\text{C}$ :  
 I°)  $W_1 = 2,37 \times 1,9^2 \times$   
 $\times 0,915 = \dots\dots 7,85$  watt  
 II°)  $W_2 = 2,37 \times$   
 $\times 1,98^2 \times 0,64 = \underline{5,95}$  watt  
 13,80 watt

VERIFICHE

Possiamo ora calcolare il rendimento e la caduta di tensione secondaria e confrontare con i valori presunti in partenza; quindi verificare se è opportuno apportare modifiche al calcolo.

$$\text{Rendimento } \eta = \frac{VA}{VA + W_{cu} + W_{fe}}$$

$$\text{Caduta II}^\circ = \frac{W_1 N_2}{I_1 N_1} + \frac{W_2}{I_2} \text{ (volt)}$$

Perdite totali, rame e ferro:  
 $10,6 + 13,8 = 24,4$

$$\text{Rendimento } \frac{300 \times 100}{300 + 24,4} = 92,4\%$$

Caduta al secondario riferita alla tensione a carico:

$$V = \frac{7,85 \times 318}{1,49 \times 422} + \frac{5,95}{1,88} = 7,12$$

$$v\% = \frac{7,12 \times 100}{160} = 4,45\%$$

ESEMPI DI CALCOLO DI TRASFORMATORI MONOFASI

Dopo l'esempio di calcolo relativo ad un trasformatore da 300 VA, svolto precedentemente ed in modo dettagliato, riportiamo ora alcuni esempi impostati secondo uno schema semplificato, schema che trova riscontro nei moduli impiegati dalle ditte costruttrici.

La sequenza delle operazioni è la stessa di quella dell'esempio del trasformatore da 300 VA.

Nella tavola di sinistra, in alto, sono indicati gli elementi noti di partenza per il calcolo, ossia la potenza resa al secondario, la tensione e la frequenza di alimentazione, e, infine, la tensione secondaria.

Sotto la voce «Elementi prefissati» sono indicati la qualità e le caratteristiche del lamierino prescelto, il tipo di isolamento del filo e la sovratemperatura prevista. Il calcolo si svolge poi secondo lo schema precedentemente indicato,

La parte a destra in alto della tavola è dedicata alla determinazione delle dimensioni fisiche del nucleo, del rocchetto e dell'ingombro degli avvolgimenti (vedi tavola 2).

Portandoci in basso, a sinistra, troviamo, in colonna, la disposizione radiale degli avvolgimenti, dalla quale ricaviamo la «v» e la «w», che usiamo per la determinazione delle spire medie degli stessi. In particolare è:

$$v = 2 \times (\text{spessore rocchetto} + \text{gioco radiale del rocchetto}) + \text{spessore dell'avvolg. interno.}$$

$$w = v + \text{spessore dell'avvolg. interno} + 2 \times \text{spessore interstrato tra avvolg. interno ed avvolg. esterno} + \text{spessore avvolg. esterno.}$$

Inoltre la stessa disposizione radiale ci permette di controllare che lo spessore totale degli avvolgimenti sia contenuto nell'ampiezza disponibile della finestra del nucleo (nel nostro esempio 13,68 minore di  $14,2 = D$ ).

In basso, a destra, vengono calcolate le spire medie da cui vengono determinati i pesi e le perdite del rame; sotto viene calcolata la caduta di tensione del secondario. Le ultime due righe danno peso e perdita del lamierino.

Calcolo piccoli trasformatore		ESEMPIO DI CALCOLO DI UN	
Elettrificazione			
ELEMENTI NOTI	Potenza resa al secondario 50 VA Tensione di alimentazione $V_1 = 220 V - 50 Hz$ Tensione secondaria a carico $V_{2c} = 120 V (\cos \phi = 1)$		
ELEMENTI PREFISSATI	Lam. spess $\Delta = 0.35 mm$ isol. carta $k_s = 1.09$ per $\beta = 1.2 Wb/m^2$ $w_s = 1.96 W/kg$ Avvolgimento in filo rame smaltato normale - Sovratemperatura $50^\circ C$		
TAV. 1 VA $\rightarrow$ AxB	per $\beta = 1.2 Wb/m^2 \rightarrow A \times B = 73 (cm^2)$ $D' = 11$ $E = 37$ $c = 28.5$ uso $A \times B = 60.5 (cm^2)$ $D' \times E = 4.07 (cm^2)$		
TAV. 3 VA $\rightarrow$ n	$\eta = 0.86$ $I_1 = \frac{50}{0.86 \times 220} = 0.264 A$		
TAV. 4 VA $\rightarrow$ v%	$v\% = 8\%$ $V_{2v} = 1.08 \times 120 = 129.5$ $I_2 = \frac{50}{120} = 0.416 A$		
	PRIMARIO I°		SECONDARIO II°
	V	$V_1 = 220$	$V_{2c} = 120$ $V_{2v} = 129.5$
	A	0.264	0.416
TAV. 5 amp $\rightarrow$ $\phi$	d	$d_1 = 0.35$ $d'_1 = 0.39$	$d_2 = 0.45$ $d'_2 = 0.51$
	Sez. filo $mm^2$	$S_c = 0.0962$	0.159
	A/mm <sup>2</sup>	2.74	2.62
TAV. 6 sp/cm	ne	24.4	18.7
TAV. 7 A/cm <sup>2</sup>	ns	116	117
	Volt/spira	$\frac{2 \times 50 \times 1.08}{4.07 \times 116.5} = 0.228$	sp/V = 4.39
TAV. 8 sez fe utile	Sfe	$8.55 (cm^2)$	$H = \frac{8.55}{2.85} \times 1.09 = 3.3 (cm)$
	N° spire	$N_1 = 4.39 \times 220 = 966$	$N_2 = 4.39 \times 129.5 = 568$
	spire per strato	$3.7 \times 24.4 = 91$	$3.7 \times 18.7 = 70$
	N° di strati	$966 : 91 = 10.6 (11)$	$568 : 70 = 8.12 (9)$
	spira media	$l_e = 203 mm$	$l_i = 156.6 mm$
	Peso rame	kg 0.168	0.126
	watt rame	W 3	2.1
	Peso ferro	kg 1.13	tot. kg (Cu+Fe) = 1.424
	watt ferro	W 2.66	tot. W (Cu+Fe) = 7.76
	Rendimento - cad	% $\eta = 86.5\%$	$v\% = 11.75 \times 100 : 120 = 9.8\%$

TRASFORMATORE MONOFASE DA 50 VA		Tavola 10	
- Dimensioni nucleo e rocchetto			
A	70,95		
B	85,3		
C	28,5		
D	14,2		D' 11
E	42,55		E' 37
F	14,2		
H	33		
N° lamierini	$\frac{33}{0.35 \times 1.09} = 86$		
Spessore rocchetto	$c = 1$		
Giucio radiale	$g_i = 0,5$		
Interstrati	$i = 0,1 mm$ carta		
Inter. I° II°	$i' = 0,5 mm$ carta		
Fasciatura esterna	$f = 1 mm$ cotone		
Avvolgimento assiale	I° $0,39 \times 92 = 36$ ( $E' = 37$ ) II° $0,51 \times 71 = 36,2$		
Spessore radiale	I° $0,39 \times 11 = 4,29$ II° $0,51 \times 9 = 4,59$		
interstrato	$0,1 \times 10 = 1,00$ $0,1 \times 8 = 0,8$		
	$Z_e = 5,29$ $Z_i = 5,39$		
2c	2		
2g <sub>i</sub>	1		
Z <sub>i</sub>	5,39		
Z <sub>i</sub>	$\frac{8,39}{5,39}$	v	
i'	$\frac{13,78}{1}$		
Ze	$\frac{14,78}{5,29}$		
Ze	$\frac{20,07}{5,29}$	w	
2f	$\frac{25,36}{2}$		
	$\frac{27,36}{13,63}$ ( $D = 14,2$ )		
C	28,5		
H	33		
	$61,5 \times 2 = 123$		
		$I^\circ l_e = 123 + 4 \times 20,07 = 203 mm$ $II^\circ l_i = 123 + 4 \times 8,39 = 156,6 mm$	
		$I^\circ 8,9 \times 966 \times 0,0962 \times 203 \times 10^{-6} = 0,168 kg$ $II^\circ 8,9 \times 568 \times 0,159 \times 156,6 \times 10^{-6} = 0,126 kg$ tot. 0,294 kg Cu	
		$I^\circ 2,37 \times 2,74^2 \times 0,168 = 3 W I^2 R$ $II^\circ 2,37 \times 2,62^2 \times 0,126 = 2,1 W I^2 R$ 5,1 watt tot. I <sup>2</sup> R	
		$\frac{3 \times 568}{0,264 \times 966} + \frac{2,1}{0,416} = 11,75$ Volt cad al II°	
		$7,7 \times 48,4 \times \frac{3,3}{1,09} \times 10^{-3} = 1,13$ kg ferro $1,2 \times 1,96 \times 1,13 = 2,66$ W ferro	

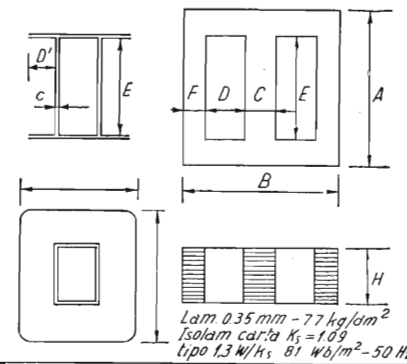
Calcolo piccoli trasformatori	ESEMPIO DI CALCOLO DI UN
Elettrificazione	

<b>ELEMENTI NOTI</b>	Potenza resa al secondario 150 VA Tensione di alimentazione $V_1 = 220\text{ V} - 50\text{ Hz}$ Tensione secondaria a carico $V_{2c} = 120\text{ V} (\cos \phi = 1)$	
<b>ELEMENTI PREFISSATI</b>	Lam. spess. $\Delta = 0,35\text{ mm}$ isol. carta $k_s = 1,09$ per $\beta = 1,2\text{ Wb/m}^2$ $w_s = 1,96\text{ W/kg}$ Avvolgimento in filo rame smaltato normale - Sovratemperatura $50^\circ\text{C}$	
<b>TAV. 1</b> VA $\rightarrow$ A*B	per $\beta = 1,2\text{ Wb/m}^2 \rightarrow A \times B = 126\text{ (cm}^2)$ $D' = 16,5$ $E = 53$ $C = 40$ uso $A \times B = 120\text{ (cm}^2)$ $D' \times E' = 8,75\text{ (cm}^2)$	
<b>TAV. 3</b> VA $\rightarrow$ $\eta$	$\eta = 0,90$ $I_1 = \frac{150}{0,90 \times 220} = 0,76\text{ A}$	
<b>TAV. 4</b> VA $\rightarrow$ $v\%$	$v\% = 5,5$ $V_{2v} = 1,055 \times 120 = 126,5$ $I_2 = \frac{150}{120} = 1,25\text{ A}$	
	<b>PRIMARIO I°</b>	<b>SECONDARIO II°</b>
	V $V_1 = 220$	$V_{2c} = 120$ $V_{2v} = 126,5$
	A 0,76	1,25
<b>TAV. 5</b> amp $\rightarrow$ $\phi$	d $d_1 = 0,63$ $d'_1 = 0,69$	$d_2 = 0,8$ $d'_2 = 0,87$
Sez. filo $\text{mm}^2$	Sc 0,312	0,503
A/ $\text{mm}^2$	$\sigma$ 2,43	2,49
<b>TAV. 6</b> sp/cm <sup>2</sup>	$n_e$ 13,8	11
<b>TAV. 7</b> A/cm <sup>2</sup>	$N_s$ 96	97
Volt/spira	$V_{sp} = \frac{2 \times 150 \times 1,055}{8,75 \times 96,5} = 0,365$	$sp/V = 2,74$
<b>TAV. 8</b> sez. fe utile	$S_{fe} = 13,7\text{ (cm}^2)$ $H = \frac{13,7}{4} \times 1,09 = 3,75\text{ (cm)}$	
N° spire	$N_1 = 2,74 \times 220 = 602$	$N_2 = 2,74 \times 126,5 = 347$
spire per strato	$5,3 \times 13,8 = 73$	$5,3 \times 11 = 59$
N° di strati	$602 : 73 = 8,25 (9)$	$347 : 59 = 5,9 (6)$
spira media	$l$ $l_e = 227\text{ mm}$	$l_i = 196\text{ mm}$
Peso rame	kg 0,380	0,305
watt rame	W 5,35	4,50
Peso ferro	kg 2,54	tot. kg (Cu+Fe) = 3,225
watt ferro	W 6	tot. W (Cu+Fe) = 15,85
Rendimento - cad	% $\eta = 90,5\%$	$v\% = 7,65 \times 100 : 120 = 6,35\%$

TRASFORMATORE MONOFASE DA 150 VA	Tavola <b>11</b>
----------------------------------	---------------------

**TAV. 2 - Dimensioni nucleo e rocchetto**

A	100	$A \times B - 2(D \times E) = 96\text{ (cm}^2)$
B	120	
C	40	
D	20	$D' = 16,5$
E	60	$E' = 53$
F	10	
H	37,5	
N° lamierini	$\frac{37,5}{0,35 \times 1,09} = 98$	



Spessore rocchetto.  $c = 1,5$   
Gioco radiale  $g_1 = 0,75$   
Interstrati  $i = 0,1\text{ mm carta}$   
Inter. I° e II°  $i' = 0,5\text{ mm carta}$   
Fasciatura esterna  $f = 1\text{ mm cotone}$

Avvolgimento assiale I°  $0,69 \times 74 = 51$  ( $E' = 53$ )  
II°  $0,87 \times 60 = 52,2$

Spessore radiale I°  $0,69 \times 9 = 6,21$  II°  $0,87 \times 6 = 5,22$   
interstrato  $0,1 \times 8 = 0,80$   $0,1 \times 5 = 0,5$   
 $Z_e = 7,01$   $Z_i = 5,72$

2c	3	
2g <sub>1</sub>	1 5	
	4 5	
Z <sub>i</sub>	5 72	
	10 22	v
Z <sub>i</sub>	5 72	
	15 94	
2i	1	
	16 94	
Z <sub>e</sub>	7 01	
	23 95	w
Z <sub>e</sub>	7 01	
	30 96	
2f	2	
	32 96	
	16 48	(D = 20)
C	40	
H	37 5	
	77,5 × 2 = 155	

I° $l_e = 155 + 4 \times 23,95 = 227\text{ mm}$
II° $l_i = 155 + 4 \times 10,22 = 196\text{ mm}$
I° $8,9 \times 602 \times 0,312 \times 227 \times 10^{-6} = 0,380\text{ kg}$
II° $8,9 \times 347 \times 0,503 \times 196 \times 10^{-6} = 0,305\text{ kg}$
tot. 0,685 kg Cu
I° $2,37 \times 2,43^2 \times 0,380 = 5,35\text{ W}_1 I^2 R$
II° $2,37 \times 2,49^2 \times 0,305 = 4,50\text{ W}_2 I^2 R$
9,85 watt tot. I <sup>2</sup> R
$\frac{5,35 \times 347}{0,76 \times 602} + \frac{4,5}{1,25} = 7,65\text{ Volt cad al II}^\circ$
$7,7 \times 96 \times \frac{3,75}{1,09} \times 10^{-3} = 2,54\text{ kg ferro}$
$1,2 \times 1,96 \times 2,54 = 6\text{ W ferro}$

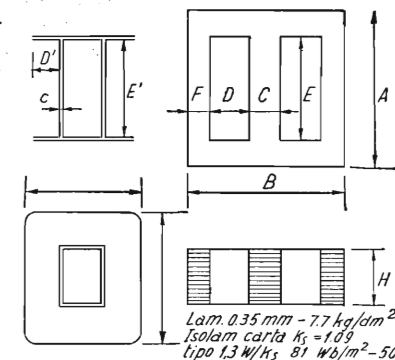
Calcolo piccoli trasformatori	ESEMPIO DI CALCOLO DI UN	
—	Elettificazione	
<b>ELEMENTI NOTI</b>	Potenza resa al secondario 450 VA Tensione di alimentazione $V_1 = 220\text{ V} - 50\text{ Hz}$ Tensione secondaria a carico $V_{2c} = 120\text{ V} (\cos \phi = 1)$	
<b>ELEMENTI PREFISSATI</b>	Lam spess. $\Delta = 0,35\text{ mm}$ isol. carta $k_s = 1,09$ per $\beta = 1,2\text{ Wb/m}^2$ $w_s = 1,96\text{ W/kg}$ Avvolgimento in filo rame smaltato normale - Sovratemperatura $50^\circ\text{C}$	
<b>TAV. 1</b> VA $\rightarrow$ A x B	per $\beta = 1,2\text{ Wb/m}^2 \rightarrow A \cdot B = 219\text{ (cm}^2)$ $D' = 21$ $E' = 67$ $C = 50$ uso $A \cdot B = 197,5\text{ (cm}^2)$ $D' \cdot E' = 14,1\text{ (cm}^2)$	
<b>TAV. 3</b> VA $\rightarrow$ n	$\eta = 92\%$ $I_1 = \frac{450}{0,92 \times 220} = 2,22\text{ A}$	
<b>TAV. 4</b> VA $\rightarrow$ v %	$v\% = 4,5$ $V_{2v} = 1,045 \times 120 = 125,5$ $I_2 = \frac{450}{120} = 3,75\text{ A}$	
	<b>PRIMARIO I°</b>	<b>SECONDARIO II°</b>
	V $V_1 = 220$	$V_{2c} = 120$ $V_{2v} = 125,5$
	A 2,22	3,75
<b>TAV. 5</b> amp $\rightarrow$ $\phi$	d $d_1 = 1,25$ $d_1' = 1,34$	$d_2 = 1,6$ $d_2' = 1,69$
Sez. filo mm <sup>2</sup>	Sc 1,225	2,01
A/mm <sup>2</sup>	J 1,81	1,87
<b>TAV. 6</b> sp/cm <sup>2</sup>	ne 7,1	5,62
<b>TAV. 7</b> A/cm <sup>2</sup>	ns 84	86
Volt/spira	$V_{1sp} = \frac{2 \times 450 \times 1,045}{85 \times 14,1} = 0,785$	sp/V = 1,275
<b>TAV. 8</b> sez fe utile	Sfe 29,5 (cm <sup>2</sup> )	$H = \frac{29,5}{5} \cdot 1,09 = 6,4\text{ (cm)}$
N° spire	$N_1 = 1,275 \times 220 = 280$	$N_2 = 1,275 \times 125,5 = 160$
spire per strato	$6,7 \times 7,1 = 48$	$6,7 \times 5,62 = 38$
N° di strati	$280 : 48 = 5,84\text{ (6)}$	$160 : 38 = 4,2\text{ (5)}$
spira media	I $l_e = 359\text{ mm}$	$l_i = 285\text{ mm}$
Peso rame	kg 1,1	0,815
watt rame	W 8,6	6,8
Peso ferro	kg 6,8	tot. kg (Cu + Fe) = 8,715
watt ferro	W 16	tot. W (Cu + Fe) = 31,4
Rendimento - cad	% $\eta = 93,2\%$	$v\% = 4,02 \times 100 : 120 = 3,35\%$

TRASFORMATORE MONOFASE DA 450 VA

Tavola  
12

TAV 2 - Dimensioni nucleo e rocchetto

A	125	$A \cdot B = 2(D + E) = 150\text{ (cm}^2)$
B	150	
C	50	
D	25	$D' = 21$
E	75	$E' = 67$
F	25	
H	64	



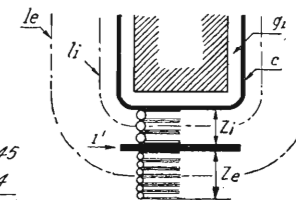
N° lamierini  $\frac{64}{0,35 \times 1,09} = 168$

Spessore rocchetto  $c = 2$   
 Giuoco radiale  $g_t = 0,75$

Interstrati  $\tau = 0,1\text{ mm carta}$   
 Inter I° e II°  $\tau' = 0,5\text{ mm carta}$   
 Fasciatura esterna  $f = 1\text{ mm cotone}$

Avvolgimento assiale  
 I°  $1,34 \times 49 = 65,6\text{ (E' = 67)}$   
 II°  $1,69 \times 39 = 66$

Spessore radiale  
 interstrato I°  $1,34 \times 6 = 8,04$  II°  $1,69 \times 5 = 8,45$   
 $0,1 \times 5 = 0,5$   $0,1 \times 4 = 0,4$   
 $Z_e = 8,54$   $Z_i = 8,85$



2c	4
2g <sub>t</sub>	1 5
Z <sub>i</sub>	8 85
Z <sub>i</sub>	14 35
Z <sub>i</sub>	8 85
Z <sub>i</sub>	23 20
2c	1
Z <sub>e</sub>	24 20
Z <sub>e</sub>	8 54
Z <sub>e</sub>	32 74
Z <sub>e</sub>	8 54
2f	41 28
Z <sub>e</sub>	43 28
H	21 64 (D = 25)
C	50
H	64
	114 x 2 = 228

I°  $l_e = 228 + 4 \times 32,74 = 359\text{ mm}$   
 II°  $l_i = 228 + 4 \times 14,35 = 285\text{ mm}$

I°  $8,9 \times 280 \times 1,225 \times 359 \times 10^{-6} = 1,100\text{ kg}$   
 II°  $8,9 \times 160 \times 2,01 \times 285 \times 10^{-6} = 0,815\text{ kg}$   
 tot 1,915 kg Cu

I°  $2,37 \times 1,81^2 \times 1,1 = 8,6\text{ W I}^2\text{R}$   
 II°  $2,37 \times 1,87^2 \times 0,815 = 6,8\text{ W I}^2\text{R}$   
 15,4 watt tot I<sup>2</sup>R

$\frac{8,6 \times 160}{2,22 \times 280} + \frac{6,8}{3,75} = 4,02\text{ Volt cad al II}^\circ$

$7,7 \times 150 \frac{6,4}{1,09} \times 10^{-3} = 6,8\text{ kg ferro}$   
 $1,2 \times 1,96 \times 6,8 = 16\text{ W ferro}$

Calcolo piccoli trasformatori		ESEMPIO DI CALCOLO DI UN	
Elettrificazione			
<b>ELEMENTI NOTI</b>	Potenza resa al secondario 750 VA Tensione di alimentazione $V_1 = 220 V - 50 Hz$ Tensione secondaria a carico $V_{2c} = 120 V (\cos \phi = 1)$		
<b>ELEMENTI PREFISSATI</b>	Lam. spess. $\Delta = 0,35 mm$ isol. carta $k_s = 1,09$ per $\beta = 1,2 Wb/m^2$ $w_s = 1,96 W/kg$ Avvolgimento in filo rame smaltato normale - Sovratemperatura $50^\circ C$		
<b>TAV. 1</b> VA $\rightarrow$ A*B	per $\beta = 1,2 Wb/m^2 \rightarrow A*B = 283 (cm^2)$ $D' = 25$ $E = 82$ $C = 60$ uso $A*B = 270 (cm^2)$ $D' * E' = 20,5 (cm^2)$		
<b>TAV. 3</b> VA $\rightarrow$ I <sub>1</sub>	$\eta = 93\%$ $I_1 = \frac{750}{0,93 \times 220} = 3,67 A$		
<b>TAV. 4</b> VA $\rightarrow$ v%	$v\% = 4\%$ $V_{2V} = 1,04 \times 120 = 125$ $I_2 = \frac{750}{120} = 6,25 A$		
	PRIMARIO I°		SECONDARIO II°
	V	$V_1 = 220$	$V_{2c} = 120$ $V_{2V} = 125$
	A	3,67	6,25
<b>TAV. 5</b> amp $\rightarrow$ $d$	$d$	$d_1 = 1,8$ $d_1' = 1,90$	$d_2 = 2$ $d_2' = 2,08$
Sez. filo mm <sup>2</sup>	Sc	2,54	3,14
A/mm <sup>2</sup>	$\delta$	1,45	1,99
<b>TAV. 6</b> sp/cm <sup>2</sup>	ne	5	4,57
<b>TAV. 7</b> A/cm <sup>2</sup>	ns	77	77
Volt/spira	V/sp	$\frac{2 \times 750 \times 1,04}{77 \times 20,5} = 0,99$	sp/V = 1,01
<b>TAV. 8</b> sez. fe utile	Sfe	37,1 (cm <sup>2</sup> )	$H = \frac{37,1}{6} \cdot 1,09 = 6,75 (cm)$
N° spire	$N_1$	$1,01 \times 220 = 222$	$N_2 = 1,01 \times 125 = 126$
spire per strato		$8,2 \times 5 = 41$	$8,2 \times 4,57 = 38$
N° di strati		$222 : 41 = 5,4 (6)$	$126 : 38 = 3,3 (4)$
spira media	I	$l_e = 404 mm$	$l_i = 317 mm$
Peso rame	kg	2,03	1,12
W rame	W	10,2	10,5
Peso ferro	kg	10,3	tot. kg (Cu+Fe) = 13,45
W ferro	W	24,2	tot. W (Cu+Fe) = 44,9
Rendimento - cad	%	$\eta = 94,3\%$	$v\% = 3,26 \times 100 : 120 = 2,72\%$

TRASFORMATORE MONOFASE DA 750 VA		Tavola 13
<b>TAV. 2 - Dimensioni nucleo e rocchetto</b>		
A	150	$A+B-2(D \times E) = 216 (cm^2)$
B	180	
C	60	
D	30	$D' = 25$
E	90	$E' = 82$
F	30	
H	67,5	
N° lamierini	$\frac{67,5}{0,35 \times 1,09} = 177$	
Spessore rocchetto	$c = 2,5$	
Gioco radiale	$g_i = 1$	
Interstrati	$\epsilon = 0,1 mm$ carta	
Inter. I° e II°	$\epsilon' = 0,5 mm$ carta	
Fasciatura esterna	$f = 1 mm$ cotone	
Avvolgimento assiale	I° $1,9 \times 42 = 80$ ( $E' = 82$ ) II° $2,08 \times 39 = 81$	
Spessore radiale	I° $1,9 \times 6 = 11,4$ II° $2,08 \times 4 = 8,32$	
interstrato	$0,1 \times 5 = 0,5$ $0,1 \times 3 = 0,3$	
	$Z_e = 11,9$ $Z_i = 8,62$	
2c	5	
2g <sub>1</sub>	2	
Z <sub>i</sub>	7	
	15 62	v
Z <sub>i</sub>	8 62	
	24 24	
2u	1	
Z <sub>e</sub>	25 24	
	11 90	w
Z <sub>e</sub>	37 14	
	11 90	
2f	49 04	
	2	
	51 04	
	25 52 (D=30)	
C	60	
H	67 5	
	$127,5 \times 2 = 255$	
		$I^\circ l_e = 255 + 4 \times 37,14 = 404 mm$ $II^\circ l_i = 255 + 4 \times 15,62 = 317 mm$ $I^\circ 8,9 \times 222 \times 2,54 \times 404 \times 10^{-6} = 2,03 kg$ $II^\circ 8,9 \times 126 \times 3,14 \times 317 \times 10^{-6} = 1,12 kg$ tot. 3,15 kg Cu $I^\circ 2,37 \times 1,45^2 \times 2,03 = 10,2 W I^2 R$ $II^\circ 2,37 \times 1,99^2 \times 1,12 = 10,5 W II^2 R$ 20,7 watt tot. I <sup>2</sup> R $\frac{10,2 \times 126}{3,67 \times 222} + \frac{10,5}{6,25} = 3,26$ Volt cad al II° $7,7 \times 216 \frac{6,75}{1,09} \times 10^{-3} = 10,3$ kg ferro $1,2 \times 1,96 \times 10,3 = 24,2$ W ferro

Calcolo piccoli trasformatori		DATI ELETTRICI E COSTRUTTIVI PER TRASFORMATORI MONOFASI A MANTELLO da 10 a 300 VA.						Tavola
—		50 Hz - Sovratemperatura avvolgimenti 50° C - (filo smaltato; B = 1,2 Wb/m <sup>2</sup> ; lamierino 0,35 mm - tipo 1,3W/kg a 1 Wb/m <sup>2</sup> )						14
Elettrificazione								
Potenza	VA	10	25	50	100	150	300	
tensione di alim.	V <sub>1</sub>	220	220	220	220	220	220	
tens. sec. a carico	V	12	120	120	120	120	120	
corrente second.	I <sub>2</sub>	0,833	0,208	0,416	0,832	1,25	1,66	
caduta di tensione secondaria	v%	20	17,2	9,8	7,2	6,35	5,5	
rendimento	η%	77,5	80,4	80,5	89,2	90,5	91	
volt per spira	V/sp	0,116	0,155	0,228	0,308	0,365	0,488	
spire primarie	N <sub>1</sub>	1898	1420	966	715	602	452	
spire secondarie	N <sub>2</sub>	124	908	579	418	350	260	
∅ conduttore prim. mm	d <sub>1</sub>	0,14	0,2	0,35	0,5	0,63	0,7	
∅ conduttore second. mm	d <sub>2</sub>	0,58	0,35	0,45	0,7	0,8	1	
Sez. ferro cm <sup>2</sup>	S <sub>fe</sub>	4,35	5,82	8,55	11,55	13,7	18,3	
Dimens. del nucleo	cm	A	4,75	6,35	7,095	9	10	10
	cm	B	5,7	7,62	8,53	10,8	12	12
	cm	C	1,9	2,54	2,85	3,6	4	4
	cm	D	0,95	1,27	1,42	1,8	2	2
	cm	E	2,85	3,81	4,255	5,4	6	6
	cm	H	2,5	2,5	3,3	3,5	3,75	5
Peso nucleo kg	kg <sub>fe</sub>	0,384	0,685	1,13	1,92	2,54	3,4	
Peso rame kg	kg <sub>cu</sub>	0,069	0,176	0,295	0,54	0,685	0,842	
Perdite nucleo W	W <sub>fe</sub>	0,9	1,61	2,66	4,5	6	8	
Perdite rame W	W <sub>cu</sub>	2,03	4,5	5,1	7,5	9,85	11,4	
Sez. lamiera cm <sup>2</sup>	A x B	27,1	48,5	60,5	97,1	120	120	
N° lamierini		65	65	86	92	98	131	

Calcolo piccoli trasformatori		DATI ELETTRICI E COSTRUTTIVI PER TRASFORMATORI MONOFASI A MANTELLO da 300 a 750 VA.						Tavola
—		50 Hz - Sovratemperatura avvolgimenti 50° C - (filo smaltato; B = 1,2 Wb/m <sup>2</sup> ; lamierino 0,35 mm - tipo 1,3 W/kg a 1 Wb/m <sup>2</sup> )						15
Elettrificazione								
Potenza	VA	300	400	450	500	600	750	
tensione di alim.	V <sub>1</sub>	220	220	220	220	220	220	
tens. sec. a carico	V <sub>2</sub>	160	120	120	120	120	120	
corrente second.	I <sub>2</sub>	1,88	1,95	3,75	4,16	5	6,25	
caduta di tensione secondaria	v%	4,45	4,05	3,35	3,2	3,3	2,72	
rendimento	η%	92,4	93	93,2	94	94	94,3	
volt per spira	V/sp	.52	.688	.785	86	0,788	.99	
spire primarie	N <sub>1</sub>	422	319	280	255	280	222	
spire secondarie	N <sub>2</sub>	322	182	158	143	157	125	
∅ conduttore primario mm	d <sub>1</sub>	1	1,1	1,25	1,4	1,4	1,8	
∅ conduttore secondario mm	d <sub>2</sub>	1,1	1,4	1,6	1,8	2	2	
Sezione ferro cm <sup>2</sup>	S <sub>fe</sub>	19,5	25,9	29,5	32,1	29,7	37,1	
Dimens. del nucleo	cm	A	12,5	12,5	12,5	12,5	15	15
	cm	B	15	15	15	15	18	18
	cm	C	5	5	5	5	6	6
	cm	D	2,5	2,5	2,5	2,5	3	3
	cm	E	7,5	7,5	7,5	7,5	9	9
	cm	H	4,25	5,65	6,4	7	5,4	6,75
Peso nucleo kg	kg <sub>fe</sub>	4,5	6	6,8	7,45	8,25	10,3	
Peso rame kg	kg <sub>cu</sub>	1,56	1,57	1,915	2,03	2,78	3,15	
Perdite nucleo W	W <sub>fe</sub>	10,6	14,1	16	17,5	19,4	24,2	
Perdite rame W	W <sub>cu</sub>	13,8	16,45	15,4	16,3	20,3	20,7	
Sez. lamiera cm <sup>2</sup>	A x B	187,5	187,5	187,5	187,5	270	270	
N° lamierini		111	148	168	184	142	177	

Calcolo piccoli trasformatori		Tavola
—	ELENCO DEI SIMBOLI USATI	16
Elettrificazione		
<i>a</i> - spessore dell'ala del rocchetto di sostegno degli avvolgimenti	<i>kg<sub>fe</sub></i> peso lamierino del nucleo (kg)	
<i>A</i> - altezza totale del nucleo	<i>kg<sub>cu</sub></i> peso rame dell'avvolgim. (kg)	
<i>B</i> - larghezza totale del nucleo	<i>l<sub>e</sub></i> - lunghezza della spira media dell'avvolgimento esterno	
$\mathfrak{B}$ - induzione nella colonna di avvolgimento del nucleo	<i>l<sub>i</sub></i> - lunghezza della spira media dell'avvolgimento interno	
<i>c</i> - spessore del corpo del rocchetto degli avvolgimenti	<i>N<sub>1</sub></i> - spire dell'avvolgimento primario	
<i>C</i> - larghezza della colonna di avvolgimento della lamiera nucleo	<i>N<sub>2</sub></i> - spire dell'avvolg. secondario	
<i>d</i> - diametro nudo del filo	<i>nl</i> - spire per cm lineare	
<i>d'</i> - diametro isolato del filo	<i>R<sub>f</sub></i> - resistenza elettrica finale, a caldo dell'avvolgimento, (ohm)	
<i>D</i> - larghezza finestra del nucleo	<i>R<sub>i</sub></i> - resistenza elettrica iniziale, cioè a temperatura ambiente, dell'avvolgimento (ohm)	
<i>D'</i> - larghezza utile finestra del nucleo	<i>S<sub>fe</sub></i> - sezione effettiva della colonna d'avvolgimento del nucleo (cm <sup>2</sup> )	
<i>E</i> - altezza finestra del nucleo	<i>S<sub>cu</sub></i> - sezione del conduttore dell'avvolgimento (mm <sup>2</sup> )	
<i>E'</i> - altezza utile finestra del nucleo	<i>S<sub>l</sub></i> - superficie del lamierino <i>A</i> × <i>B</i> in cm <sup>2</sup>	
<i>f</i> - frequenza della corrente di alimentazione (periodi al secondo)	<i>S<sub>u</sub></i> - area reale della superficie del nucleo, per il calcolo del peso del nucleo	
<i>f</i> - fasciatura esterna della bobina	<i>t<sub>f</sub></i> - temperatura finale, a caldo, dell'avvolgimento (°C)	
<i>F</i> - larghezza della colonna esterna del nucleo a mantello	<i>t<sub>i</sub></i> - temperatura iniziale, ossia dell'ambiente, dell'avvolgim. (°C)	
<i>g<sub>e</sub></i> - gioco radiale esterno tra ala rocchetto e finestra nucleo	<i>v</i> % caduta percentuale di tensione al secondario	
<i>g<sub>i</sub></i> - gioco radiale interno del rocchetto rispetto al nucleo	<i>V<sub>I</sub></i> tensione al primario (volt)	
<i>i</i> - interstrato in carta tra strati	<i>V<sub>2v</sub></i> tensione a vuoto al secondario	
<i>i'</i> - interstrato in carta tra avvolgim. primario e secondario	<i>V<sub>2c</sub></i> tensione a carico al secondario	
<i>I<sub>a</sub></i> - componente della corrente a vuoto in fase con la tensione	<i>w<sub>s</sub></i> - perdita specifica teorica del lamierino (W/kg)	
<i>I<sub>m</sub></i> - componente della corrente a vuoto a 90° con la tensione	<i>W<sub>cu</sub></i> perdite negli avvolgim. (watt)	
<i>I<sub>o</sub></i> - corrente a vuoto	<i>W<sub>fe</sub></i> perdite del nucleo (watt)	
<i>I<sub>1</sub></i> - corrente dell'avvolgimento primario a carico	<i>Z</i> - spessore dell'avvolgimento	
<i>I<sub>2</sub></i> - corrente dell'avvolgimento secondario a carico	$\delta$ - (delta) densità di corr. (A/mm <sup>2</sup> )	
<i>K</i> - coefficiente di riempimento	$\Delta$ - (delta) spessore del lamierino (mm)	
<i>K<sub>s</sub></i> - coefficiente di stipamento delle lamiere del nucleo	$\eta$ - (eta) rendimento	
<i>K<sub>u</sub></i> - coefficiente di utilizzazione della finestra del nucleo	$\Phi$ - (fi) flusso in Weber	
	$\tau$ - rapporto di trasformazione (tau)	

Calcolo piccoli trasformatori		Tavola
—	PRINCIPALI FORMULE RICHIAMATE NEL TESTO	17
Elettrificazione		
(1) $t = t_i + \frac{R_f - R_i}{R_i} (234,5 + t_i) (°C)$	(8)	$\mathfrak{B} = \frac{\Phi}{S}$ (flusso in weber / sezione effettiva del nucleo in m <sup>2</sup> )
(2) $100 \frac{V_{2v} - V_{2c}}{V_{2v}} = v_2 \%$		(9) $\mathfrak{B} S_{fe}^2 \times 10^{-4} = \Phi$ (Wb) ( <i>S<sub>fe</sub></i> in cm <sup>2</sup> )
(3-a) $E = 4,44 f N \Phi$		(10) $E = 4,44 f N \mathfrak{B} S_{fe} \times 10^{-4}$ (volt)
(3-b) $\Phi = \frac{V_I}{4,44 f N}$		(11) $W/kg = \frac{f}{50} w_s \mathfrak{B}^2$
(4) $\frac{E_I}{E_2} = \frac{N_I}{N_2}$		(12) $W_{fe} = 1,2 \frac{f}{50} w_s \mathfrak{B}^2 kg_{fe}$ (watt)
(5) $\frac{E_I}{E_2} = \frac{V_I}{V_{2v}} = \frac{N_I}{N_2}$		(13) $W_{cu} = I_1^2 R_I + I_2^2 R_2$ (watt)
(6) $I_1 N_I = I_2 N_2$		(14) $R = \rho \frac{l}{S}$ (ohm)
(7) $\delta = \frac{I}{S_{cu}} \left( \frac{A}{mm^2} \right)$		(15) $W_{cu} = 2,37 \delta^2 kg_{cu}$ (W a 75° C)
		(16) $\eta = \frac{VA_{sec}}{\sqrt{VA_{sec} + W_{fe} + W_{cu}}}$

Calcolo piccoli trasformatori		LAMIERINI UNIFICATI UNEL								Tavola <b>18</b>	
Elettrificazione											
										<p>Quote in millimetri.</p> <p>Serrapacco unificato per piccoli trasformatori.</p>	
A	B	C	D	E	F	G	H	I	d		
30	36	12	6,0	18,0	24	3,5	2,5	—	—		
35	42	14	7,0	21,0	28	3,5	3,5	—	—		
40	48	16	8,0	24,0	32	4,0	4,0	—	—		
45	54	18	9,0	27,0	36	4,0	4,0	—	—		
50	60	20	10,0	30,0	40	4,0	4,0	4,0	4		
55	66	22	11,0	33,0	44	5,0	6,0	4,5	5		
62,5	75	25	12,5	37,5	50	5,0	6,0	4,5	5		
70	84	28	14,0	42,0	56	6,0	8,0	5,0	6		
80	96	32	16,0	48,0	64	6,0	8,0	5,5	6		
90	108	36	18,0	54,0	72	7,0	9,0	6,0	7		
100	120	40	20,0	60,0	80	7,0	9,0	6,0	7		
112,5	135	45	22,5	67,5	90	8,0	10,0	7,0	8		
125	150	50	25,0	75,0	100	8,0	10,0	7,5	8		

Indichiamo sommariamente la procedura tradizionale usata nell'industria per il calcolo dei trasformatori, applicabile a qualunque tipo di trasformatore, quindi anche ai piccoli trasformatori monofasi che qui consideriamo. Come è noto, i dati di partenza per il calcolo di qualsiasi trasformatore monofase sono i seguenti:

- P = Potenza (in VA);
- f = Frequenza (in Hz);
- V = Tensioni a vuoto, primaria e secondaria o secondarie (in volt).

La linea della procedura di calcolo per trasformatori monofasi con bobine di avvolgimento disposte concentricamente, si svolge come segue:

- 1) determinazione del tipo e della sezione del nucleo;
- 2) volt per spira;
- 3) numero delle spire;
- 4) correnti nei singoli avvolgimenti;
- 5) sezione dei conduttori e relative dimensioni nude e isolate;
- 6) formazione assiale degli avvolgimenti;
- 7) formazione radiale degli avvolgimenti;
- 8) determinazione del peso e perdite nel rame degli avvolgimenti;
- 9) determinazione del peso del lamierino magnetico e perdite nel ferro;
- 10) verifica della caduta di tensione;
- 11) verifica del riscaldamento;
- 12) determinazione del rendimento.

Per il calcolo degli elementi suddetti si procede come qui di seguito indicato.

1. - **Sezione del nucleo  $S_{fe}$** : si determina in base a trasformatori simili o applicando una delle note formule:

$$S_{fe} = k \sqrt{P} \quad (\text{cm}^2)$$

dove:

- $k = 0,7 \div 1,2$  per due colonne avvolte;
- $k = 1 \div 1,6$  per una colonna avvolta.

2. - **Volt per spira  $e$** : fissata l'induzione nel ferro  $B$  (Wb/m<sup>2</sup>) si determinano con i volt per spira con la seguente formula:

$$e = 4,44 f S_{fe} \times 10^{-4}$$

3. - **Spire degli avvolgimenti**:  $N_1 = V_1/e$   $N_2 = V_2/e$ , essendo:

- $V_1, N_1$  = tensione e numero spire primarie;
- $V_2, N_2$  = tensione e numero spire secondarie;
- $e$  = volt per spira.



4. - **Corrente nei singoli avvolgimenti:**  $I_1 = P/V_1$ ;  $I_2 = P/V_2$ .

5. - **Sezione conduttori:** fissata la densità  $\delta$  (A/mm<sup>2</sup>), basandosi sui valori desunti da macchine già eseguite (vedasi a questo proposito i dati riportati nelle tavole 14-15), si ricavano le sezioni dei conduttori ( $S_{cu}$ ), in millimetri quadrati:

$$S_{cu} = \frac{I}{\delta}.$$

Dalle sezioni si risale, ovviamente, al diametro del filo esistente in commercio (vedasi tavole 6-a, 6-b).

Ricordiamo che normalmente si usano fili di rame fino a diametri di circa 3,5 mm. Quando occorrono sezioni maggiori si possono adoperare più fili in parallelo oppure piattine a sezione rettangolare aventi spigoli arrotondati. L'isolamento dei conduttori può essere smalto o smalto cotone o solo cotone o seta o carta oppure anche le combinazioni.

6. - **Formazione assiale:** bisogna disporre le spire degli avvolgimenti in maniera che gli avvolgimenti stessi abbiano il medesimo ingombro assiale (vedasi esempio di calcolo riportato a pag. 29 e seguenti).

7. - **Dimensione radiale:** determinata l'altezza degli avvolgimenti consegue anche la dimensione radiale.

8. - **Perdite:** le perdite in  $W_{cu}$  in ogni avvolgimento (riferite a 75° C) si possono determinare immediatamente attraverso la seguente formula:

$$W_{cu} = 0,211 \times P \times l \times \frac{\delta}{e} \times 10^{-4} \text{ in watt}$$

essendo:

- $P$  = potenza del trasformatore, in volt-ampere;
- $l$  = lunghezza spira media dell'avvolgimento considerato, in millimetri;
- $\delta$  = densità di corrente, in ampere per millimetro quadrato;
- $e$  = volt per spira.

Il peso del rame di ogni avvolgimento si ottiene dalla formula (15) (ved tav. 17) a pag. 75).

$$\text{Peso avvolgimento} = \frac{W}{2,37 \times \delta^2} \text{ (kg)}.$$

Le perdite in watt ed il peso devono calcolarsi per ogni avvolgimento. Le lettere usate hanno i seguenti significati:

- $l$  = lunghezza della spira media in millimetri dell'avvolgimento considerato;
- $\delta$  = densità di corrente nell'avvolgimento considerato.

Infine, per la determinazione dei valori indicati precedentemente ai punti 9, 10, 11 e 12, rimandiamo a quanto già precisato nelle formule indicate nel testo.

## INDICE DEGLI ARGOMENTI

CAPITOLO I — <i>Principi generali</i> .....	Pag. 3
CAPITOLO II — <i>Cenni sul funzionamento</i> .....	» 8
CAPITOLO III — <i>Perdite nel trasformatore</i> .....	» 14
Perdite nel ferro del nucleo .....	» 14
Perdite nel rame .....	» 16
Rendimento dei trasformatori .....	» 16
CAPITOLO IV — <i>Nucleo</i> .....	» 18
CAPITOLO V — <i>Avvolgimenti relativi e rocchetti</i> .....	» 24
CAPITOLO VI — <i>Procedimento di calcolo</i> .....	» 26
CAPITOLO VII — <i>Trasformatore monofase con nucleo a due colonne</i> .....	» 29
CAPITOLO VIII — <i>Cenni sugli autotrasformatori e procedimento di calcolo</i> .....	» 33
Esempio di calcolo di un trasformatore monofase da 300 VA .....	» 58
Esempio di calcolo di un trasformatore monofase da 50 VA .....	» 64
Esempio di calcolo di un trasformatore monofase da 150 VA .....	» 66
Esempio di calcolo di un trasformatore monofase da 450 VA .....	» 68
Esempio di calcolo di un trasformatore monofase da 750 VA .....	» 70
Dati elettrici e costruttivi per trasformatori monofasi a mantello da 10 a 300 VA .....	» 72
Dati elettrici e costruttivi per trasformatori monofasi a mantello da 300 a 750 VA .....	» 73
Elenco dei simboli adottati .....	» 74
Principali formule richiamate nel testo .....	» 75

## INDICE DELLE TAVOLE

Tavola 1 — Determinazione approssimata del formato del lamierino in base alla potenza in VA .....	Pag. 45
Tavola 2 <sub>a</sub> — Relazioni per il dimensionamento dei nuclei e dei relativi rocchetti .....	» 46
Tavola 2 <sub>b</sub> — Dimensioni di alcuni formati di lamierini e dei relativi rocchetti .....	» 47
Tavola 2 <sub>c</sub> — Coefficiente $K_u$ di utilizzazione della finestra del nucleo a mantello .....	» 48

Tavola 3	— Curva indicativa per la determinazione preventiva del rendimento percentuale .....	Pag 49
Tavola 4	— Curva indicativa per la determinazione preventiva della caduta percentuale di tensione nel secondario .....	» 50
Tavola 5	— Determinazione del diametro del filo nudo in base allo spessore ed alla corrente dell'avvolgimento per una sovratemperatura di 50 °C .....	» 51
Tavola 6 <sub>a</sub>	— Caratteristiche ed ingombro del filo smaltato normale .....	» 52
Tavola 6 <sub>b</sub>	— Caratteristiche ed ingombro del filo con doppia spirale di cotone .....	» 53
Tavola 7 <sub>a</sub>	— Determinazione degli ampere per ogni cm <sup>2</sup> di area della finestra del nucleo noto il diametro del filo nudo. Valevole per filo smaltato normale e per una sovratemperatura di 50 °C .....	» 54
Tavola 7 <sub>b</sub>	— Determinazione degli ampere per ogni cm <sup>2</sup> di area di finestra del nucleo, noto il diametro del filo nudo. Valevole per filo isolato in doppio cotone e per una sovratemperatura di 50 °C .....	» 55
Tavola 8 <sub>a</sub>	— Determinazione della sezione effettiva della colonna del nucleo quando siano noti i volt per spira (oppure le spire per volt) .....	» 56
Tavola 8 <sub>b</sub>	— Determinazione della sezione effettiva del nucleo quando sono noti i volt per spira. (Diagramma simile a quello della tavola 8a, ma eseguito in un'altra scala) .....	» 57
Tavole 9	— Procedimento di calcolo di un trasformatore monofase da 300 VA .....	» 58
Tavole 10	— Esempio di calcolo di un trasformatore monofase da 50 VA .....	» 64
Tavole 11	— Esempio di calcolo di un trasformatore monofase da 150 VA .....	» 66
Tavole 12	— Esempio di calcolo di un trasformatore monofase da 450 VA .....	» 68
Tavole 13	— Esempio di calcolo di un trasformatore monofase da 750 VA .....	» 70
Tavole 14	— Dati elettrici e costruttivi per trasformatori monofasi a mantello da 10 a 300 VA .....	» 72
Tavole 15	— Dati elettrici e costruttivi per trasformatori monofasi a mantello da 300 a 750 VA .....	» 73
Tavola 16	— Significato dei simboli adottati .....	» 74
Tavola 17	— Principali formule richiamate nel testo .....	» 75
Tavola 18	— Lamierini unificati UNEL .....	» 76

## ELETTRONICA

- A. Bandini Buti - V. Re - **Oscilloscopio a raggi catodici.**
- P. L. Cerato - **I tubi di potenza nell'elettronica industriale.**
- P. L. Cerato - **Circuiti fondamentali nell'elettronica industriale.**
- E. Mazza - **I diodi al germanio ed al silicio.**
- E. Mazza - **Transistori.**
- P. L. Cerato - **Amplificatori magnetici.**
- C. Borgonovo - **Regolazione automatica.**
- E. Gelder - **Transistori nei circuiti di commutazione.**
- R. Swoboda - **Thyristor.**
- M. Flego - **Controllo numerico delle macchine utensili.**
- K. Apel - **Circuiti elettronici di conteggio.**
- V. J. Karpov - **I transistori nei circuiti di stabilizzazione.**
- G. Figini - **I circuiti logici statici e le loro applicazioni negli azionamenti industriali.**
- V. Vivona - **Gli elaboratori elettronici.**
- E. Gelder - W. Hirschmann - **Applicazioni pratiche dei semiconduttori.**
- Esempi di circuiti transistorizzati.**
- V. Medved - **I relè statici.**
- G. Figini - **Azionamenti a velocità variabile.**
- R. Hahn - **Tecnica dei comandi digitali.**
- H. von Höppl - **Circuiti integrati.**
- N. Grilloni - **Il transistor come interruttore.**
- N. Grilloni - **Dispositivi PNP - Tiristori e triac.**
- N. Grilloni - **Polarizzazione e stabilizzazione termica dei transistori - Calcolo dei radiatori.**
- G. Figini - **Alimentatori e invertitori statici.**
- A. Bandini Buti - **Sistemi di amplificazione e diffusione sonora.**
- G. Calabrese - **L'algebra di Boole.**
- G. Figini - **Servomeccanismi - Teoria della regolazione automatica.**
- G. Figini - **Elettronica industriale - Circuiti ed applicazioni.**
- G. Figini - **Elettronica industriale - Realizzazioni pratiche e prove di laboratorio.**
- N. Grilloni - **Progetto e calcolo degli alimentatori stabilizzati.**
- G. Montessori - **Elettronica di potenza - Azionamenti in CC.**
- G. Leonida - **L'assemblaggio elettronico.**
- G. Figini - **L'amplificatore operazionale**

## GALVANOTECNICA

- C. Clerici - **Gli accumulatori elettrici.**
- E. Giudici - **Impianti galvanotecnici.**
- L. Bresciani - **L'ossidazione anodica dell'alluminio.**
- G. Mastai - **Formule e dati pratici per galvanotecnica.**

## MANUALI PRATICI

- V. Re - **Prontuario elettrotecnico.**
- Sbik - **Manuale degli schemi.**

## **IMPIANTI ELETTRICI**

- W. Forlani - **Gli impianti elettrici e le norme di legge.**  
F. Bottio - L. Sottani - **La protezione contro i contatti elettrici accidentali.**  
G. Paleari - **Rifasamento degli impianti elettrici industriali.**  
R. Costa - **Il calcolo delle correnti di corto circuito negli impianti elettrici.**  
C. Clerici - **Progetto e calcolo degli impianti di illuminazione.**  
E. Coppi - **Le cabine di trasformazione per impianti industriali e civili.**  
A. Bandini Buti - **Gli impianti elettrici sulle autovetture.**  
A. Bandini Buti - **I guasti nell'impianto elettrico delle autovetture.**  
E. Coppi - **La costruzione delle cabine di trasformazione.**  
C. Clerici - **La messa a terra degli impianti elettrici.**  
G. Pagani - **Linee elettriche aeree di bassa e media tensione.**  
G. Franceschetti - **Magneti permanenti.**  
L. Cibrario - **I raddrizzatori a semiconduttori.**  
P. L. Cerato - **Manutenzione delle apparecchiature elettriche.**  
G. Fighini - **Equipaggiamenti elettrici industriali.**  
R. Casagrande - C. Clerici - **Parafulmini.**  
V. Re - **Installazione delle macchine elettriche rotanti.**  
V. Re - **Manutenzione delle macchine elettriche rotanti.**  
G. Colli Lanzi - **Alberi elettrici.**  
G. Perone - **Contattori e loro applicazioni.**  
A. Bossi - E. Sesto - **Gli scaricatori di sovratensione.**  
B. Roeper - **Le correnti di corto circuito nelle reti elettriche trifasi.**  
L. Salvati - **Progettazione e calcolo degli elettromagneti.**  
G. Abele - **L'ascensore elettrico.**  
A. Bossi - E. Sesto - **Impianti elettrici.**  
E. Cometta - **L'energia solare.**  
E. Grassani - **Interruttori e relè differenziali.**  
P. Menga - **L'auto elettrica: la tecnica e le prospettive.**  
A. Bandini Buti - M. Bertolini - **Elettrotecnica pratica - Elementi fondamentali.**  
E. Sesto - A. Bossi - **Elettrotecnica pratica - Tecnica degli impianti.**  
V. Re - A. Bandini Buti - **Energia elettrica.**

### **Collana l'installatore qualificato:**

- Vol. I - **Impianti elettrici nelle abitazioni.**  
Vol. II - **Impianti di messa a terra.**  
Vol. III - **Impianti di illuminazione interna civile e industriale.**  
Vol. IV - **Impianti di illuminazione esterna.**  
Vol. V - **Impianti di antenne TV.**  
Vol. VI - **Impianti citofonici civili e industriali.**  
Vol. VII - **Impianti telefonici nelle abitazioni.**