

MANUALE PER IL CALCOLO DI TRASFORMATORI

Giunchi Fabrizio

Introduzione	7
Che cosa è un trasformatore	7
Induzione Magnetica	7
Frequenza	8
Coefficiente di Dimensionamento K_d	8
Lamierino Ferromagnetico	9
Coefficiente di Stipamento K_s	9
Spessore del pacco lamellare e Superficie del pacco lamellare	9
Rendimento e Caduta di Tensione %	10
Densità di Corrente	11
Ingombro dell'Avvolgimento	11
Coefficiente di Ingombro K_i	12
Avvolgimenti Collegati in Serie oppure Isolati fra loro	12
Avvolgimenti Collegati in Serie con più carichi collegati contemporaneamente	12
Come Avvolgere il Trasformatore	13
Avvolgimenti in Bifilare, Trifilare, Quadrifilare, ecc.	14
Raddrizzatori per Trasformatore Monofase	15
Premessa sul Raddrizzatore Monofase a Ponte di Graetz	16
Premessa sul Raddrizzatore Monofase a Doppia Semionda a due Diodi	17
Raddrizzatore monofase a Semionda, Esempio con Diodi al Silicio	19
Raddrizzatore monofase a Doppia Semionda, Esempio con Diodi al Silicio	19
Raddrizzatore monofase a Ponte di Graetz, Esempio con Diodi al Silicio	19
Raddrizzatore monofase a Semionda, Esempio con Diodi a Vuoto	20
Raddrizzatore monofase a Doppia Semionda, Esempio con Diodi a Vuoto	20
Raddrizzatore monofase a Ponte di Graetz, Esempio con Diodi a Vuoto	20
Dimensionamento di un Trasformatore Monofase	21
Elementi da prefissare	21
Formato Lamierino	21
Sezione del Nucleo	21
Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro	22
Numero Spire	22
Corrente primario e secondario	22
Diametro dei Conduttori	23
Lunghezza Filo Avvolgimento e Peso del Rame	23
Resistenza degli avvolgimenti	23
Perdite nel Rame	23
Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento	23
Controllo Ingombri	24
Verifica controllo, rendimento e caduta di tensione	24
Dimensionamento di un AutoTrasformatore Monofase	26
Fattore di Riduzione K_r	26
Considerazioni teoriche sull'Autotrasformatore	27
Considerazioni teoriche sull'Autotrasformatore Multipresa	29
Vantaggi dell' Autotrasformatore	31
Svantaggi dell' Autotrasformatore	31
Esempio pratico di Autotrasformatore Monofase	33
Elementi da prefissare	33
Potenze dell'Autotrasformatore	33
Formato Lamierino	33
Sezione del Nucleo	33
Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro	34

Numero Spire.....	34
Corrente primario e secondario.....	34
Diametro dei Conduttori	35
Lunghezza Filo Avvolgimento e Peso del Rame	35
Resistenza degli avvolgimenti.....	35
Perdite nel Rame	35
Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento	36
Controllo Ingombri.....	36
Verifica controllo, rendimento e caduta di tensione	36
Esempio pratico di Autotrasformatore Monofase Multipresa.....	38
Elementi da prefissare	38
Potenze dell'Autotrasformatore	38
Formato Lamierino	39
Sezione del Nucleo	40
Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro.....	40
Numero Spire.....	40
Diametro dei Conduttori	41
Lunghezza Filo Avvolgimento e Peso del Rame	41
Resistenza degli avvolgimenti.....	41
Perdite nel Rame	41
Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento	42
Controllo Ingombri.....	42
Verifica controllo, rendimento e caduta di tensione	43
Introduzione al Trasformatore Trifase in Aria	44
Tipi di collegamenti	44
Scelta dei collegamenti	45
Spostamento di fase	46
Tabella Spostamento di Fase dei Principali Gruppi	47
Considerazioni fra Parametri di Linea, di Fase e di Avvolgimento.....	48
Avvolgimento a Triangolo	49
Avvolgimento a Stella	50
Avvolgimento a Zig-Zag.....	51
Avvolgimento Bifase.....	52
Analisi di un Trasformatore Tri-Bifase 380V/150V	53
Avvolgimento Esafase a Doppia Stella	54
Avvolgimento Esafase a Zig-Zag	55
Dimensionamento di un Trasformatore Trifase in aria.....	56
Elementi da prefissare	56
Calcolo della Potenza Totale secondario	56
Parametri di Singolo Avvolgimento Secondario.....	57
Parametri di Singolo Avvolgimento Primario.....	57
Formato Lamierino	58
Sezione del Nucleo Ferromagnetico di una colonna	58
Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro.....	58
Numero Spire.....	59
Diametro dei Conduttori	59
Lunghezza filo avvolgimento e peso del rame.....	59
Resistenza degli avvolgimenti.....	60
Perdite nel Rame	60
Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento	60
Controllo Ingombri.....	60
Verifica controllo, rendimento e caduta di tensione	61

Dimensionamento di un AutoTrasformatore Trifase in aria.....	62
Spostamento di fase dell'autotrasformatore trifase	62
Elementi da prefissare	63
Calcolo della Potenza Totale secondario	63
Parametri di Singolo Avvolgimento Secondario.....	63
Parametri di Singolo Avvolgimento Primario.....	63
Corrente primario e secondario	63
Potenze dell'Autotrasformatore	63
Formato Lamierino	64
Sezione del Nucleo Ferromagnetico di una colonna	64
Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro.....	64
Numero Spire.....	65
Diametro dei Conduttori	65
Lunghezza filo avvolgimento e peso del rame.....	65
Resistenza degli avvolgimenti.....	66
Perdite nel Rame	66
Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento	66
Controllo Ingombri.....	66
Verifica controllo, rendimento e caduta di tensione	67
Introduzione al Trasformatore di Uscita per Amplificatore Valvolare.....	68
Generalità sul trasformatore di uscita.....	68
La qualità del trasformatore d'uscita.....	68
Caratteristiche di un buon trasformatore di uscita.....	69
Distorsioni sui trasformatori di uscita.....	70
Materiali ferro-magnetici	70
Intensità di campo magnetico	70
Induzione Magnetica	70
Permeabilità Magnetica	71
Trasformatori di Uscita collegati in Serie	71
Trasformatori di Uscita collegati in Parallelo	71
Trasformatori di Uscita collegati in Serie e in Parallelo.....	72
Esempi di Trasformatori di Uscita collegati in Serie e in Parallelo per SE	73
Esempi di Trasformatori di Uscita collegati in Serie e in Parallelo per PP.....	74
Valvole finali collegate in parallelo.....	75
Trasformatore di Uscita Asimmetrico (Single-Ended SE).....	76
Trasformatore di Uscita Simmetrico (Push-Pull PP).....	76
Avvolgimenti nei trasformatori di Uscita.....	76
Come avvolgere il trasformatore di uscita Asimmetrico Single-Ended.....	77
Come avvolgere il trasformatore di uscita Simmetrico Push-Pull	77
Trasformatore di Uscita Ultralineare	78
Qualche consiglio utile per un buon Trasformatore di Uscita:.....	79
Trasformatori di elevata qualità HI-FI	80
Nuovi valori di Impedenze dopo la variazione numero spire:	82
Schema degli Avvolgimenti del Trasformatore di Uscita.....	83
Trasformatori di Uscita con Avvolgimenti Secondari Multipli.....	84
Tabella Configurazioni Avvolgimenti Secondari	85
Configurazione N.....	86
Configurazione A	87
Configurazione B	88
Configurazione C	89
Configurazione D	90
Configurazione E (solo per Single-Ended).....	91

Configurazione F (solo per Push-Pull)	92
Configurazione G	93
Configurazione H	94
Identificazione di un trasformatore di uscita	95
Metodo per determinare l'impedenza secondaria Z_c , fissando l'impedenza primaria Z_a :	95
Metodo per determinare l'impedenza primaria Z_a , fissando l'impedenza secondaria Z_c :	95
Metodo per determinare l'induzione B :	96
Metodo pratico per determinare l'induzione B	97
Metodo per determinare la Corrente massima degli Avvolgimenti :	97
Dimensionamento di un Trasformatore di Uscita Single.Ended	98
Elementi da prefissare	98
Calcolo dei Parametri di Base	98
Diametro dei Conduttori	98
Formato Lamierino	99
Sezione del Nucleo	99
Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro	99
Numero Spire	100
Spessore del Traferro	100
Induttanza del Primario	100
Lunghezza filo avvolgimento e peso del rame	100
Resistenza degli avvolgimenti	100
Perdite nel Rame	101
Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento	101
Controllo Ingombri	101
Dimensionamento di un Trasformatore di Uscita Push-Pull	103
Elementi da prefissare	103
Calcolo dei Parametri di Base	103
Diametro dei Conduttori	104
Formato Lamierino	104
Sezione del Nucleo	104
Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro	104
Numero Spire	105
Induttanza del Primario	105
Lunghezza filo avvolgimento e peso del rame	105
Resistenza degli avvolgimenti	106
Perdite nel Rame	106
Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento	106
Controllo Ingombri	106
Dimensionamento di un Trasformatore di Uscita Push-Pull configurazione D	108
Elementi da prefissare	108
Calcolo dei Parametri di Base	108
Diametro dei Conduttori	109
Formato Lamierino	109
Sezione del Nucleo	109
Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro	110
Numero Spire	110
Avvolgimenti Parziali	110
Altri Parametri degli Avvolgimenti Parziali	111
Induttanza del Primario	112
Lunghezza filo avvolgimento e peso del rame	112
Resistenza degli avvolgimenti	112
Perdite nel Rame	112

Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento	113
Controllo Ingombri.....	113
Tabella Lamierino Tipo EI Standard (MO) Monofase	115
Tabella Lamierino Tipo EI DILDA (MO) Monofase.....	115
Tabella Lamierino Tipo EI Allungato (MA) Monofase.....	116
Tabella Lamierino Tipo UI Monofase a 2 Colonne	116
Tabella Lamierino Tipo EI Quadro (TQ) Trifase	117
Tabella Lamierino Tipo EI Standard Trifase	117
Tabella Lamierino Tipo EI Allungato Trifase	118
Rocchetti per Avvolgimenti dei Trasformatori.....	119
Tabella dei Rocchetti Plastici più comuni per Trasformatori con nucleo a Mantello.....	120
Tabella dei Rocchetti Plastici più comuni per Trasformatori con nuclei C a un rocchetto	123
Tabella dei Rocchetti Plastici più comuni per Trasformatori con nuclei C a due rocchetti.....	123
Tabella dei Rocchetti Plastici più comuni per Trasformatori con nucleo Trifase.....	124
Tabella Filo Rame Smaltato per Avvolgimenti di Trasformatori	127
Grafico Coefficiente di Riempimento Kf	128

Introduzione

Dopo aver letto questa guida chiunque sarà in grado dimensionarsi ed autocostruirsi qualsiasi tipo di trasformatore con le caratteristiche richieste dai vari circuiti elettrici in cui sarà impiegato. Avendo a disposizione dei vecchi trasformatori inutilizzati o bruciati avrete la possibilità di riutilizzarli superando così le eventuali difficoltà che potete incontrare nel tentativo di reperirli in commercio. Questa guida vi aiuterà a superare gli scogli che incontrerete nella progettazione e nella costruzione di trasformatori, quindi alla fine sarà facile determinare il numero delle spire, il diametro del filo, le dimensioni del nucleo ferromagnetico, la potenza impiegata, le condizioni di lavoro e l'ingombro degli avvolgimenti per verificare se saranno contenuti nelle finestre dei lamierini.

Che cosa è un trasformatore

Il trasformatore è una macchina elettrica che trasferisce da un circuito elettrico ad un altro circuito anch'esso elettrico energia elettrica sotto forma di corrente alternata. Lo scopo principale dei trasformatori è di modificare i parametri che definiscono la potenza. La potenza elettrica si esprime come il prodotto dei due fattori tensione e corrente (considerando $\cos\varphi = 1$) e viene misurata in Volt-ampere (VA). In generale, data una potenza, se si aumenta la tensione diminuisce la corrente, e viceversa. Il trasformatore ha la funzione di mutare il valore di questi due parametri consentendo quindi di adattarli alle necessità del trasporto, della distribuzione, della utilizzazione dell'energia elettrica, come pure di alimentare macchine o apparecchi elettrici previsti per una tensione diversa da quella di rete.

Il trasformatore non può assolutamente funzionare in corrente continua, infatti, esso si basa sui fenomeni dell'induzione elettromagnetica e avendo gli avvolgimenti fissi, è necessario che vi sia una variazione di flusso per indurre una 'forza elettromotrice indotta' (f.e.m.) negli avvolgimenti. Per questo il trasformatore è una macchina funzionante esclusivamente in corrente alternata.

Le tensioni, le correnti, il numero di spire, l'impedenza, ecc... del primario e del secondario sono in stretto rapporto fra loro tale che:

$$K = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}$$

Questo coefficiente K è un numero che si definisce "Rapporto di Trasformazione", ed è sempre valido per qualsiasi tipo di trasformatore.

Induzione Magnetica

Il corrispondente della corrente nel caso magnetico è il *flusso*, che si potrebbe definire come il *magnetismo* che *passa* attraverso un certo circuito. Il flusso si può piuttosto pensare che stia rappresentando l'entità della deformazione prodotta all'interno di un corpo sottoposto al campo magnetico, ossia la percentuale di atomi che per effetto del magnetismo hanno dovuto orientare le orbite dei loro elettroni nel senso delle linee di forza. Il *flusso magnetico* si misura in weber (Wb) ed il flusso che attraversa una sezione unitaria del campo, viene chiamata *induzione magnetica* B che si misura in weber/metro quadrato (Wb/m^2), ma si può misurare anche in Tesla (T) oppure su vecchi libri in Gauss (Gs) secondo la relazione che segue:

$$1\text{Wb/m}^2 = 1\text{Tesla} = 10000\text{Gauss}$$

- Questo parametro dipende dal rendimento, dalla corrente a vuoto desiderata e dalle condizioni di raffreddamento del nucleo. Come dato di primo orientamento potremo dire che in genere ogni tipo di lamierino ha un suo 'range' di induzione alla quale può funzionare che dipende dal tipo di materiale (ferro, ferro-silicio, grani orientati ecc.).
- Normalmente i più usati sono: lamierini normali che permettono un'induzione da $B=0.6 \text{ Wb/m}^2$ ad un massimo di $B=1.4 \text{ Wb/m}^2$; lamierini al silicio che permettono un'induzione da $B=0.6 \text{ Wb/m}^2$ ad un massimo di $B=1.8 \text{ Wb/m}^2$. In genere nei calcoli se non si conoscono bene le caratteristiche del materiale magnetico, si assume un valore d'induzione pari a $B=1 \text{ Wb/m}^2$.

- Il valore massimo dell'induzione a cui si fanno lavorare i trasformatori, con potenza totale secondaria fino a 50 Watt è di $B=1,4 \text{ Wb/m}^2$, che va diminuita sino a $B=1 \text{ Wb/m}^2$ per trasformatori di 300 Watt.
- Quando occorre ridurre il campo disperso attorno ad un trasformatore, come negli oscilloscopi o nei preamplificatori, oltre ai normali accorgimenti costruttivi, come lamiera di rame intorno a tutto il trasformatore, schermatura fornita da calotte in ferro ad alta permeabilità, orientamento fisico del trasformatore nel luogo in cui viene installato, si consiglia una bassa induzione, ad esempio $B=0,7 \text{ Wb/m}^2$.
- La corrente assorbita a vuoto da un trasformatore è detta corrente di magnetizzazione, tale corrente deve essere di ampiezza limitata per non avere un riscaldamento eccessivo dell'avvolgimento primario: al massimo può avere un valore di un quarto della corrente totale assorbita a pieno carico. Se risulta di un valore maggiore è necessario aumentare la sezione del ferro o il numero delle spire degli avvolgimenti, per far lavorare il ferro con una minore induzione.
- Per ottenere un trasformatore di dimensioni ridotte si fa lavorare il ferro con la massima densità di flusso possibile (induzione molto elevata): a queste condizioni corrisponde una corrente di magnetizzazione che può avere una intensità quasi uguale a quella richiesta dal primario del trasformatore per il carico impostogli, con conseguente riscaldamento e vibrazioni eccessive. Questa condizione può essere accettabile se il trasformatore è destinato a lavorare per tempi brevi o in condizione di ventilazione forzata e gli avvolgimenti sono realizzati con isolamento adeguato sia per i conduttori sia fra gli strati, di materiali adatti a lavorare a temperature elevate (esempio saldatrice elettrica).

Attenzione quindi alla scelta dell'*induzione magnetica*, perché il suo valore definisce *il tipo di lavoro* del trasformatore :

- Se si sceglie un Induzione Basso si ottiene un trasformatore con alto numero di spire, con una bassa forza elettromotrice indotta (f.e.m.i.) in una spira, con una bassa corrente di magnetizzazione, quindi idoneo ad un servizio continuo.
- Se si sceglie un Induzione Alta si ottiene un trasformatore con basso numero di spire, con una alta forza elettromotrice indotta (f.e.m.i.) in una spira, con una alta corrente di magnetizzazione, quindi idoneo ad un servizio limitato.

Bisogna anche tenere conto che le perdite nel ferro (aumento di calore dei lamierini) aumentano approssimativamente con il quadrato dell'induzione.

La scelta del valore di induzione magnetica dipende quindi dal rendimento, dalla corrente a vuoto desiderata e dalle condizioni di raffreddamento del nucleo ferromagnetico. In pratica si definisce $B=0,7 \approx 0,9 \text{ Wb/m}^2$ per trasformatori con potenza da 10 $\approx$ 100VA oppure per tutti i trasformatori con funzionamento continuo. Mentre si può assumere valori di $B=0,9 \approx 1,2 \text{ Wb/m}^2$ per trasformatori con potenza superiore ai 100VA.

Frequenza

Rappresenta l'andamento della tensione e corrente alternata nel tempo. La tensione di rete che tutti abbiamo in casa ha una frequenza di 50Hz, in america 60Hz. Questo numero indica quante volte in un secondo la tensione o la corrente riproducono una forma d'onda completa.

Coefficiente di Dimensionamento Kd

Nel determinare la sezione del nucleo ferromagnetico (S_{fe}) si moltiplica la radice della potenza per un *coefficiente* Kd che può essere scelto a piacere fra i valori:

da 1 a 1,6 utilizzando un lamierino a mantello.

da 0,7 a 1,2 utilizzando un lamierino a 2 colonne.

Questo parametro permette di scegliere se si vuole abbondare nel rame (valore di Kd basso) oppure se si vuole abbondare nel ferro (valore di Kd alto).

- Se si sceglie un coefficiente Kd Basso si ottiene un trasformatore di dimensioni ridotte, con alto numero di spire, con una bassa f.e.m.i. in una spira, con una bassa corrente di magnetizzazione. Se si associa anche una bassa induzione si ottiene un trasformatore idoneo ad un servizio continuo.

- Se si sceglie un coefficiente K_d Alto si ottiene un trasformatore di grosse dimensioni, con basso numero di spire, con una alta f.e.m.i. in una spira, con una alta corrente di magnetizzazione. Se si associa anche una alta induzione si ottiene un trasformatore idoneo ad un servizio limitato. Scegliendo un coefficiente K_d prossimo ad 1,3 possiamo notare che lo spessore del pacco di lamierini (S_p) sarà un valore prossimo al valore della colonna centrale (C), questo ovviamente sempre nel limite del possibile, così da ottenere un nucleo ferromagnetico ottimale a forma quadrata. La ragione è alquanto semplice se si pensa che a parità di superficie il quadrato è la forma geometrica che ha minor perimetro. Le spire per tanto risulteranno più corte e quindi minori perdite per effetto joule (perdite nel rame) e anche le linee di forza del flusso magnetico saranno più omogenee

Lamierino Ferromagnetico

Volendo costruire un trasformatore è necessario, come prima cosa, stabilire quanti watt si possono prelevare dal trasformatore in nostro possesso da ricostruire, ovvero bisognerà conoscere tutte le dimensioni del lamierino, in particolare le quote della colonna centrale (C); della finestra ($E - F$); e lo spessore del pacco (S_p).

I lamierini adoperati nelle costruzioni dei trasformatori hanno normalmente forma di E ed I affacciati. Le varie parti del lamierino sono dimensionate in modo da eliminare ogni perdita di materiale durante la tranciatura. Tali lamierini sono stati unificati dal Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI-UNEL).

Identificare il lamierino misurando le quote in millimetri (mm) con un righello o calibro e facendo riferimento alle tabelle. Verificare se rientra nei formati unificati, oppure se si tratta di un lamierino diverso con misure personalizzate considerato FUORI STANDARD.

Un parametro caratteristico del lamierino ferromagnetico è la cifra di perdita W_s definita in W/kg che rappresenta la bontà della lega con la quale è realizzato per cercare di ridurre le perdite nel ferro. Di solito il valore di cifra di perdita del lamierino rientra in un campo da 1,5 a 4 W/kg.

Coefficiente di Stipamento K_s

La sezione del nucleo ferromagnetico S_{fe} si dice netta perché non è complessiva dell'isolamento del lamierino, parametro definito dal coefficiente di stipamento K_s . Questo coefficiente può assumere valori fra 1.05 e 1.15 tutto dipende dal tipo di isolamento del lamierino, dal tipo di spessore del lamierino (0,35-0.5 mm), e dalla cura con cui l'operatore esegue il montaggio dei lamierini nel rocchetto. Per il coefficiente di stipamento K_s si assume il valore fisso di $K_s=1.11$.

Spessore del pacco lamellare e Superficie del pacco lamellare

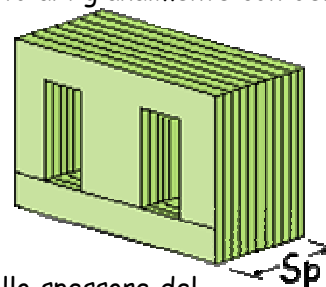
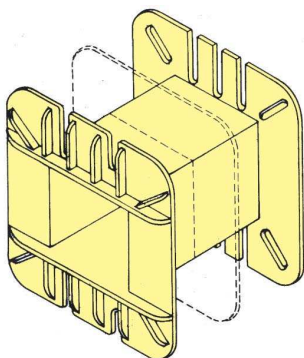
Lo spessore del nucleo ferromagnetico (S_p) determina la quantità di lamierini da infilare nel rocchetto. Se si desiderano delle misure personalizzate il rocchetto può essere costruito artigianalmente con del cartoncino speciale, oppure può essere del tipo a formato standard in plastica facendo riferimento alle tabelle (ha delle misure standard indicate in rilievo su una facciata del rocchetto: esempio 40x50 vuole dire che la colonna $C=40$ mm ed $S_p=50$ mm).

Di solito il valore dello spessore del pacco deve essere mantenuto entro i limiti da 0,5 a 3 volte la larghezza della colonna centrale (C) questo per

una buona utilizzazione del materiale.

Infatti nel limite del possibile, il valore ideale dello spessore del pacco di lamierini (S_p) dovrebbe essere uguale al valore della colonna centrale (C), così da ottenere una sezione di forma quadrata.

Di solito quando si calcola un trasformatore si parte conoscendo i valori di tensione e corrente per poi calcolare la potenza, dalla quale si definisce la Superficie del Ferro (S_{fe}) in cm^2 del nucleo centrale del pacco lamellare. Questa superficie è data dalla larghezza (C) del lamierino scelto moltiplicato lo spessore del pacco lamellare (S_p). Possiamo intuire che a parità di superficie si può diminuire (C) ed aumentare (S_p) avendo un lamierino con finestre più piccole, oppure viceversa, si può aumentare (C) ed diminuire (S_p)



avendo un lamierino con finestre più grandi.

Purtroppo difficilmente si trova un rocchetto plastico delle dimensioni che cerchiamo, per cui o ce lo costruiamo con del cartoncino, oppure dobbiamo reperire sul mercato un rocchetto plastico di dimensioni standard avente le dimensioni (CxSp) che più si avvicinano al valore calcolato di (Sfe).

Sicuramente il rocchetto che abbiamo trovato stravolge il nostro trasformatore, perché utilizzerà uno spessore pacco e un lamierino con dimensioni diverse. Tutto ciò non è un problema, dobbiamo solo ricalcolare tutto il trasformatore in funzione del nuovo pacco lamellare.

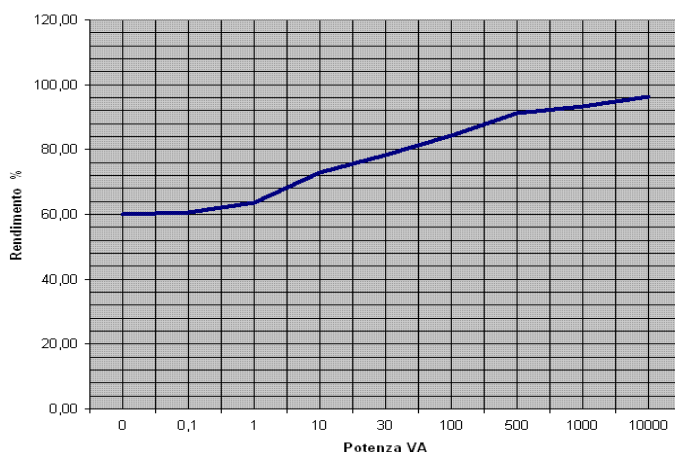
Rendimento e Caduta di Tensione %

Il trasformatore è la macchina elettrica che ha il maggior rendimento in quanto non avendo parti in movimento si può fare carico delle sole perdite nel rame e delle perdite nel ferro. Nel calcolo del trasformatore è opportuno tenere conto del rendimento per farci capire che tutta la potenza assorbita dal primario non viene trasferita tutta al secondario. Il rendimento come anche la caduta di tensione che si viene a creare da vuoto a carico dipendono dalla potenza del trasformatore. Nella tabella sono espressi alcuni valori indicativi dell'andamento del rendimento η e della caduta di tensione $v\%$ in forma percentuale.

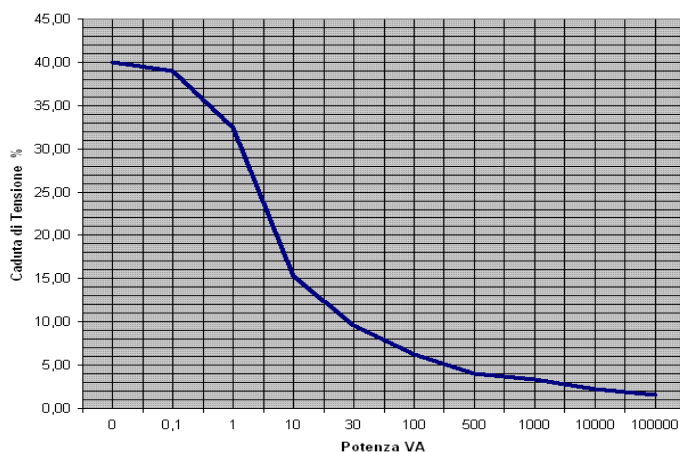
Potenza VA	Rendimento η %	C.d.T v %
da 10 a 30	65÷80	20÷10
da 30 a 100	80÷85	10 ÷ 5
da 100 a 500	85÷90	5 ÷ 3
da 500 a 1000	90÷94	3 ÷ 2

Rendimento % del trasformatore in funzione della Potenza

$$\eta = 60 + \left(\frac{\log_e (P_2 + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (P_2 + 1000)} \right) (\%)$$



Caduta di Tensione % del trasformatore in funzione della Potenza
$$v\% = \frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{P_2}{2} + 2,72 \right) \right)^{1,35}} (\%)$$



Densità di Corrente

La densità di corrente (J) ammissibile nei conduttori dipende della superficie di irradiazione del calore del trasformatore. Per piccoli trasformatori, che sono quelli delle normali apparecchiature, la superficie di raffreddamento è grande rispetto alla potenza erogata dai secondari, quindi si adopereranno densità di corrente nettamente superiori a quelle adottate per grandi trasformatori.

Per potenze da 75 a 150 VA si può adottare una densità di corrente di $J = 3 \text{ A/mm}^2$ di sezione. Questa densità può essere aumentata sino a $J = 4 \text{ A/mm}^2$ per trasformatori da 20 VA.

Il valore della densità di corrente si sceglie in relazione alla possibilità di raffreddamento del trasformatore ed al tipo di servizio.

In linea di massima si può considerare una densità di corrente da $J = 2 \text{ A/mm}^2$ a $J = 4 \text{ A/mm}^2$. Si sceglie una densità bassa per servizi continui, mentre una densità alta per servizi limitati.

E' consigliabile usare densità minori (da 2 a 3 A/mm^2) per conduttori di diametro (1,5 a 2,5mm) i quali a parità di densità scaldano di più, e anche per i conduttori più sottili (0,15 a 0,30mm) perché, se essi non sono ben calibrati, piccole variazioni del valore assoluto nel diametro portano a grandi variazioni percentuali della sezione e quindi della densità. Questi valori di densità vanno rispettati, per assicurarsi che:

le perdite per effetto Joule non risultino alte, con un conseguente eccessivo aumento della temperatura e un aumento della caduta di tensione sugli avvolgimenti.

che lo spazio occupato dagli avvolgimenti e dagli isolanti non risulti piccolo rispetto alla sezione della finestra, infatti è buona norma riempire con l'avvolgimento tutto lo spazio a disposizione nella finestra del lamierino.

Corrente in A	Densità A/mm^2	Diametro in mm
da 0,01 a 0,1	da 1,5 a 2,5	da 0,10 a 0,25
da 0,1 a 1	da 2 a 4	da 0,25 a 0,55
da 1 a 10	da 4 a 3	da 0,55 a 2,5
da 10 in su	da 3 a 2	da 2,5 in su

Ingombro dell'Avvolgimento

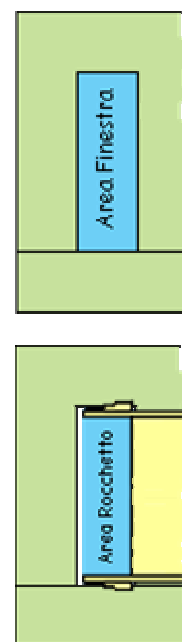
Dal momento in cui si conoscono le dimensioni del lamierino, il diametro dei conduttori ed il numero di spire si può determinare la dimensione dell'avvolgimento per controllare se esso potrà essere contenuto nella finestra $E \times F$ del lamierino (Area Finestra), o per meglio dire nello spazio a disposizione fornito dal rocchetto $H \times M$ (vedi tabelle misure lamierini e rocchetti). Infatti moltiplicando $H \times M$ si ottiene la superficie in mm^2 che rappresenta lo spazio disponibile ad accogliere l'avvolgimento (Area Rocchetto).

A questo punto ci resta da calcolare lo spazio lordo totale occupato dall'avvolgimento di rame, dagli strati isolanti interposti fra gli strati e fra gli avvolgimenti e in più bisogna tenere conto di eventuali spazi vuoti creati involontariamente nell'esecuzione dell'avvolgimento.

Lo scopo è quello di ottenere un valore di spazio occupato minore di quello indicato dallo spazio disponibile così come verifica degli ingombri che tali avvolgimenti saranno contenuti dal rocchetto e quindi senza presentare poi difficoltà nell'inserire i lamierini ferromagnetici.

Se il valore dello spazio occupato è maggiore dello spazio disponibile non è possibile procedere, questo perché l'ingombro degli avvolgimenti è maggiore dello spazio a disposizione. A questo punto possiamo ricominciare il calcolo da capo utilizzando un lamierino con finestre più grandi, oppure variare qualche parametro in modo da diminuire il numero delle spire o anche la sezione del filo, facendo molta attenzione ai parametri che si modificano perché potrebbero compromettere il corretto funzionamento del trasformatore.

Ogni spira di filo di rame avvolta occuperà uno spazio pari all'area di un quadrato il cui lato è rappresentato del diametro, questo per tenere conto degli spazi vuoti che si formano fra spira e spira. Infatti non è possibile che le spire del secondo strato occupino il vano formato tra spira e spira del primo strato per la diversa inclinazione delle spire stesse.



Ogni strato di carta isolante interposta fra i vari strati degli avvolgimenti occuperà uno spazio che non dobbiamo sottovalutare. Per cui un giro di isolante occuperà uno spazio pari all'area ricavata moltiplicando il suo spessore per la misura di H del rocchetto.

Inoltre è opportuno considerare che la finestra del lamierino risulti il più possibile riempita dagli avvolgimenti, onde ridurre così i flussi dispersi.

La scelta del tipo di lamierino è di fondamentale importanza, infatti se l'avvolgimento è troppo ingombrante si deve scegliere un lamierino con finestre più grandi, ma se l'avvolgimento non riempie nemmeno metà dello spazio offerto dalla finestra si deve scegliere un lamierino di dimensioni minori.

Coefficiente di Ingombro K_i

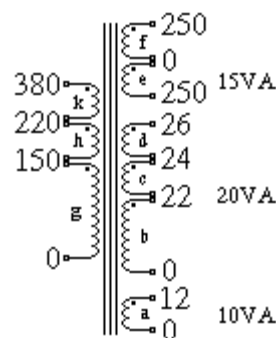
È un coefficiente di ingombro che non compromette il funzionamento del trasformatore. Praticamente l'ingombro del rame sommato all'ingombro degli isolanti viene moltiplicato per tale coefficiente K_i , in modo da sopperire ad altri eventuali spazi vuoti. Questo coefficiente viene dedotto dalla pratica, in base al grado di isolamento del filo, al numero degli avvolgimenti, e all'abilità del bobinatore.

Per il coefficiente di ingombro K_i si assume di solito il valore di $K_i=10\%$.

Avvolgimenti Collegati in Serie oppure Isolati fra loro

Per realizzare un trasformatore in modo da poterlo utilizzare con diverse tensioni di alimentazione (es. 380V, 220V, 150V) è necessario costruire tre avvolgimenti primari, che poi saranno collegati in serie. Per alimentare questo trasformatore si collegano i fili fra 0-150V oppure 0-220V oppure 0-380V a seconda delle nostre esigenze. Attenzione, tenere sempre presente che non è possibile alimentare il trasformatore con due o più tensioni contemporaneamente. In questo caso si dice che gli avvolgimenti sono in serie con prese di regolazione di tensione. Infatti gli avvolgimenti vengono avvolti per differenza spire, l'avvolgimento 380 è dato dalla somma degli avvolgimenti 'g+h+k', situazione identica nel secondario, l'avvolgimento 26 è dato dalla somma degli avvolgimenti 'b+c+d'.

Per gli avvolgimenti secondari le soluzioni di collegamenti sono molteplici, infatti gli avvolgimenti secondari sono destinati ad alimentare dei carichi. Per ciò può sorgere la necessità di avere ad esempio: un secondario con presa centrale al quale si può collegare un raddrizzatore a due diodi; oppure un secondario con prese di regolazione di tensione; oppure un secondario tradizionale isolato.



Il secondario con presa centrale è composto di due avvolgimenti isolati che poi vengono collegati in serie tenendo conto che la fine di un avvolgimento va collegata all'inizio dell'altro avvolgimento (vedi pallino nell'avvolgimento in figura), questo punto funge da presa centrale. Se questi due secondari sono destinati a due diodi raddrizzatori capiamo che questi avvolgimenti sono interessati alternativamente uno per mezza semionda e l'altro per l'altra mezza semionda. Quindi per questi secondari destinati ad un raddrizzatore a due diodi si considera la potenza di un solo avvolgimento, ma come numero spire ne avvolgiamo due identici.

Nei secondari collegati in serie con prese di regolazione di tensione, ognuno di questi avvolgimenti va calcolato per la potenza in cui viene impiegato (di solito tutti questi avvolgimenti hanno la stessa potenza), ma nel calcolo della potenza totale del trasformatore va preso solo il valore di potenza di un singolo avvolgimento.

Per tutti gli altri secondari isolati la potenza va considerata per intero.

La potenza totale del trasformatore in figura è data dalla somma delle potenze dei singoli avvolgimenti secondari ($P_{tot}=10+20+15=45VA$).

Avvolgimenti Collegati in Serie con più carichi collegati contemporaneamente

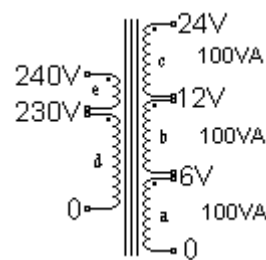
Nella progettazione può sorgere l'esigenza di dover realizzare trasformatori con avvolgimenti secondari multipresa, cioè che oltre ad avere la funzione di regolazione di tensione alimentano anche un proprio carico distinto. Nell'esempio in figura il trasformatore è dotato di due avvolgimenti primari di regolazione tensione di alimentazione e di tre avvolgimenti secondari collegati in serie.

Se consideriamo le prese 6V, 12V, 24V come prese di regolazione della tensione di uscita dove collegare poi un solo carico distinto questo trasformatore verrà dimensionato per una potenza di 100VA.

Se consideriamo le prese 6V, 12V, come prese di regolazione della tensione di uscita dove collegare poi ad ogni uscita un proprio carico distinto (in totale due carichi contemporaneamente) questo trasformatore verrà dimensionato per una potenza di $100+100=200\text{VA}$.

Se consideriamo le prese 6V, 12V, 24V come prese di regolazione della tensione di uscita dove collegare poi ad ogni uscita un proprio carico distinto (in totale tre carichi contemporaneamente) questo trasformatore verrà dimensionato per una potenza di $100+100+100=300\text{VA}$.

In questo caso bisogna considerare il fatto che tutti i tre carichi fanno capo al morsetto '0' del trasformatore, per cui l'avvolgimento 'a' oltre alla sua corrente si deve far carico anche della corrente degli altri avvolgimenti 'b' e avvolgimento 'c'. Anche l'avvolgimento 'b' oltre alla sua corrente si deve far carico anche della corrente dell'avvolgimento 'c'. Tutto questo comporta una notevole riduzione del numero di spire degli avvolgimenti secondari (essendo collegati in serie) ma contribuisce ad un aumento della sezione del filo di rame smaltato di alcuni avvolgimenti, infatti il diametro filo è calcolato in funzione della corrente che lo attraversa.

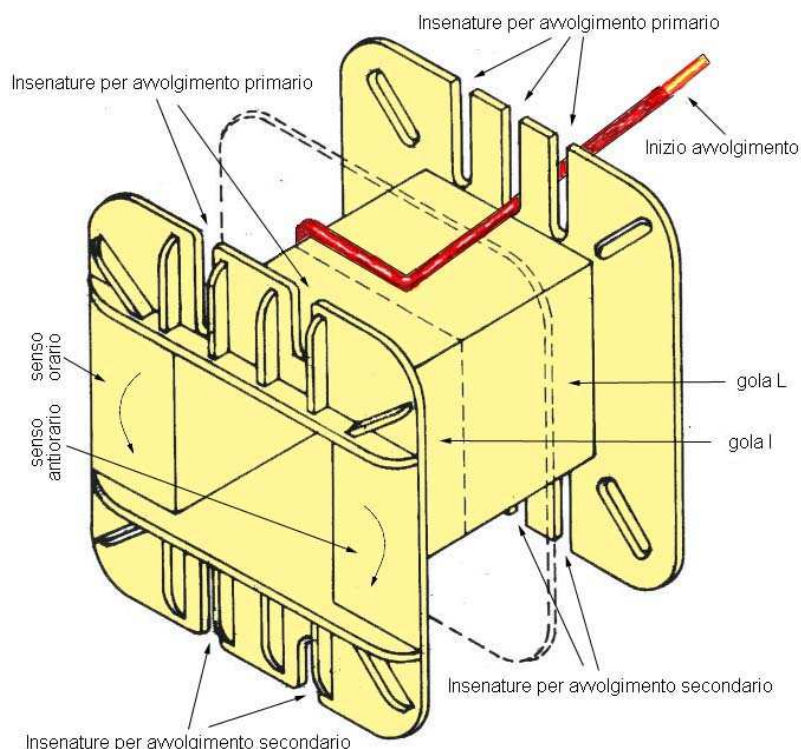


Come Avvolgere il Trasformatore

Una volta conosciuto il numero di spire necessarie per gli avvolgimenti e il diametro dei fili da utilizzare, si procede alla costruzione pratica del trasformatore.

Se il nucleo di lamierini possiede un rocchetto in cartoncino o in plastica, non esistono problemi; se il rocchetto non esiste, bisogna costruirlo in cartoncino, tenendo conto che a costruzione ultimata, i lamierini possano entrare senza difficoltà nel rocchetto.

Per quanto riguarda l'ordine dell'avvolgimento, non vi sono regole precise: quindi è possibile avvolgere subito i vari avvolgimenti primari e successivamente il secondario, o viceversa. Di solito si avvolgono prima gli avvolgimenti primari perché essi, richiedono del filo di rame di piccola sezione, ed è più facile ottenere al termine un avvolgimento omogeneo e compatto che può fare da base di appoggio agli avvolgimenti secondari. Questa condizione non si verificherebbe se avvolgiamo prima i secondari, che di solito impiegano fili di sezione elevata. Possiamo anche aggiungere che è più facile modificare gli avvolgimenti secondari in caso che necessita al secondario una tensione diversa, senza intaccare le molte spire primarie.



Quando si inizia la realizzazione dell'avvolgimento proteggiamo il filo con un pezzo di tubino in plastica o sterlingato della lunghezza di circa 15cm, va fissato con un po' di nastro adesivo in carta al rocchetto e portato fuori. Questo rappresenta l'inizio dell'avvolgimento.

Cominciamo ad avvolgere partendo da sinistra verso destra per il primo strato, per poi ritornare con il secondo strato da destra verso sinistra, fino a terminare il numero di spire richieste. Le spire

dovranno risultare adiacenti fra loro, il filo dovrà essere sufficientemente teso in modo da sagomare le spire al rocchetto, al termine del primo strato, si provvederà ad applicare un giro di nastro di carta, poi un altro strato di spire e così via di seguito fino ad esaurire in numero totale delle spire.

Alla fine di ogni avvolgimento proteggiamo ancora il filo con un tubino in plastica o sterlingato come ad inizio avvolgimento, successivamente applicheremo due giri di nastro di carta

Se utilizziamo un filo che ha per isolamento un doppio smalto non è necessario isolare strato per strato con nastro di carta ma sarà sufficiente applicare due giri di carta fra avvolgimenti primari e secondari.

Tenere presente che il nastro di carta che serve per isolare strato da strato aumenta l'ingombro dell'avvolgimento, per cui è molto importante usare carta assai sottile, in modo da evitare che al termine dell'avvolgimento, non ci sia più lo spazio sufficiente per i successivi avvolgimenti.

Gli avvolgimenti secondari si avvolgono nello stesso senso con cui abbiamo avvolto gli avvolgimenti primari, proseguendo la costruzione secondo la procedura appena descritta. Nell'impiego di fili con sezione maggiore è richiesta una maggiore cura alla sagomatura delle spire attorno al rocchetto, per evitare che si creino spazi vuoti.

Quando abbiamo finito di avvolgere tutti gli avvolgimenti sia primari che secondari si applicano tre o quattro giri di nastro di carta o nastro apposito per costruzione di trasformatori, non usare lo scotch di plastica per usi casalinghi perché la temperatura di funzionamento del trasformatore lo scioglierebbe.

Mentre avvolgiamo ogni tanto è bene controllare se il lamierino si riesce ad infilare nel rocchetto. I lamierini verranno inseriti nel rocchetto in modo sfalsato, uno in un verso, uno nell' altro, in modo da eliminare un eventuale traferro. Cercare di infilare più lamierini possibili per poi avere un nucleo di ferro ben serrato e compatto servendoci di un martello di plastica e facendo attenzione di non danneggiare lo smalto o tagliare le spire nell'infilare i lamierini, infine si deve serrare tutto il pacco di lamierini con calotte o bulloni serrapacco onde evitare che i lamierini vibrano.

Avvolgimenti in Bifilare, Trifilare, Quadrifilare, ecc...

Con il termine avvolgimento in bifilare, trifilare, quadrifilare, ecc... consideriamo di avvolgere contemporaneamente 2, 3, 4, o più fili di rame smaltato paralleli tutti contemporaneamente. Lo scopo di questo metodo di avvolgere il trasformatore è quello di creare un filo di rame smaltato simile ad una piattina di rame di sezione rettangolare. Ipotizziamo che dal lamierino ferromagnetico fuoriesca una nube di campo magnetico che l'avvolgimento deve captare e trattenere come una rete da pesca. Se l'avvolgimento è di poche spire e realizzato con filo sottile si capisce subito che la rete ha le maglie larghe e trattiene poco. Se le stesse spire sono realizzate da un filo tipo piattina la rete avrà le maglie più strette quindi trattiene e reagisce meglio al campo magnetico.

Se dal calcolo del trasformatore ci viene proposto di realizzare un avvolgimento con del filo di diametro $\phi_1 = 1,08\text{mm}$ avente sezione $S_f = 0,7854\text{mm}^2$, possiamo realizzare lo stesso numero di spire avvolgendo 2 fili contemporaneamente in Bifilare utilizzando del filo di diametro $\phi_1 = 0,76\text{mm}$ avente sezione $S_f = 0,3848\text{mm}^2$. Infatti questi due fili in totale hanno circa la stessa sezione del filo calcolato $0,3848 \times 2 = 0,7696\text{mm}^2$, per cui la densità di corrente rimane circa la stessa, ma abbiamo creato un conduttore di sezione rettangolare che oltre a migliorare la resa riesce meglio a coprire lo strato di avvolgimento da fiancata a fiancata laterale del rocchetto.

Oppure possiamo realizzare lo stesso numero di spire avvolgendo 3 fili contemporaneamente in Trifilare utilizzando del filo di diametro $\phi_1 = 0,66\text{mm}$ avente sezione $S_f = 0,2827\text{mm}^2$. Anche in questo caso tre fili in totale hanno circa la stessa sezione del filo calcolato $0,2827 \times 3 = 0,8481\text{mm}^2$, per cui la densità di corrente rimane circa la stessa, ma abbiamo creato un conduttore di sezione rettangolare (tre fili affiancati).

Avendo a disposizione più spazio nella finestra del rocchetto è possibile anche utilizzare del filo di sezione maggiore rispetto a quella calcolata con il vantaggio di riempire meglio tutto il rocchetto, di abbassare la densità di corrente e di realizzare un avvolgimento con una minore resistenza.

Raddrizzatori per Trasformatore Monofase

Quando si ha la necessità di ottenere una tensione continua si applica al secondario del trasformatore un opportuno circuito raddrizzatore. Questi circuiti sfruttano le caratteristiche dei diodi rettificatori che permettono il passaggio di corrente solo in un senso. In passato si utilizzavano diodi rettificatori metallici (ad ossido di rame e al selenio), i cui limiti massimi sono: tensioni di esercizio 200Vac con correnti di 300mA, caduta di tensione sul raddrizzatore di 8Vcc. Per potenze superiori si utilizzavano le valvole raddrizzatrici: i cui limiti massimi sono: tensioni di esercizio 800Vac con correnti di 300mA.

La caduta di tensione sul raddrizzatore è variabile in funzione della corrente assorbita, in pratica si può dire che la tensione continua fornita è di ugual valore della tensione alternata di ingresso. Al giorno d'oggi si utilizzano principalmente i diodi al silicio disponibili sul mercato con caratteristiche di tensione e corrente di vari valori, si possono trovare a seconda delle proprie esigenze, la caduta di tensione sui diodi corrisponde a circa qualche volt. La differenza sostanziale fra diverse tecnologie costruttive di diodi rettificatori comporta una diversità nella resistenza interna. Un diodo con elevata resistenza interna evidenzia maggiormente la caduta di tensione da vuoto a carico. Inoltre il diodo a vuoto per funzionare richiede un avvolgimento dedicato per l'alimentazione del suo filamento.

All'uscita del raddrizzatore la forma d'onda è molto grossolana non adatta ad alimentare circuiti elettronici. Inserendo a valle del raddrizzatore un filtro livellatore costituito da una cella Resistenza - Condensatore oppure Induttanza - Condensatore si riducono le ondulazioni sfruttando l'energia accumulata dal condensatore. Come si può intuire la tensione in uscita dopo il filtro sarà circa uguale al valore di cresta della semionda. Il valore dell'ondulazione residua è denominato Ripple.

La tensione continua prelevata in uscita dai raddrizzatori non è stabilizzata per cui le variazioni della corrente assorbita dal carico si ripercuotono con delle variazioni di detta tensione. Come già affermato la principale causa di questo abbassamento di tensione è dovuta alla resistenza interna del diodo rettificatore che provoca una caduta di tensione proporzionale alla corrente assorbita.

Ai fini della pratica se realizziamo un raddrizzatore con diodi al silicio più filtro di livellamento ipotizziamo di ottenere una tensione continua a carico di circa 1,37 volte il valore della tensione alternata: es. 150Vac, dopo averla raddrizzata si ottiene una tensione continua di $150 \times 1,37 = 205\text{Vcc}$. Se realizziamo un raddrizzatore con diodi a vuoto più filtro di livellamento ipotizziamo di ottenere una tensione continua a carico di circa 1,2 volte il valore della tensione alternata: es. 150Vac, dopo averla raddrizzata si ottiene una tensione continua di $150 \times 1,2 = 180\text{Vcc}$.

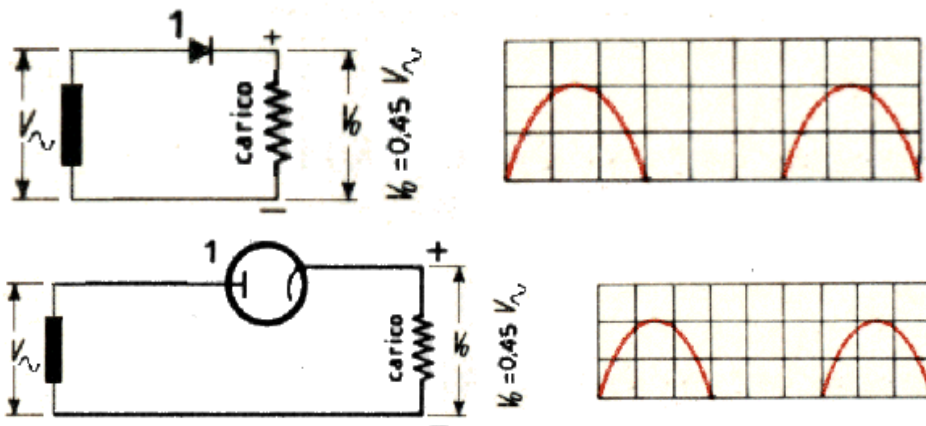
I circuiti raddrizzatori possono essere configurati in tre modi diversi:

- a Semionda
- a Doppia Semionda
- a Ponte di Graetz

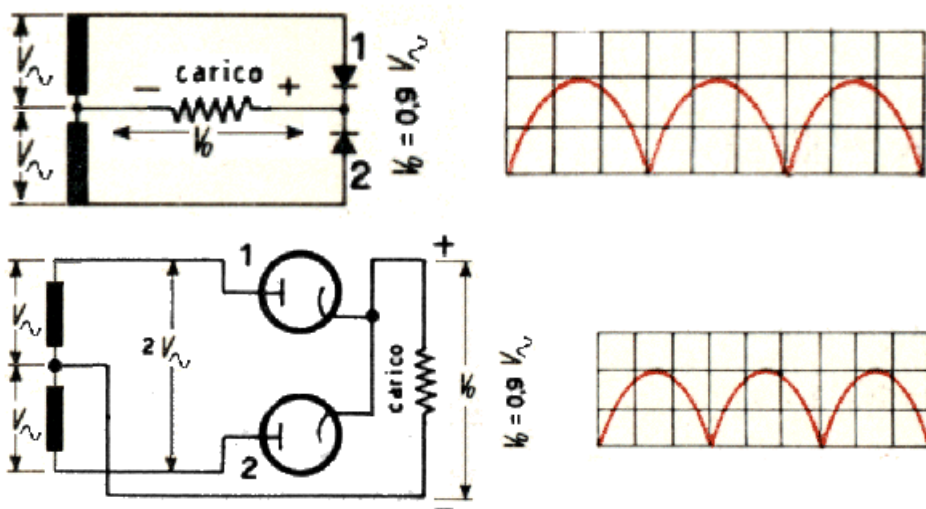
Analizziamo ogni singola configurazione utilizzando per comodità il tipo con diodo al silicio e quello con diodo a vuoto.

Da notare che applicando il filtro di livellamento costituito da uno o più condensatori collegati fra + e - si va ad aumentare la tensione di uscita notevolmente. Teoricamente la tensione raddrizzata si porta al valore di picco $V_o = V_{ac} \cdot \sqrt{2}$ ma praticamente considerando le cadute di tensione è meglio valutare la tensione continua raddrizzata e filtrata con un valore di circa $V_o = V_{ac} \cdot 1,37$ (con diodi al silicio)

Raddrizzatore Monofase a Semionda: Il diodo 1 permette il passaggio della sola semionda positiva (mezza onda). La tensione media di uscita V_o letta sul carico con un voltmetro c.c. in assenza di corrente, corrisponde a circa 0,45 del valore efficace della tensione alternata V . Questa configurazione è utilizzata solo per bassissime potenze con abbinato un opportuno filtro di livellamento.

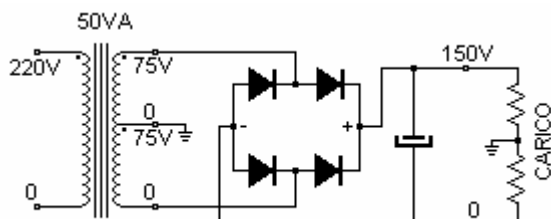


Raddrizzatore Monofase a Doppia Semionda: I diodi permettono il passaggio della semionda positiva e negativa (onda intera). Il diodo 1 permette il passaggio della sola semionda positiva, mentre il diodo 2 permette il passaggio della sola semionda negativa. La tensione media di uscita V_o letta sul carico con un voltmetro c.c. in assenza di corrente, corrisponde a circa 0,9 del valore efficace della tensione alternata V . Questa configurazione è la più utilizzata quando si dispone di un doppio avvolgimento sul trasformatore per utilizzare solo due diodi. Utilizzabile per qualsiasi potenza con abbinato un opportuno filtro di livellamento.



Premessa sul Raddrizzatore Monofase a Ponte di Graetz.

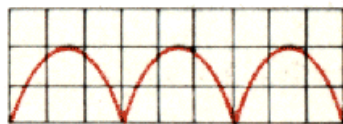
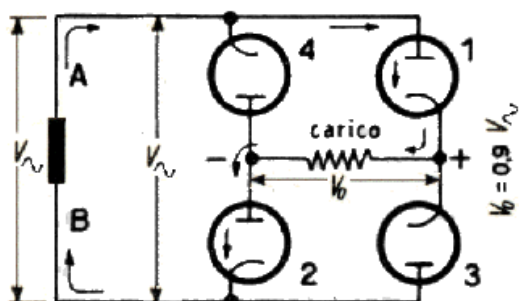
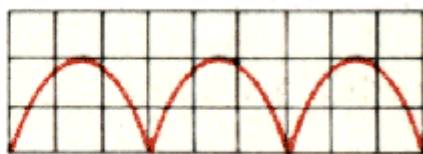
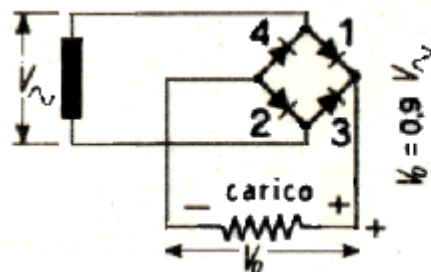
Questa configurazione è utilizzata quando si utilizza un raddrizzatore a Ponte di Graetz e necessita la presenza di un punto di riferimento centrale.



In uscita si ha 150V, che alimentano due carichi distinti identici sottoposti a 75V ciascuno.

Nel calcolo del trasformatore si considerano due avvolgimenti isolati da 75V 25VA, che alla fine vanno collegati in serie.

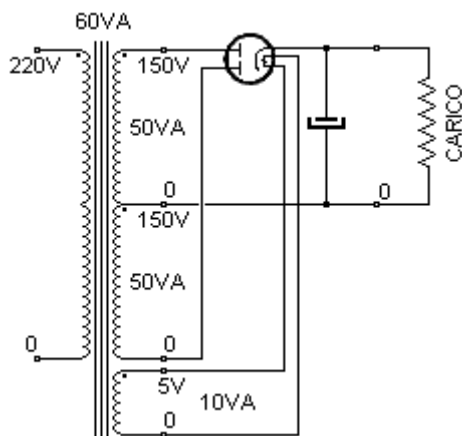
Raddrizzatore Monofase a Ponte di Graetz: I diodi permettono il passaggio della semionda positiva e negativa (onda intera). I diodi 1 e 2 permettono il passaggio della sola semionda positiva, mentre i diodi 3 e 4 permettono il passaggio della sola semionda negativa. La tensione media di uscita V_o letta sul carico con un voltmetro c.c. in assenza di corrente, corrisponde a circa 0,9 del valore efficace della tensione alternata V . Questa configurazione con diodi al silicio è la più utilizzata, mentre la configurazione con diodi a vuoto è poco utilizzata perché utilizza quattro diodi a vuoto che richiedono tre avvolgimenti dedicati per i filamenti delle valvole. Utilizzabile per qualsiasi potenza con abbinato un opportuno filtro di livellamento.



Premessa sul Raddrizzatore Monofase a Doppia Semionda a due Diodi.

Questa configurazione è la più utilizzata quando si utilizza un raddrizzatore a vuoto biplacca.

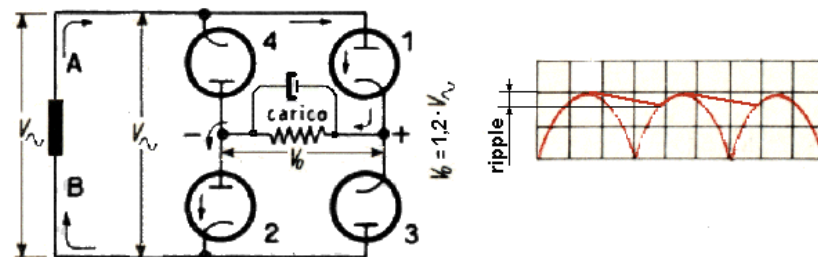
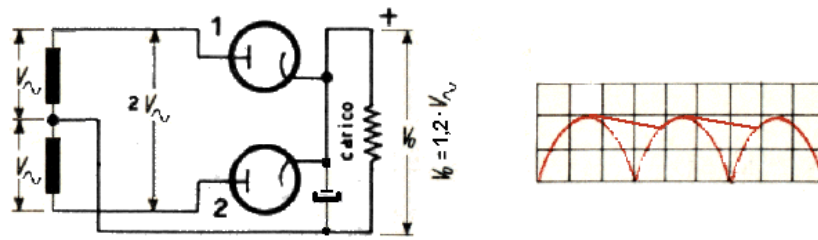
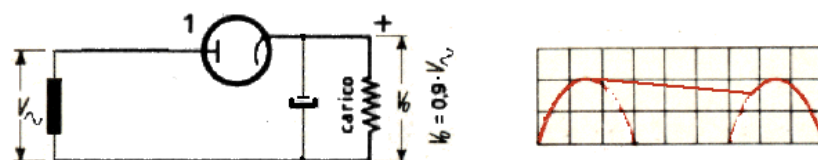
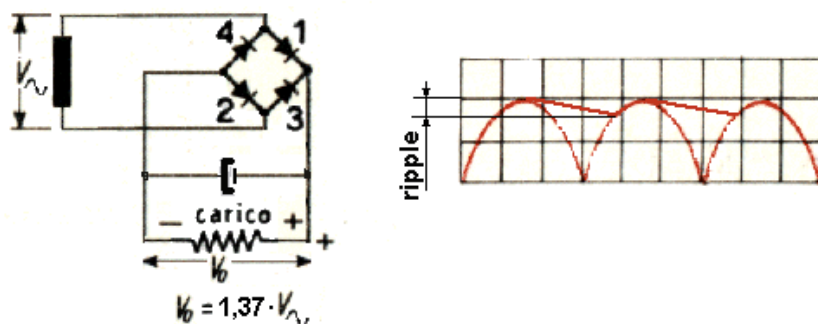
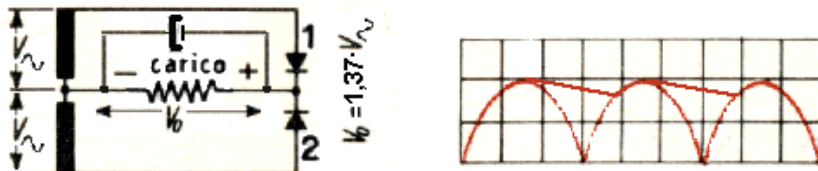
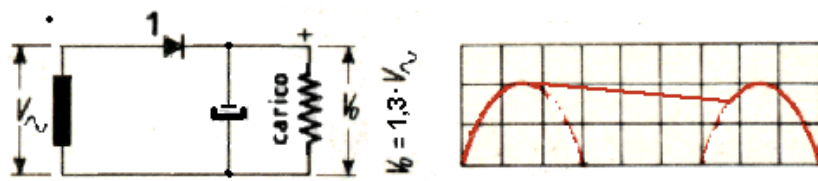
Da notare e tenere presente nel calcolo del trasformatore che il secondario che alimenta gli anodi deve essere calcolato doppio come numero di spire, con presa centrale 150V + 150V, ma sempre sulla base della potenza del singolo avvolgimento 50VA, e non come spesso accade 50+50=100VA.



Questo perché il raddrizzamento delle due semionde avviene alternativamente nei due tratti di avvolgimenti separati dalla presa centrale. Per meglio chiarire ogni avvolgimento 150V viene utilizzato a piena potenza 50VA solo per mezza semionda.

Nel calcolo del trasformatore si considera come se fosse un singolo avvolgimento da 150V 50VA, solo che dal lato pratico vanno avvolti due di questi avvolgimenti identici come numero di spire e sezione filo rame. Occorre perciò valutare bene l'ingombro avvolgimento che risulterà il doppio.

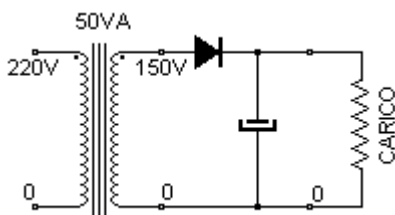
Raddrizzatore Monofase con Filtro di Livellamento: Inserendo a valle del raddrizzatore un filtro livellatore costituito da una cella Resistenza - Condensatore oppure Induttanza - Condensatore si riducono le ondulazioni sfruttando l'energia accumulata dal condensatore. Come si può intuire la tensione in uscita dopo il filtro sarà circa uguale al valore di cresta della semionda.



Il Ripple: rappresenta l'ondulazione residua che si viene a creare fra le due semionde che caricano il condensatore. Infatti in questo tratto è il condensatore che con la sua carica immagazzinata alimenta il carico scaricandosi. Di solito è tollerabile un ripple dal 2% al 5% del valore della tensione raddrizzata, ma comunque è bene che sia il minimo possibile.

Raddrizzatore monofase a Semionda, Esempio con Diodi al Silicio

Questa configurazione è utilizzata solo per bassissime potenze, praticamente quando serve dare un riferimento di tensione ad un circuito che assorbe correnti di circa 2 - 300mA.

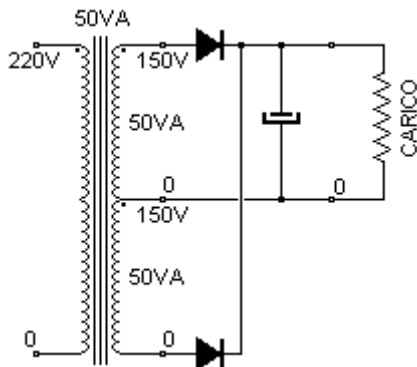


Potenza sul carico 50VA Potenza Trasformatore 50VA.
 Tensione alimentazione 220Vac.
 Tensione uscita 150Vac.
 Raddrizzatore, con un diodo al silicio tipo 1N4007.
 Filtro, un condensatore da 47μF.
 Tensione sul carico 195Vcc circa.

Corrente massima su carico:	$I = \frac{P}{V} \quad (A)$	$\frac{50}{150} = 0,333 \text{ A}$
Tensione continua sul carico:	$V_o = 1,3 \cdot V \quad (V)$	$1,3 \cdot 150 = 195 \text{ V} \text{ circa}$

Raddrizzatore monofase a Doppia Semionda, Esempio con Diodi al Silicio

Questa configurazione è la più utilizzata quando si dispone di un doppio avvolgimento sul trasformatore per utilizzare solo due diodi raddrizzatori.

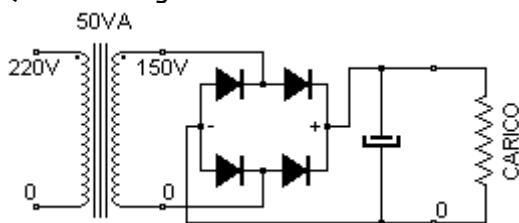


Potenza sul carico 50VA Potenza Trasformatore 50VA.
 Tensione alimentazione 220Vac.
 Tensione uscita 150Vac - 150Vac.
 Raddrizzatore, con due diodi al silicio tipo 1N4007.
 Filtro, un condensatore da 47μF.
 Tensione sul carico 205Vcc circa.

Corrente massima su carico:	$I = \frac{P}{V} \quad (A)$	$\frac{50}{150} = 0,333 \text{ A}$
Tensione continua sul carico:	$V_o = 1,37 \cdot V \quad (V)$	$1,37 \cdot 150 = 205 \text{ V} \text{ circa}$

Raddrizzatore monofase a Ponte di Graetz, Esempio con Diodi al Silicio

Questa configurazione indiscutibilmente la più comune e la più utilizzata.

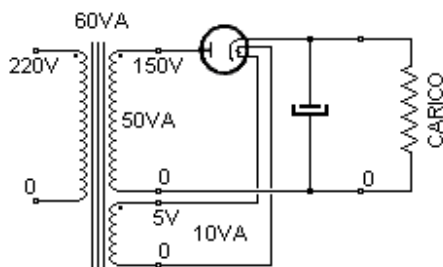


Potenza sul carico 50VA.
 Potenza Trasformatore 50VA
 Tensione alimentazione 220Vac.
 Tensione uscita 150Vac.
 Raddrizzatore, con 4 diodi al silicio tipo 1N4007.
 Filtro, un condensatore da 47μF.
 Tensione sul carico 205Vcc circa.

Corrente massima su carico:	$I = \frac{P}{V} \quad (A)$	$\frac{50}{150} = 0,333 \text{ A}$
Tensione continua sul carico:	$V_o = 1,37 \cdot V \quad (V)$	$1,37 \cdot 150 = 205 \text{ V} \text{ circa}$

Raddrizzatore monofase a Semionda, Esempio con Diodi a Vuoto

Questa configurazione è utilizzata solo per bassissime potenze, praticamente quando serve dare un riferimento di tensione ad un circuito che assorbe correnti di circa 2 - 100mA.



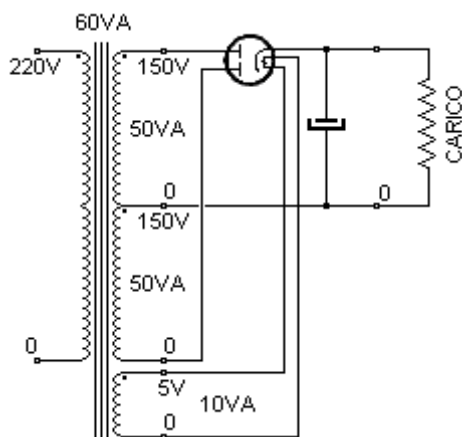
Potenza sul carico 50VA Potenza Trasformatore 60VA.
Tensione alimentazione 220Vac.
Tensione uscita 150Vac - 5Vac.
Raddrizzatore, con un diodo a vuoto.
Filtro, un condensatore da 47μF.
Tensione sul carico 135Vcc circa.

Corrente massima su carico: $I = \frac{P}{V} \quad (A)$ $\frac{50}{150} = 0,333 \text{ A}$

Tensione continua sul carico: $V_o = 0,9 \cdot V \quad (V)$ $1,3 \cdot 150 = 135 \text{ V}$ circa

Raddrizzatore monofase a Doppia Semionda, Esempio con Diodi a Vuoto

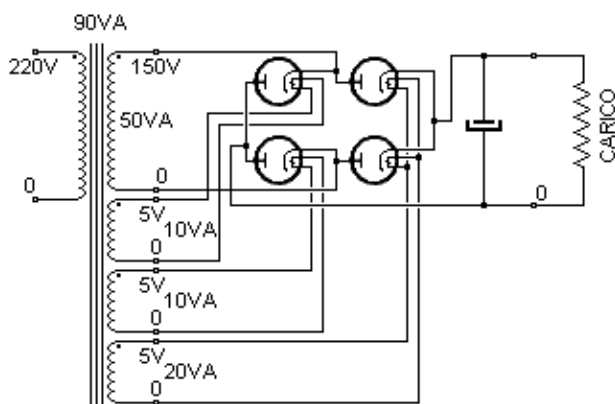
Questa configurazione è la più utilizzata quando si dispone di un doppio avvolgimento sul trasformatore per utilizzare solo due diodi raddrizzatori di solito contenuti all'interno della stessa valvola raddrizzatrice.



Potenza sul carico 50VA Potenza Trasformatore 60VA.
Tensione alimentazione 220Vac.
Tensione uscita 150Vac - 150Vac - 5Vac.
Raddrizzatore, con due diodi a vuoto.
Filtro, un condensatore da 47μF.
Tensione sul carico 180Vcc circa.

Corrente massima su carico: $I = \frac{P}{V} \quad (A)$ $\frac{50}{150} = 0,333 \text{ A}$

Tensione continua sul carico: $V_o = 1,2 \cdot V \quad (V)$ $1,2 \cdot 150 = 180 \text{ V}$ circa

Raddrizzatore monofase a Ponte di Graetz, Esempio con Diodi a Vuoto

Questa configurazione è scarsamente utilizzata perché richiede un trasformatore di potenza maggiore e tre avvolgimenti dedicati solo per i filamenti delle valvole raddrizzatrici.

Potenza sul carico 50VA.
Potenza Trasformatore 90VA
Tensione alimentazione 220Vac.
Tensione uscita 150Vac - 5Vac - 5Vac - 5Vac.
Raddrizzatore, con 4 diodi a vuoto.
Filtro, un condensatore da 47μF.
Tensione sul carico 180Vcc circa.

Corrente massima su carico: $I = \frac{P}{V} \quad (A)$ $\frac{50}{150} = 0,333 \text{ A}$

Tensione continua sul carico: $V_o = 1,2 \cdot V \quad (V)$ $1,2 \cdot 150 = 180 \text{ V}$ circa

Dimensionamento di un Trasformatore Monofase

Il dimensionamento di una qualsiasi macchina elettrica richiede non solo una profonda conoscenza di tutti i problemi ad essa connessi, ma anche notevole esperienza. Quest'ultima si acquisisce dopo una lunga pratica di ufficio tecnico ed in particolare da un costante esame critico delle costruzioni precedenti. E' per questo motivo che ogni azienda conserva accuratamente tutti i dati relativi alle proprie costruzioni e che giustamente considera come inestimabile patrimonio di una attività svolta in un lungo arco di tempo. In questa descrizione ci si limita a fornire qualche indicazione sul dimensionamento dei trasformatori di piccola potenza, monofasi e trifasi in aria, al fine di inquadrare il problema nei suoi termini generali.

Elementi da prefissare

Conoscendo i seguenti dati di partenza è possibile calcolare un trasformatore in aria:

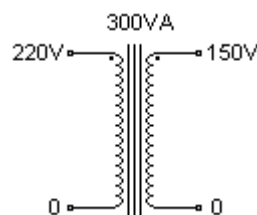
$P_2 = 300$ potenza al secondario in voltampere VA.

$f = 50$ frequenza alla quale dovrà funzionare il trasformatore in Hz.

$V_1 = 220$ tensione alimentazione dell'avvolgimento primario in V.

$V_2 = 150$ tensione che dovrà fornire l'avvolgimento secondario a pieno carico in V.

$B = 1$ Induzione Magnetica in Wb/m² alla quale si vuole far funzionare il trasformatore.



Formato Lamierino

Tramite questa formula pratica si può trovare la superficie totale del Lamierino più adatto:

$$A \times B = 80 \cdot \sqrt{\frac{P_2}{B \cdot f}} \quad (cm^2) \qquad A \times B = 80 \cdot \sqrt{\frac{300}{1 \cdot 50}} = 195,9 cm^2$$

Dal valore di $A \times B$ ottenuto, utilizzando le formule specifiche del lamierino da noi scelto (vedi tabelle lamierini) si ricava la misura della colonna centrale C , di seguito tutte le altre quote del lamierino.

Dalla Tabella Lamierini scelgo questo lamierino con le seguenti misure:

$A \times B (cm^2)$	$A (mm)$	$B (mm)$	$C (mm)$	$D (mm)$	$E (mm)$	$F (mm)$	$G (mm)$	Tipo	$Gf (Kg/1cm)$
187,5	125	150	50	25	75	25	25	EI150	1,149

Sezione del Nucleo

Il valore della Sezione Nucleo Ferromagnetico si calcola in funzione del coefficiente di dimensionamento K_d e della potenza secondaria.

$$S_{fe} = K_d \cdot \sqrt{P_2} \quad (cm^2) \qquad S_{fe} = 1,3 \cdot \sqrt{300} = 22,5 cm^2$$

Dalla Sezione del Nucleo Ferromagnetico e dalla dimensione C del lamierino si ricava lo Spessore del pacco di lamierini, tenendo in considerazione anche il coefficiente di stipamento lamierini K_s .

$$S_p = \frac{S_{fe}}{C} \cdot K_s \quad (cm) \qquad S_p = \frac{22,5}{5} \cdot 1,11 = 5 cm$$

Conoscendo le misure del lamierino e dello spessore pacco è necessario trovare un rocchetto di idonee dimensioni. Da un catalogo scelgo un rocchetto in plastica con le seguenti misure:

$Cr=51mm$	$Spr=51mm$	$M=23mm$	$H=72mm$
-----------	------------	----------	----------

Lo spazio disponibile che offre questo rocchetto per ospitare gli avvolgimenti è dato da:

$$S_{disp} = H \cdot M \quad (mm^2) \qquad S_{disp} = 72 \cdot 23 = 1656 mm^2$$

Scelto il tipo di lamierino, scelto lo spessore del nucleo ferromagnetico scelto il rocchetto adatto alle nostre esigenze, è opportuno aggiornare i calcoli:

$$S_{fe} = \frac{Sp \cdot C}{K_s} \quad (cm^2)$$

$$S_{fe} = \frac{5 \cdot 5}{1,11} = 22,5 \text{ cm}^2$$

Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro

Conoscendo lo spessore del singolo lamierino $sl=0,5mm$, e lo spessore del pacco lamellare Sp :

$$N_L = \frac{Sp}{K_s \cdot sl} \quad (\text{lamierini})$$

$$N_L = \frac{5}{1,11 \cdot 0,05} = 90 \text{ lamierini}$$

Considerando il peso di un centimetro di spessore di pacco lamellare Gf calcolo il peso totale del pacco lamellare:

$$Gl = Gf \cdot Sp \quad (Kg)$$

$$Gl = 1,149 \cdot 5 = 5,745 \text{ Kg}$$

Conoscendo la cifra di perdita specifica del lamierino $ws=3W/Kg$ si possono valutare le perdite nel ferro pf del nucleo ferromagnetico:

$$pf = B^2 \cdot ws \cdot Gl \quad (\text{watt})$$

$$pf = 1^2 \cdot 3 \cdot 5,743 = 17,23 \text{ watt}$$

Numero Spire

La valutazione del numero delle spire dell'avvolgimento primario e secondario si effettua in relazione ai volt per spira:

$$e = 4,44 \cdot f \cdot S_{fe} \cdot B \cdot 10^{-4} \quad (V)$$

$$e = 4,44 \cdot 50 \cdot 22,5 \cdot 1 \cdot 10^{-4} = 0,4995V$$

Al secondario si verifica una caduta di tensione % in relazione alla potenza del trasformatore:

$$v\% = \frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{P_2}{2} + 2,72 \right) \right)^{1,35}} \quad (\%)$$

$$\frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{300}{2} + 2,72 \right) \right)^{1,35}} = 4,5 \quad (\%)$$

Si può pertanto scrivere la relazione relativa alla tensione secondaria a vuoto:

$$V_{20} = \left(1 + \frac{v\%}{100} \right) \cdot V_2 \quad (V)$$

$$V_{20} = \left(1 + \frac{4,5}{100} \right) \cdot 150 = 156,8V$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento primario:

$$N_1 = \frac{V_1}{e} \quad (\text{spire})$$

$$N_1 = \frac{220}{0,4995} = 440 \text{ spire}$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento secondario, considerando la tensione secondaria a vuoto:

$$N_2 = \frac{V_{20}}{e} \quad (\text{spire})$$

$$N_2 = \frac{156,8}{0,4995} = 314 \text{ spire}$$

Corrente primario e secondario

Il trasformatore in relazione alla potenza assume un certo valore indicativo di rendimento:

$$\eta = 60 + \left(\frac{\log_e (P_2 + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (P_2 + 1000)} \right) \quad (\%)$$

$$60 + \left(\frac{\log_e (300 + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (300 + 1000)} \right) = 89,3 \quad (\%)$$

Calcolo la corrente assorbita dal primario

$$I_1 = \frac{P_2}{\eta \cdot V_1} \quad (A)$$

$$I_1 = \frac{300}{0,893 \cdot 220} = 1,527 \text{ A}$$

Calcolo la massima corrente che può fornire il secondario

$$I_2 = \frac{P_2}{V_2} \quad (A)$$

$$I_2 = \frac{300}{150} = 2 \text{ A}$$

Diametro dei Conduttori

Dalla corrente e dalla densità di corrente si trova il diametro del filo di rame nudo, poi dalla tabella filo rame si sceglie il valore più prossimo.

$$\phi_r = 2 \cdot \sqrt{\frac{I}{J \cdot \pi}} \quad (mm) \quad \phi_{r1} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1,527}{2,5 \cdot \pi}} = 0,88 \quad (mm) \quad \phi_{r2} = 2 \cdot \sqrt{\frac{2}{2,5 \cdot \pi}} = 1 \quad (mm)$$

Dalla tabella Filo Rame scelgo questi fili con le seguenti misure:

Diametro Filo Nudo ϕ_N (mm)	Diametro Filo Isolato ϕ_I (mm)	Sezione filo rame nudo S_f (mm ²)	n° di Spire in 1 cm di spazio N_{spcm}	Coefficien. di Riempimento K_f	Resistenza di 1m di filo R_f (Ω)	Peso di 1m di filo di rame P_f (gr/m)
0,8	0,87	0,5027	10,33	1,11	0,0350	4,4736
1	1,08	0,7854	8,33	1,11	0,0224	6,9900

Lunghezza Filo Avvolgimento e Peso del Rame

La lunghezza della spira media attorno al rocchetto è:

$$l_{spm} = 2 \cdot (Cr + M) + 2 \cdot (Spr + M) \quad (mm) \quad l_{spm} = 2 \cdot (51 + 23) + 2 \cdot (51 + 23) = 296 \quad mm$$

La lunghezza totale del filo dell'avvolgimento in relazione al numero di spire:

$$l_{avv} = l_{spm} \cdot N \cdot 10^{-3} \quad (m) \quad l_{avv1} = 296 \cdot 440 \cdot 10^{-3} = 130 \quad m$$

$$l_{avv2} = 296 \cdot 314 \cdot 10^{-3} = 93 \quad m$$

Considerando il peso di un metro di filo di rame P_f calcolo il peso rame totale degli avvolgimenti:

$$Gr = P_f \cdot l_{avv} \cdot 10^{-3} \quad (Kg) \quad Gr_1 = 4,4736 \cdot 130 \cdot 10^{-3} = 0,5815 \quad Kg$$

$$Gr_2 = 6,990 \cdot 93 \cdot 10^{-3} = 0,650 \quad Kg$$

Resistenza degli avvolgimenti

Considerando la resistenza di un metro di filo di rame R_f calcolo la resistenza totale degli avvolgimenti:

$$R = R_f \cdot l_{avv} \quad (\Omega) \quad R_1 = 0,0350 \cdot 130 = 4,55 \quad \Omega \quad R_2 = 0,0224 \cdot 93 = 2,08 \quad \Omega$$

Perdite nel Rame

Determiniamo il nuovo valore di densità di corrente in relazione al filo utilizzato, poi conoscendo il peso del rame avvolgimento calcoliamo la potenza persa nel rame.

$$J = \frac{A}{S_f} \quad (A/mm^2) \quad J_1 = \frac{1,527}{0,5027} = 3 \quad A/mm^2 \quad J_2 = \frac{2}{0,7854} = 2,5 \quad A/mm^2$$

In relazione ai conduttori scelti la densità di corrente rientra nei limiti stabiliti, per cui si procede con il calcolo della potenza persa nel rame:

$$pr = 2,4 \cdot J^2 \cdot Gr \quad (watt) \quad pr_1 = 2,4 \cdot 3^2 \cdot 0,581 = 12,5 \quad watt$$

$$pr_2 = 2,4 \cdot 2,5^2 \cdot 0,65 = 9,7 \quad watt$$

Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento

La tabella filo rame fornisce anche il numero delle spire che possono essere contenute assialmente in un centimetro N_{spcm} .

In base all'altezza H della finestra del rocchetto si può stabilire quante spire stanno in uno strato:

$$S_{Str} = H \cdot N_{spcm} \quad (spire \cdot strato) \quad S_{Str1} = 7,2 \cdot 10,33 = 74,3 \quad spire \cdot strato$$

$$S_{Str2} = 7,2 \cdot 8,33 = 59,9 \quad spire \cdot strato$$

Considerando le spire totali si possono calcolare anche il numero degli strati necessari

$$N_{Str} = \frac{N}{S_{Str}} \quad (strati) \quad N_{Str1} = \frac{440}{74,3} = 5,92 \quad strati \quad N_{Str2} = \frac{314}{59,9} = 5,2 \quad strati$$

Controllo Ingombri

Calcoliamo l'Ingombro Rame considerando il diametro filo rame isolato come se fosse di sezione quadrata in modo da tenere conto anche degli spazi d'aria fra spira e spira, che moltiplichiamo per il numero di spire e per il coefficiente di riempimento K_f che tiene conto di una certa tolleranza nell'esecuzione dell'avvolgimento.

$$Ing_R = \phi_l^2 \cdot N \cdot K_f \quad (mm^2)$$

$$Ing_{R1} = 0,87^2 \cdot 440 \cdot 1,11 = 370 mm^2$$

$$Ing_{R2} = 1,08^2 \cdot 314 \cdot 1,11 = 406 mm^2$$

Totale Ingombro Rame

$$Ing_{Rtot} = \Sigma Ing_{Rx} \quad (mm^2)$$

$$Ing_{Rtot} = 370 + 406 = 776 mm^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Strati. Supponendo di interporre fra ogni strato di spire un cartoncino isolante di spessore $I_{st}=0,2mm$,

$$Ing_{IST} = I_{ST} \cdot H \cdot \text{int}(N_{Str}) \quad (mm^2)$$

$$Ing_{IST1} = 0,2 \cdot 72 \cdot (5) = 72 mm^2$$

$$Ing_{IST2} = 0,2 \cdot 72 \cdot (5) = 72 mm^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Strati:

$$Ing_{ISTtot} = \Sigma Ing_{ISTx} \quad (mm^2)$$

$$Ing_{ISTtot} = 72 + 72 = 144 mm^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti. Terminata la costruzione alla fine di tutti gli avvolgimenti e fra un avvolgimento e l'altro supponiamo di inserire un cartoncino isolante di spessore $I_{av}=0,5mm$.

$$Ing_{IAV} = I_{AV} \cdot H \quad (mm^2)$$

$$Ing_{IAV} = 0,5 \cdot 72 = 36 mm^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti:

Essendo $n^\circ Avv$ il numero di avvolgimenti primari e secondari che compongono il trasformatore.

$$Ing_{IAVtot} = Ing_{IAV} \cdot n^\circ Avv \quad (mm^2)$$

$$Ing_{IAVtot} = 36 \cdot 2 = 72 mm^2$$

Calcoliamo l'ingombro totale maggiorandolo di un coefficiente di ingombro percentuale $K_i=10\%$ che tiene conto delle imperfezioni nella realizzazione dell'avvolgimento e degli eventuali spazi d'aria.

$$Ing_{TOT} = Ing_{Rtot} + Ing_{ISTtot} + Ing_{IAVtot} \cdot \left(1 + \frac{K_i\%}{100}\right) \quad (mm^2)$$

$$Ing_{TOT} = 776 + 144 + 72 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) = 1091 mm^2$$

Il valore dell' ingombro totale è minore dello spazio offerto dal rocchetto, quindi gli avvolgimenti saranno contenuti nel rocchetto comodamente.

Verifica controllo, rendimento e caduta di tensione

Verifica del Rendimento % considerando le eventuali perdite calcolate:

$$\eta\% = \frac{P}{P + pf + pr} \cdot 100 \quad (\%)$$

$$\eta = \frac{300}{300 + 17,23 + 12,5 + 9,7} \cdot 100 = 88\%$$

Calcolo della caduta di tensione secondaria considerando le eventuali perdite calcolate:

$$v_2 = \frac{pr_1 \cdot N_2}{I_1 \cdot N_1} + \frac{pr_2}{I_2} \quad (V)$$

$$v_2 = \frac{12,5 \cdot 314}{1,527 \cdot 440} + \frac{9,7}{2} = 10,7 V$$

Calcolo della tensione secondaria a carico:

$$V_c = V_{20} - v_2 \quad (V)$$

$$V_c = 156,8 - 10,7 = 146 V$$

Verifica della Caduta di Tensione %:

$$v\% = \frac{V_2 - V_C}{V_C} \cdot 100 \quad (\%)$$

$$v\% = \frac{150 - 146}{146} \cdot 100 = 2,7\%$$

Concludendo possiamo dire che il rendimento e la caduta di tensione % si discostano di poco rispetto ai valori calcolati in precedenza.

Comunque lo scopo di queste ultime verifiche è quello di capire se il dimensionamento del trasformatore è corretto, ed eventualmente se ne è il caso, correggere alcuni parametri in modo da rientrare con un rendimento e una c.d.t.% pressappoco nei valori previsti.

Dimensionamento di un AutoTrasformatore Monofase

Sono trasformatori nei quali primario e secondario sono riuniti in un solo avvolgimento, del quale una parte rimane comune al primario ed al secondario. La porzione di avvolgimento che appartiene soltanto al primario (o soltanto al secondario) é denominata parte serie (N_s), mentre quella in comune si dice parte derivazione (N_d). L'autotrasformatore può essere abbassatore o elevatore a differenza se dalla tensione di alimentazione presa come riferimento si ricava in uscita una tensione più bassa o più alta. Possiamo anche affermare che l'autotrasformatore è un trasformatore realizzato da un unico avvolgimento che si può considerare come la risultante della sovrapposizione dell'avvolgimento primario all'avvolgimento secondario.

Per gli autotrasformatori si considerano due potenze:

- Potenza passante P_2 Questa potenza riguarda l'impiego dell'autotrasformatore rappresenta la potenza nominale dell'autotrasformatore. Tale potenza è data come per i trasformatori dal prodotto della tensione per la corrente.
- Potenza propria P_p Questa potenza riguarda il costruttore ed è in base a tale potenza che si dimensiona il nucleo ferromagnetico del trasformatore. Rappresenta la potenza che avrebbe un trasformatore ad avvolgimenti separati avente uguali dimensioni dell'autotrasformatore. Tale potenza è data dal prodotto della potenza passante per il fattore di riduzione

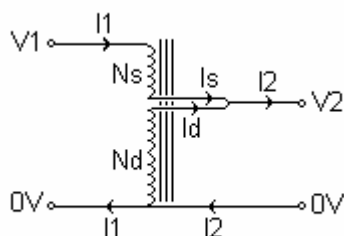
Fattore di Riduzione K_r

Il rapporto che c'è fra la potenza passante P_2 e la potenza propria P_p definisce il "fattore di riduzione" (K_r), il quale rappresenta la dimensione che avrà l'autotrasformatore.

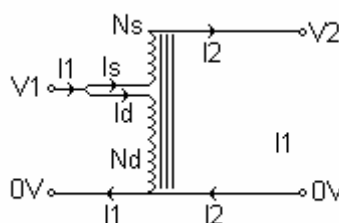
Il "fattore di riduzione" é un numero compreso da 0 a 1, questo dipende dalla differenza fra le due tensioni, quella primaria e quella secondaria a vuoto e viceversa dipende se l'autotrasformatore è abbassatore o elevatore. Se i valori delle due tensioni sono assai prossimi fra loro K_r assumerà un valore prossimo a zero. Ne consegue che tanto più piccolo è il fattore di riduzione tanto più alta sarà la potenza passante P_2 rispetto alla potenza propria P_p .

E' chiaro che se la differenza fra le tensioni è minima si otterrà un K_r basso e di conseguenza una potenza propria P_p molto bassa dalla quale si ricava un nucleo ferromagnetico piccolissimo fatto di lamierini inesistenti e con avvolgimenti che non potranno essere contenuti all'interno delle finestre lamierino. Quindi materialmente e praticamente irrealizzabile.

Di norma autotrasformatori con potenza propria P_p inferiore ai 10VA non si realizzano. Come non conviene realizzare autotrasformatori quando il rapporto fra le tensioni di ingresso V_1 e di uscita V_2 è superiore a tre.



Autotrasformatore Abbassatore



Autotrasformatore Elevatore

Le correnti che interessano il calcolo dell'autotrasformatore sono la corrente che attraversa la sola parte di avvolgimento in serie I_s e la corrente che circolerà nel tratto di avvolgimento che rimane in comune al primario e secondario definita corrente di derivazione I_d che è data dalla differenza fra la corrente maggiore meno la corrente minore.

- Nel caso di Autotrasformatore Abbassatore:
La corrente in serie I_s corrisponde alla corrente del primario I_1 .
La tensione dell'avvolgimento N_s sarà $V_s = V_1 - V_2$.
La corrente di derivazione è uguale alla differenza fra le correnti $I_d = I_2 - I_1$.
La tensione dell'avvolgimento N_d sarà uguale alla V_2 .
- Nel caso di Autotrasformatore Elevatore:
La corrente in serie I_s corrisponde alla corrente del secondario I_2 .
La tensione dell'avvolgimento N_s sarà uguale alla V_2 .
La corrente di derivazione è uguale alla differenza fra le correnti $I_d = I_1 - I_2$.
La tensione dell'avvolgimento N_d sarà $V_d = V_2 - V_1$.

Il numero spire degli avvolgimenti che interessano il calcolo dell'autotrasformatore sono l'avvolgimento che appartiene solo al primario (o secondario se elevatore) che viene denominata l'avvolgimento serie N_s e l'avvolgimento che rimane in comune sia al primario che al secondario è definito avvolgimento di derivazione N_d .

- Nel caso di Autotrasformatore Abbassatore:
L'avvolgimento in serie sarà composto da $N_s = N_1 - N_2$ spire
L'avvolgimento di derivazione sarà composto da $N_d = N_2$ spire
- Nel caso di Autotrasformatore Elevatore:
L'avvolgimento in serie sarà composto da $N_s = N_2 - N_1$ spire
L'avvolgimento di derivazione sarà composto da $N_d = N_1$ spire

Ricordiamo che trascurando le perdite le amperspire dell'avvolgimento primario sono sempre uguali alle amperspire dell'avvolgimento secondario, sapendo che $Asp = N \cdot I$ per cui:

nel globale si può scrivere che $N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2$ (Asp).

ma anche per le singole parti di avvolgimento si può scrivere che $N_s \cdot I_s = N_d \cdot I_d$ (Asp).

Considerazioni teoriche sull'Autotrasformatore

Per capire meglio l'autotrasformatore facciamo un esempio pratico (trascurando le eventuali perdite) in cui mettiamo in evidenza i principi basilari da tenere in considerazione per la costruzione di un autotrasformatore.

Progettiamo un Autotrasformatore abbassatore 160V / 120V 300VA.

La corrente assorbita dalla linea e la corrente secondaria risultano:

$$I = \frac{P}{V} \quad I_1 = \frac{300}{160} = 1,875 \text{ A} \quad I_2 = \frac{300}{120} = 2,5 \text{ A}$$

Verifichiamo che la potenza assorbita dalla linea deve essere uguale alla potenza resa al secondario, la quale rappresenta la Potenza Passante P_2 :

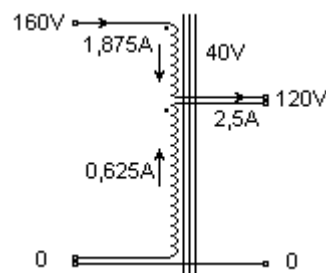
$$V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2 \quad 160 \cdot 1,875 = 120 \cdot 2,5 = 300 \text{ VA}$$

La potenza nell'avvolgimento serie N_s deve essere uguale alla potenza nell'avvolgimento in derivazione N_d , la quale rappresenta la potenza interna dell'autotrasformatore detta Potenza Propria P_p :

$$(V_1 - V_2) \cdot I_1 = V_2 \cdot (I_2 - I_1) \quad 40 \cdot 1,875 = 120 \cdot 0,625 = 75 \text{ VA}$$

Il rapporto fra le tensioni ci fornisce il Coefficiente di Riduzione K_r dal quale si ricava la Potenza Propria dell'autotrasformatore:

$$K_r = \frac{V_H - V_L}{V_H} \quad \frac{160 - 120}{160} = 0,25$$



$$P_p = K_r \cdot P_2 \quad 0,25 \cdot 300 = 75VA$$

Si può affermare che l'autotrasformatore da 300VA con rapporto 160V/120V equivale ad un trasformatore della potenza di 75VA con rapporto 120V/40V con gli avvolgimenti collegati in serie.

Di solito l'autotrasformatore si definisce in base alla sua potenza passante P_2 e non in base alla potenza propria P_p . Infatti la Potenza Propria P_p riguarda solo il costruttore e sarebbe complessa da definire quando l'autotrasformatore avesse più prese (come descritto nel capitolo successivo).

Tramite questa formula pratica si può trovare la superficie totale del lamierino più adatto:

$$A \times B = 80 \cdot \sqrt{\frac{P_p}{B \cdot f}} \quad (cm^2) \quad A \times B = 80 \cdot \sqrt{\frac{75}{1 \cdot 50}} = 97,98 cm^2$$

Dal valore di $A \times B$ ottenuto, utilizzando le formule specifiche del lamierino da noi scelto (vedi tabelle lamierini) si ricava la misura della colonna centrale C , di seguito tutte le altre quote del lamierino.

Dalla Tabella Lamierini scelgo questo lamierino con le seguenti misure:

AxB(cm ²)	A(mm)	B(mm)	C(mm)	D(mm)	E(mm)	F(mm)	G(mm)	Tipo	Gf(Kg/1cm)
97,2	90	108	36	18	54	18	18	EI108	0,595

Il valore della Sezione Nucleo Ferromagnetico si calcola in funzione del coefficiente di dimensionamento K_d e della potenza propria.

$$S_{fe} = K_d \cdot \sqrt{P_p} \quad (cm^2) \quad S_{fe} = 1,3 \cdot \sqrt{75} = 11,258 cm^2$$

Dalla Sezione del Nucleo Ferromagnetico e dalla dimensione C del lamierino si ricava lo Spessore del pacco di lamierini, tenendo in considerazione anche il coefficiente di stipamento lamierini K_s .

$$S_p = \frac{S_{fe}}{C} \cdot K_s \quad (cm) \quad S_p = \frac{11,258}{3,6} \cdot 1,11 = 3,47 cm$$

Conoscendo le misure del lamierino e dello spessore pacco è necessario trovare un rocchetto di idonee dimensioni. Da un catalogo scelgo un rocchetto in plastica con le seguenti misure:

Cr=37mm	Spr=37mm	M=16mm	H=51mm
---------	----------	--------	--------

Scelto il tipo di lamierino, scelto lo spessore del nucleo ferromagnetico scelto il rocchetto adatto alle nostre esigenze, è opportuno aggiornare i calcoli:

$$S_{fe} = \frac{S_p \cdot C}{K_s} \quad (cm^2) \quad S_{fe} = \frac{3,6 \cdot 3,6}{1,11} = 11,67 cm^2$$

La valutazione del numero delle spire dell'avvolgimento primario e secondario si effettua in relazione ai volt per spira:

$$e = 4,44 \cdot f \cdot S_{fe} \cdot B \cdot 10^{-4} \quad (V) \quad e = 4,44 \cdot 50 \cdot 11,67 \cdot 1 \cdot 10^{-4} = 0,259 V$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento primario

$$N_1 = \frac{V_1}{e} \quad (spire) \quad N_1 = \frac{160}{0,259} = 618 spire$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento secondario, considerando la tensione secondaria a vuoto

$$N_2 = \frac{V_{20}}{e} \quad (spire) \quad N_2 = \frac{120}{0,259} = 463 spire$$

Essendo un Autotrasformatore Abbassatore calcoliamo N_s e N_d :

$$N_s = N_1 - N_2 \quad N_s = 618 - 463 = 155 spire$$

$$N_d = N_2 \quad N_d = 463 spire$$

Verifica che il valore degli Amperspira primario agli Amperspira secondario:

$$N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2 \quad (Asp) \quad 618 \cdot 1,875 = 463 \cdot 2,5 = 1158 Asp$$

Verifica che il valore degli Amperspira sia uguale in tutti gli avvolgimenti:

$$N_s \cdot I_s = N_d \cdot I_d \quad (Asp) \quad 155 \cdot 1,875 = 463 \cdot 0,625 = 290 Asp$$

Considerazioni teoriche sull'Autotrasformatore Multipresa

Analizziamo ora un autotrasformatore con più rapporti di tensione. Per capire meglio questo tipo di autotrasformatore facciamo un esempio pratico (trascurando le eventuali perdite) in cui mettiamo in evidenza i principi basilari da tenere in considerazione per la sua costruzione.

Progettiamo un Autotrasformatore abbassatore / elevatore con tensione di alimentazione 160V e due prese secondarie di 220V e 120V, ambedue in grado di erogare, non simultaneamente, una potenza di 400VA.

Le due prese secondarie dividono l'intero avvolgimento in tre parti che chiameremo A B C. Questo autotrasformatore presenta due funzionamenti possibili:

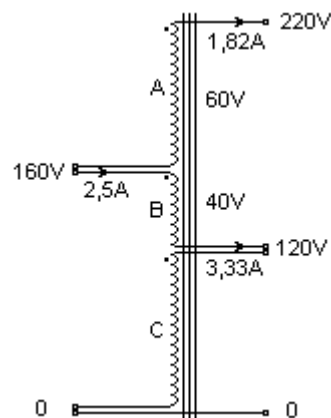
I°, alimentato dalla presa 160V fornisce energia dal secondario 220V;

II°, alimentato dalla presa 160V fornisce energia dal secondario 120V.

Nei due funzionamenti i valori delle correnti massime di ogni parte di avvolgimento A B C moltiplicati per le rispettive tensioni parziali ci danno tre valori di potenza P_A P_B e P_C la cui semisomma corrisponderà alla potenza propria P_p in base alla quale viene dimensionato l'autotrasformatore.

Per il calcolo delle sezioni dei conduttori con cui realizzare gli avvolgimenti A B C che compongono tutto l'autotrasformatore è opportuno preparare una tabella delle correnti considerando i diversi funzionamenti uno alla volta. I valori massimi di corrente per ogni singolo avvolgimento servono a determinare la sezione più opportuna del conduttore di rame smaltato da utilizzare.

Consideriamo separatamente i due funzionamenti possibili, trascurando per semplicità le eventuali perdite, analizziamo



I° funzionamento, 160V / 220V 400VA;

Il rapporto fra le tensioni ci fornisce il Coefficiente di Riduzione K_r dal quale si ricava la Potenza Propria dell'autotrasformatore:

$$K_r = \frac{V_H - V_L}{V_H} \quad \frac{220 - 160}{220} = 0,2727$$

$$P_p = K_r \cdot P_2 \quad 0,2727 \cdot 400 = 109 \text{ VA}$$

La corrente assorbita dalla linea e la corrente secondaria risultano:

$$I = \frac{P}{V} \quad I_1 = \frac{400}{160} = 2,5 \text{ A} \quad I_2 = \frac{400}{220} = 1,82 \text{ A}$$

La parte di avvolgimento A (avvolgimento serie) è attraversato da una corrente di 1,82A e sottoposto a una tensione di 60V.

La parte di avvolgimento B (avvolgimento in derivazione) è attraversato da una corrente di $2,5 - 1,82 = 0,68 \text{ A}$ e sottoposto a una tensione di 40V.

La parte di avvolgimento C (avvolgimento in derivazione) è attraversato da una corrente di $2,5 - 1,82 = 0,68 \text{ A}$ e sottoposto a una tensione di 120V.

In questo funzionamento la presa 120V non è utilizzata, quindi ipotizziamo che non esista e che l'avvolgimento B e C siano un unico avvolgimento.

Bisogna anche verificare che la potenza propria P_p :

$$P_p = P_A = (P_B + P_C) \quad 1,82 \cdot 60 = (0,68 \cdot 40 + 0,68 \cdot 120) = 109 \text{ VA}$$

II° funzionamento, 160V / 120V 400VA;

Il rapporto fra le tensioni ci fornisce il Coefficiente di Riduzione K_r dal quale si ricava la Potenza Propria dell'autotrasformatore:

$$K_r = \frac{V_H - V_L}{V_H} \quad \frac{160 - 120}{160} = 0,25$$

$$P_p = K_r \cdot P_1 \quad 0,25 \cdot 400 = 100 \text{ VA}$$

La corrente assorbita dalla linea e la corrente secondaria risultano:

$$I = \frac{P}{V} \quad I_1 = \frac{400}{160} = 2,5 \text{ A} \quad I_3 = \frac{400}{120} = 3,33 \text{ A}$$

La parte di avvolgimento A non è utilizzato (presa 220V), quindi ipotizziamo che non esista.

La parte di avvolgimento B (avvolgimento serie) è attraversato da una corrente di 2,5A e sottoposto a una tensione di 40V.

La parte di avvolgimento C (avvolgimento in derivazione) è attraversato da una corrente di $3,33 - 2,5 = 0,83 \text{ A}$ e sottoposto a una tensione di 120V.

Bisogna anche verificare che la potenza propria Pp:

$$P_p = P_B = P_C \quad 2,5 \cdot 40 = 0,83 \cdot 120 = 100 \text{ VA}$$

Possiamo riassumere in tabella i valori calcolati nei due funzionamenti:

	avvolgimento A	avvolgimento B	avvolgimento C
Corrente nel funzionamento 160V/220V 400VA	1,82A	0,68A	0,68A
Corrente nel funzionamento 160V/120V 400VA	0A	2,5A	0,83A
Correnti Massime avvolgimento (I)	1,82A	2,5A	0,83A
Tensioni avvolgimento (V)	60V	40V	120V
Potenza massima avvolgimento ($P = V \cdot I$)	109VA	100VA	100VA

Con i valori di Correnti Massime avvolgimento si procede al calcolo della sezione filo rame come si fa per un normale trasformatore.

Con i valori di Potenza massima avvolgimento calcoliamo la Potenza Propria Pp:

$$P_p = \frac{P_A + P_B + P_C}{2} \quad P_p = \frac{109 + 100 + 100}{2} = 154 \text{ VA}$$

In base a questa potenza Pp si dimensiona il nucleo ferromagnetico come si fa per un normale trasformatore.

Tramite questa formula pratica si può trovare la superficie totale del Lamierino più adatto:

$$A \times B = 80 \cdot \sqrt{\frac{P_p}{B \cdot f}} \quad (cm^2) \quad A \times B = 80 \cdot \sqrt{\frac{154}{1 \cdot 50}} = 140 \text{ cm}^2$$

Dal valore di AxB ottenuto, utilizzando le formule specifiche del lamierino da noi scelto (vedi tabelle lamierini) si ricava la misura della colonna centrale C, di seguito tutte le altre quote del lamierino.

Dalla Tabella Lamierini scelgo questo lamierino con le seguenti misure:

AxB(cm ²)	A(mm)	B(mm)	C(mm)	D(mm)	E(mm)	F(mm)	G(mm)	Tipo	Gf(Kg/1cm)
120	100	120	40	20	60	20	20	EI120	0,735

Il valore della Sezione Nucleo Ferromagnetico si calcola in funzione del coefficiente di dimensionamento Kd e della potenza propria.

$$S_{fe} = K_d \cdot \sqrt{P_p} \quad (cm^2) \quad S_{fe} = 1,3 \cdot \sqrt{154} = 16,13 \text{ cm}^2$$

Dalla Sezione del Nucleo Ferromagnetico e dalla dimensione C del lamierino si ricava lo Spessore del pacco di lamierini, tenendo in considerazione anche il coefficiente di stipamento lamierini K_s .

$$S_p = \frac{S_{fe}}{C} \cdot K_s \quad (cm) \quad S_p = \frac{16,13}{4} \cdot 1,11 = 4,47 \text{ cm}$$

Conoscendo le misure del lamierino e dello spessore pacco è necessario trovare un rocchetto di idonee dimensioni. Da un catalogo scelgo un rocchetto in plastica con le seguenti misure:

Cr=41mm	Spr=46mm	M=18mm	H=57mm
---------	----------	--------	--------

Scelto il tipo di lamierino, scelto lo spessore del nucleo ferromagnetico scelto il rocchetto adatto alle nostre esigenze, è opportuno aggiornare i calcoli:

$$S_{fe} = \frac{Sp \cdot C}{K_s} \quad (cm^2)$$

$$S_{fe} = \frac{4,5 \cdot 4,0}{1,11} = 16,22 \text{ cm}^2$$

La valutazione del numero delle spire dell'avvolgimento primario e secondario si effettua in relazione ai volt per spira:

$$e = 4,44 \cdot f \cdot S_{fe} \cdot B \cdot 10^{-4} \quad (V)$$

$$e = 4,44 \cdot 50 \cdot 16,22 \cdot 1 \cdot 10^{-4} = 0,36 \text{ V}$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento primario

$$N_1 = \frac{V_1}{e} \quad (\text{spire})$$

$$N_1 = \frac{160}{0,36} = 444 \text{ spire}$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento secondario elevatore

$$N_2 = \frac{V_2}{e} \quad (\text{spire})$$

$$N_2 = \frac{220}{0,36} = 611 \text{ spire}$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento secondario abbassatore

$$N_3 = \frac{V_3}{e} \quad (\text{spire})$$

$$N_3 = \frac{120}{0,36} = 333 \text{ spire}$$

Essendo un Autotrasformatore Elevatore/Abbassatore calcoliamo N_s e N_d :

$$N_s = N_2 - N_1$$

$$N_s = 611 - 444 = 167 \text{ spire}$$

$$N_s = N_1 - N_3$$

$$N_d = 444 - 333 = 111 \text{ spire}$$

$$N_d = N_3$$

$$N_d = 333 \text{ spire}$$

Verifica che il valore degli Amperspira primario agli Amperspira secondari:

$$N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2 = N_3 \cdot I_3 \quad (\text{Asp})$$

$$444 \cdot 2,5 = 611 \cdot 1,82 = 333 \cdot 3,33 = 1110 \text{ Asp}$$

Verifica che il valore degli Amperspira sia uguale in tutti gli avvolgimenti nel I° funzionamento:

$$N_s \cdot I_s = N_d \cdot I_d \quad (\text{Asp})$$

$$167 \cdot 1,82 = (111 + 333) \cdot 0,68 = 303 \text{ Asp}$$

Verifica che il valore degli Amperspira sia uguale in tutti gli avvolgimenti nel II° funzionamento:

$$N_s \cdot I_s = N_d \cdot I_d \quad (\text{Asp})$$

$$111 \cdot 2,5 = 333 \cdot 0,83 = 277 \text{ Asp}$$

Vantaggi dell'Autotrasformatore

- Permette un risparmio di rame. Infatti le correnti primarie e secondarie nel tratto di avvolgimento comune ai due avvolgimenti (N_d) si possono ritenere in opposizione di fase, infatti la corrente che percorre questo tratto è data dalla differenza tra le due correnti. Per cui la parte in derivazione (N_d) di avvolgimento potrà essere avvolta con un conduttore di sezione molto minore di quella necessaria per un trasformatore di pari potenza.
- Permette un risparmio nel ferro. Infatti la sezione del ferro dovrà essere proporzionata per la potenza propria P_p , non per la potenza passante P_2 dell'autotrasformatore. Ne risultano quindi sezioni del ferro alquanto ridotte e quindi minimo ingombro.
- Nell'autotrasformatore sono ridotte le perdite per effetto Joule (perdite nel rame) e le cadute di tensione nell'avvolgimento comune, essendo determinate dalle correnti in gioco. Quindi come conseguenza migliora il rendimento rispetto ad un trasformatore di uguale potenza.
- La massima economia di rame si ottiene nel caso in cui il rapporto tra V_1/V_2 sia prossimo all'unità. Tanto più questo rapporto diverge dall'unità, tanto più i vantaggi dell'autotrasformatore si riducono e compaiono gli svantaggi.

Svantaggi dell'Autotrasformatore

- L'isolamento dei due avvolgimenti (N_s ed N_d) deve essere dimensionato per la tensione più alta presente nell'autotrasformatore.
- L'autotrasformatore non isola dalla rete. Infatti gli avvolgimenti N_s ed N_d risultano collegati in serie essendoci così continuità metallica fra primario e secondario quindi sono maggiori i pericoli per le persone che accidentalmente toccano uno dei conduttori.

- Non é possibile collegare elettricamente tra di loro delle apparecchiature che hanno per alimentazione degli autotrasformatori, altrimenti si potrebbero verificare dei corti circuiti.
- Gli autotrasformatori nelle apparecchiature anche economiche stanno scomparendo, lasciando indiscusso il posto ai trasformatori. Vengono impiegati maggiormente solo per adattare due circuiti dove la differenza fra le tensioni V_1 e V_2 è minima. In linea di massima si può dire che conviene costruire un autotrasformatore quando il rapporto fra le tensioni V_1/V_2 non supera il valore di 3.

Esempio pratico di Autotrasformatore Monofase

Con questo esempio proviamo a calcolare un tradizionale autotrasformatore monofase abbassatore.

Elementi da prefissare

Conoscendo i seguenti dati di partenza è possibile calcolare un autotrasformatore in aria:

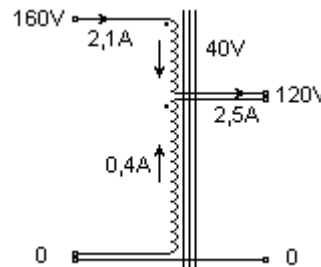
$P_2 = 300$ potenza al secondario in voltampere VA.

$f = 50$ frequenza alla quale dovrà funzionare il trasformatore in Hz.

$V_1 = 160$ tensione alimentazione dell'avvolgimento primario in V.

$V_2 = 120$ tensione che dovrà fornire l'avvolgimento secondario a pieno carico in V.

$B = 1$ Induzione Magnetica in Wb/m² alla quale si vuole far funzionare il trasformatore.



Potenze dell'Autotrasformatore

Al secondario si verifica una caduta di tensione % in relazione alla potenza del trasformatore:

$$v\% = \frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{P_2}{2} + 2,72 \right) \right)^{1,35}} (\%) = \frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{300}{2} + 2,72 \right) \right)^{1,35}} = 4,5 (\%)$$

Si può pertanto scrivere la relazione relativa alla tensione secondaria a vuoto:

$$V_{20} = \left(1 + \frac{v\%}{100} \right) \cdot V_2 \quad (V) \quad V_{20} = \left(1 + \frac{4,5}{100} \right) \cdot 120 = 125,4V$$

Essendo V_H la tensione più elevata e V_L la tensione più bassa dell'autotrasformatore. Calcoliamo il fattore di riduzione Kr e di seguito ricaviamo il valore della Potenza Propria Pp .

$$Kr = \frac{V_H - V_L}{V_H} \quad (n^\circ) \quad Kr = \frac{160 - 120}{160} = 0,25$$

$$Pp = Kr \cdot P_2 \quad (VA) \quad Pp = 0,25 \cdot 300 = 75 VA$$

Formato Lamierino

Tramite questa formula pratica si può trovare la superficie totale del Lamierino più adatto:

$$A \times B = 80 \cdot \sqrt{\frac{Pp}{B \cdot f}} \quad (cm^2) \quad A \times B = 80 \cdot \sqrt{\frac{75}{1 \cdot 50}} = 97,98 cm^2$$

Dal valore di $A \times B$ ottenuto, utilizzando le formule specifiche del lamierino da noi scelto (vedi tabelle lamierini) si ricava la misura della colonna centrale C , di seguito tutte le altre quote del lamierino.

Dalla Tabella Lamierini scelgo questo lamierino con le seguenti misure:

$A \times B (cm^2)$	$A (mm)$	$B (mm)$	$C (mm)$	$D (mm)$	$E (mm)$	$F (mm)$	$G (mm)$	Tipo	$Gf (Kg/1cm)$
97,2	90	108	36	18	54	18	18	EI108	0,595

Sezione del Nucleo

Il valore della Sezione Nucleo Ferromagnetico si calcola in funzione del coefficiente di dimensionamento Kd e della potenza propria.

$$Sfe = Kd \cdot \sqrt{Pp} \quad (cm^2) \quad Sfe = 1,3 \cdot \sqrt{75} = 11,258 cm^2$$

Dalla Sezione del Nucleo Ferromagnetico e dalla dimensione C del lamierino si ricava lo Spessore del pacco di lamierini, tenendo in considerazione anche il coefficiente di stipamento lamierini K_s .

$$Sp = \frac{S_{fe}}{C} \cdot K_s \quad (cm)$$

$$Sp = \frac{11,258}{3,6} \cdot 1,11 = 3,47 \text{ cm}$$

Conoscendo le misure del lamierino e dello spessore pacco è necessario trovare un rocchetto di idonee dimensioni. Da un catalogo scelgo un rocchetto in plastica con le seguenti misure:

Cr=37mm	Spr=37mm	M=16mm	H=51mm
---------	----------	--------	--------

Lo spazio disponibile che offre questo rocchetto per ospitare gli avvolgimenti è dato da:

$$S_{disp} = H \cdot M \quad (mm^2)$$

$$S_{disp} = 51 \cdot 16 = 816 \text{ mm}^2$$

Scelto il tipo di lamierino, scelto lo spessore del nucleo ferromagnetico scelto il rocchetto adatto alle nostre esigenze, è opportuno aggiornare i calcoli:

$$S_{fe} = \frac{Sp \cdot C}{K_s} \quad (cm^2)$$

$$S_{fe} = \frac{3,6 \cdot 3,6}{1,11} = 11,67 \text{ cm}^2$$

Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro

Conoscendo lo spessore del singolo lamierino $sl=0,5mm$, e lo spessore del pacco lamellare Sp :

$$N_L = \frac{Sp}{K_s \cdot sl} \quad (\text{lamierini})$$

$$N_L = \frac{3,6}{1,11 \cdot 0,05} = 65 \text{ lamierini}$$

Considerando il peso di un centimetro di spessore di pacco lamellare Gf calcolo il peso totale del pacco lamellare:

$$Gl = Gf \cdot Sp \quad (Kg)$$

$$Gl = 0,595 \cdot 3,6 = 2,142 \text{ Kg}$$

Conoscendo la cifra di perdita specifica del lamierino $ws=3W/Kg$ si possono valutare le perdite nel ferro pf del nucleo ferromagnetico:

$$pf = B^2 \cdot ws \cdot Gl \quad (\text{watt})$$

$$pf = 1^2 \cdot 3 \cdot 2,142 = 6,426 \text{ watt}$$

Numero Spire

La valutazione del numero delle spire dell'avvolgimento primario e secondario si effettua in relazione ai volt per spira:

$$e = 4,44 \cdot f \cdot S_{fe} \cdot B \cdot 10^{-4} \quad (V)$$

$$e = 4,44 \cdot 50 \cdot 11,67 \cdot 1 \cdot 10^{-4} = 0,259 \text{ V}$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento primario

$$N_1 = \frac{V_1}{e} \quad (\text{spire})$$

$$N_1 = \frac{160}{0,259} = 617 \text{ spire}$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento secondario, considerando la tensione secondaria a vuoto

$$N_2 = \frac{V_{20}}{e} \quad (\text{spire})$$

$$N_2 = \frac{125,4}{0,259} = 484 \text{ spire}$$

Essendo un Autotrasformatore Abbassatore calcoliamo Ns e Nd :

$$Ns = N_1 - N_2$$

$$Ns = 617 - 484 = 133 \text{ spire}$$

$$Nd = N_2$$

$$Nd = 484 \text{ spire}$$

Corrente primario e secondario

Dalla Potenza Passante Totale Secondario si trova il Rendimento percentuale:

$$\eta = 60 + \left(\frac{\log_e (P_2 + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (P_2 + 1000)} \right) \quad (\%)$$

$$60 + \left(\frac{\log_e (300 + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (300 + 1000)} \right) = 89,3 \quad (\%)$$

Calcolo la corrente assorbita dal primario

$$I_1 = \frac{P_2}{\eta \cdot V_1} \quad (A)$$

$$I_1 = \frac{300}{0,893 \cdot 160} = 2,1 \text{ A}$$

Calcolo la massima corrente che può fornire il secondario

$$I_2 = \frac{P_2}{V_2} \quad (A)$$

$$I_2 = \frac{300}{120} = 2,5 A$$

Essendo un Autotrasformatore Abbassatore calcoliamo I_s e I_d :

$$I_s = I_1$$

$$I_s = 2,1 A$$

$$I_d = I_2 - I_1$$

$$I_d = 2,5 - 2,1 = 0,4 A$$

Diametro dei Conduttori

Dalla corrente e dalla densità di corrente si trova il diametro del filo di rame nudo, poi dalla tabella filo rame si sceglie il valore più prossimo.

$$\phi_r = 2 \cdot \sqrt{\frac{I}{J \cdot \pi}} \quad (mm)$$

$$\phi_{r1} = 2 \cdot \sqrt{\frac{2,1}{2,5 \cdot \pi}} = 1,03 (mm)$$

$$\phi_{r2} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,4}{2,5 \cdot \pi}} = 0,45 (mm)$$

Dalla tabella scelgo un filo con le seguenti misure in millimetri:

Diametro Filo Nudo ϕ_N (mm)	Diametro Filo Isolato ϕ_I (mm)	Sezione filo rame nudo S_f (mm ²)	n° di Spire in 1 cm di spazio N_{spcm}	Coefficien. di Riempimento K_f	Resistenza di 1m di filo R_f (Ω)	Peso di 1m di filo di rame P_f (gr/m)
1	1,08	0,7854	8,33	1,11	0,0224	6,9900
0,45	0,51	0,1590	17,58	1,12	0,1107	1,4155

Lunghezza Filo Avvolgimento e Peso del Rame

La lunghezza della spira media attorno al rocchetto è:

$$l_{spm} = 2 \cdot (Cr + M) + 2 \cdot (Spr + M) \quad (mm)$$

$$l_{spm} = 2 \cdot (37 + 16) + 2 \cdot (37 + 16) = 212 mm$$

La lunghezza totale del filo dell'avvolgimento in relazione al numero di spire:

$$l_{avv} = l_{spm} \cdot N \cdot 10^{-3} \quad (m)$$

$$l_{avv1} = 212 \cdot 133 \cdot 10^{-3} = 28,2 m$$

$$l_{avv2} = 212 \cdot 484 \cdot 10^{-3} = 102,6 m$$

Considerando il peso di un metro di filo di rame P_f calcolo il peso rame totale degli avvolgimenti:

$$Gr = P_f \cdot l_{avv} \cdot 10^{-3} \quad (Kg)$$

$$Gr_1 = 6,9900 \cdot 28,2 \cdot 10^{-3} = 0,1971 Kg$$

$$Gr_2 = 1,4155 \cdot 102,6 \cdot 10^{-3} = 0,1452 Kg$$

Resistenza degli avvolgimenti

Considerando la resistenza di un metro di filo di rame R_f calcolo la resistenza totale degli avvolgimenti:

$$R = R_f \cdot l_{avv} \quad (\Omega)$$

$$R_1 = 0,0224 \cdot 28,2 = 0,631 \Omega$$

$$R_2 = 0,1107 \cdot 102,6 = 11,358 \Omega$$

Perdite nel Rame

Determiniamo il nuovo valore di densità di corrente in relazione al filo utilizzato, poi conoscendo il peso del rame avvolgimento calcoliamo la potenza persa nel rame.

$$J = \frac{A}{S_f} \quad (A/mm^2)$$

$$J_1 = \frac{2,1}{0,7854} = 2,7 A/mm^2$$

$$J_2 = \frac{0,4}{0,1590} = 2,5 A/mm^2$$

In relazione ai conduttori scelti la densità di corrente rientra nei limiti stabiliti, per cui si procede con il calcolo della potenza persa nel rame:

$$pr = 2,4 \cdot J^2 \cdot Gr \quad (watt)$$

$$pr_1 = 2,4 \cdot 2,7^2 \cdot 0,1971 = 3,4 watt$$

$$pr_2 = 2,4 \cdot 2,5^2 \cdot 0,1452 = 2,2 watt$$

Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento

La tabella filo rame fornisce anche il numero delle spire che possono essere contenute assialmente in un centimetro N_{spcm} .

In base all'altezza H della finestra del rocchetto si può stabilire quante spire stanno in uno strato:

$$S_{Str} = H \cdot N_{spcm} \quad (\text{spire} \cdot \text{strato})$$

$$S_{Str1} = 5,1 \cdot 8,33 = 42,5 \text{ spire} \cdot \text{strato}$$

$$S_{Str2} = 5,1 \cdot 17,58 = 89,6 \text{ spire} \cdot \text{strato}$$

Considerando le spire totali si possono calcolare anche il numero degli strati necessari

$$N_{Str} = \frac{N}{S_{Str}} \quad (\text{strati})$$

$$N_{Str1} = \frac{133}{42,5} = 3,1 \text{ strati}$$

$$N_{Str2} = \frac{484}{89,6} = 5,4 \text{ strati}$$

Controllo Ingombri

Calcoliamo l'Ingombro Rame considerando il diametro filo rame isolato come se fosse di sezione quadrata in modo da tenere conto anche degli spazi d'aria fra spira e spira, che moltiplichiamo per il numero di spire e per il coefficiente di riempimento K_f che tiene conto di una certa tolleranza nell'esecuzione dell'avvolgimento.

$$Ing_R = \phi_1^2 \cdot N \cdot K_f \quad (mm^2)$$

$$Ing_{R1} = 1,08^2 \cdot 133 \cdot 1,11 = 172,5 mm^2$$

$$Ing_{R2} = 0,51^2 \cdot 484 \cdot 1,11 = 140,4 mm^2$$

Totale Ingombro Rame

$$Ing_{Rtot} = \sum Ing_{Rx} \quad (mm^2)$$

$$Ing_{Rtot} = 172,5 + 140,4 = 312,9 mm^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Strati. Supponendo di interporre fra ogni strato di spire un cartoncino isolante di spessore $I_{st}=0,2mm$,

$$Ing_{IST} = I_{ST} \cdot H \cdot \text{int}(N_{Str}) \quad (mm^2)$$

$$Ing_{IST1} = 0,2 \cdot 51 \cdot (3) = 30,6 mm^2$$

$$Ing_{IST2} = 0,2 \cdot 51 \cdot (5) = 51 mm^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Strati:

$$Ing_{ISTtot} = \sum Ing_{ISTx} \quad (mm^2)$$

$$Ing_{ISTtot} = 30,6 + 51 = 81,6 mm^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti. Terminata la costruzione alla fine di tutti gli avvolgimenti e fra un avvolgimento e l'altro supponiamo di inserire un cartoncino isolante di spessore $I_{av}=0,5mm$.

$$Ing_{Iav} = I_{AV} \cdot H \quad (mm^2)$$

$$Ing_{Iav} = 0,5 \cdot 51 = 25,5 mm^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti:

Essendo $n^{\circ}Avv$ il numero di avvolgimenti primari e secondari che compongono il trasformatore.

$$Ing_{Iavtot} = Ing_{Iav} \cdot n^{\circ}Avv \quad (mm^2)$$

$$Ing_{Iavtot} = 25,5 \cdot 2 = 51 mm^2$$

Calcoliamo l'ingombro totale maggiorandolo di un coefficiente di ingombro percentuale $K_i=10\%$ che tiene conto delle imperfezioni nella realizzazione dell'avvolgimento e degli eventuali spazi d'aria.

$$Ing_{TOT} = Ing_{Rtot} + Ing_{ISTtot} + Ing_{Iavtot} \cdot \left(1 + \frac{K_i\%}{100}\right) \quad (mm^2)$$

$$Ing_{TOT} = 312,9 + 81,6 + 51 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) = 490 mm^2$$

Il valore dell'ingombro totale è minore dello spazio offerto dal rocchetto, quindi gli avvolgimenti saranno contenuti nel rocchetto comodamente.

Verifica controllo, rendimento e caduta di tensione

Verifica del Rendimento % considerando le eventuali perdite calcolate:

$$\eta\% = \frac{P}{P + pf + pr} \cdot 100 \quad (\%)$$

$$\eta = \frac{300}{300 + 6,426 + 3,4 + 2,2} \cdot 100 = 96,1 \%$$

Calcolo della caduta di tensione secondaria considerando le eventuali perdite calcolate:

$$v_2 = \frac{pr_1 \cdot N_2}{I_1 \cdot N_1} + \frac{pr_2}{I_2} \quad (V)$$

$$v_2 = \frac{3,4 \cdot 484}{2,1 \cdot 133} + \frac{2,2}{0,4} = 11,4 V$$

Calcolo della tensione secondaria a carico:

$$V_C = V_{20} - v_2 \quad (V)$$

$$V_C = 125,4 - 11,4 = 114 V$$

Verifica della Caduta di Tensione %:

$$v\% = \frac{V_2 - V_C}{V_C} \cdot 100 \quad (\%)$$

$$v\% = \frac{120 - 114}{114} \cdot 100 = 5,2 \%$$

Concludendo possiamo dire che il rendimento e la caduta di tensione % si discostano di poco rispetto ai valori calcolati in precedenza.

Comunque lo scopo di queste ultime verifiche è quello di capire se il dimensionamento del trasformatore è corretto, ed eventualmente se ne è il caso, correggere alcuni parametri in modo da rientrare con un rendimento e una c.d.t.% pressappoco nei valori previsti.

Esempio pratico di Autotrasformatore Monofase Multipresa

Con questo esempio proviamo a calcolare un autotrasformatore monofase multipresa dotato di due prese secondarie, ambedue in grado di erogare, non simultaneamente, una potenza di 400VA.

Elementi da prefissare

Conoscendo i seguenti dati di partenza è possibile calcolare un autotrasformatore in aria:

$P_2 = 400$ potenza al secondario in voltampere VA.

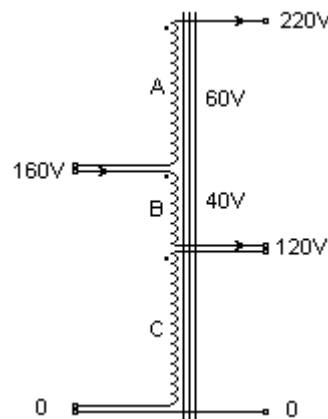
$f = 50$ frequenza alla quale dovrà funzionare il trasformatore in Hz.

$V_1 = 160$ tensione alimentazione dell'avvolgimento primario in V.

$V_2 = 220$ tensione che dovrà fornire l'avvolgimento secondario a pieno carico in V.

$V_3 = 120$ tensione che dovrà fornire l'avvolgimento secondario a pieno carico in V.

$B = 1$ Induzione Magnetica in Wb/m² alla quale si vuole far funzionare il trasformatore.



Potenze dell'Autotrasformatore

Dalla Potenza Passante Totale Secondario si trova il Rendimento percentuale:

$$\eta = 60 + \left(\frac{\log_e (P_2 + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (P_2 + 1000)} \right) (\%) \quad 60 + \left(\frac{\log_e (400 + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (400 + 1000)} \right) = 90,4 (\%)$$

Al secondario si verifica una caduta di tensione % in relazione alla potenza del trasformatore:

$$v\% = \frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{P_2}{2} + 2,72 \right) \right)^{1,35}} (\%) \quad \frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{400}{2} + 2,72 \right) \right)^{1,35}} = 4,2 (\%)$$

Si può pertanto scrivere la relazione relativa alla tensione secondaria a vuoto:

$$V_{20} = \left(1 + \frac{v\%}{100} \right) \cdot V_2 \quad (V) \quad V_{20} = \left(1 + \frac{4,2}{100} \right) \cdot 220 = 229,2V$$

$$V_{20} = \left(1 + \frac{4,2}{100} \right) \cdot 120 = 125V$$

Consideriamo separatamente i due funzionamenti possibili:

I° funzionamento, 160V / 220V 400VA;

Essendo V_H la tensione più elevata e V_L la tensione più bassa dell'autotrasformatore. Calcoliamo il fattore di riduzione Kr e di seguito ricaviamo il valore della Potenza Propria Pp .

$$Kr = \frac{V_H - V_L}{V_H} \quad (n^\circ) \quad Kr = \frac{220 - 160}{220} = 0,2727$$

$$Pp = Kr \cdot P_2 \quad (VA) \quad Pp = 0,2727 \cdot 400 = 109 VA$$

Calcolo la corrente assorbita dal primario

$$I_1 = \frac{P_2}{\eta \cdot V_1} \quad (A) \quad I_1 = \frac{400}{0,904 \cdot 160} = 2,76 A$$

Calcolo la massima corrente che può fornire il secondario

$$I_2 = \frac{P_2}{V_2} \quad (A)$$

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

Essendo un Autotrasformatore Elevatore calcoliamo I_s e I_d

$$I_s = I_2$$

$$I_s = 1,82 \text{ A (corrente che passa nell'avvolgimento A)}$$

$$I_d = I_1 - I_2$$

$$I_d = 2,76 - 1,82 = 0,94 \text{ A (corrente che passa nell'avvolgimento B e C)}$$

II° funzionamento, 160V / 120V 400VA;

Essendo V_H la tensione più elevata e V_L la tensione più bassa dell'autotrasformatore. Calcoliamo il fattore di riduzione Kr e di seguito ricaviamo il valore della Potenza Propria P_p .

$$Kr = \frac{V_H - V_L}{V_H} \quad (n^\circ)$$

$$Kr = \frac{160 - 120}{160} = 0,25$$

$$P_p = Kr \cdot P_2 \quad (VA)$$

$$P_p = 0,25 \cdot 400 = 100 \text{ VA}$$

Calcolo la corrente assorbita dal primario

$$I_1 = \frac{P_2}{\eta \cdot V_1} \quad (A)$$

$$I_1 = \frac{400}{0,904 \cdot 160} = 2,76 \text{ A}$$

Calcolo la massima corrente che può fornire il secondario

$$I_3 = \frac{P_2}{V_3} \quad (A)$$

$$I_3 = \frac{400}{120} = 3,33 \text{ A}$$

Essendo un Autotrasformatore Abbassatore calcoliamo I_s e I_d

$$I_s = I_1$$

$$I_s = 2,76 \text{ A (corrente che passa nell'avvolgimento B)}$$

$$I_d = I_3 - I_1$$

$$I_d = 3,33 - 2,76 = 0,57 \text{ A (corrente che passa nell'avvolgimento C)}$$

Possiamo riassumere in tabella i valori calcolati nei due funzionamenti:

	avvolgimento A	avvolgimento B	avvolgimento C
Corrente nel funzionamento 160V/220V 400VA	1,82A	0,94A	0,94A
Corrente nel funzionamento 160V/120V 400VA	0A	2,76A	0,57A
Correnti Massime avvolgimento (I)	1,82A	2,76A	0,94A
Tensioni avvolgimento (V)	60V	40V	120V
Potenza massima avvolgimento ($P = V \cdot I$)	109VA	110VA	113VA

Con i valori di Correnti Massime avvolgimento si procede al calcolo della sezione filo rame come si fa per un normale trasformatore.

Dai dati rilevati da Potenza massima avvolgimento calcoliamo la Potenza Propria P_p :

$$P_p = \frac{P_A + P_B + P_C}{2}$$

$$P_p = \frac{109 + 110 + 113}{2} = 166 \text{ VA}$$

In base a questa potenza si dimensiona il nucleo ferromagnetico come si fa per un normale trasformatore.

Formato Lamierino

Tramite questa formula pratica si può trovare la superficie totale del Lamierino più adatto:

$$A \times B = 80 \cdot \sqrt{\frac{P_p}{B \cdot f}} \quad (cm^2)$$

$$A \times B = 80 \cdot \sqrt{\frac{166}{1 \cdot 50}} = 146 \text{ cm}^2$$

Dal valore di $A \times B$ ottenuto, utilizzando le formule specifiche del lamierino da noi scelto (vedi tabelle lamierini) si ricava la misura della colonna centrale C , di seguito tutte le altre quote del lamierino.

Dalla Tabella Lamierini scelto questo lamierino con le seguenti misure:

$A \times B (cm^2)$	A(mm)	B(mm)	C(mm)	D(mm)	E(mm)	F(mm)	G(mm)	Tipo	Gf(Kg/1cm)
120	100	120	40	20	60	20	20	EI120	0,735

Sezione del Nucleo

Il valore della Sezione Nucleo Ferromagnetico si calcola in funzione del coefficiente di dimensionamento K_d e della potenza propria.

$$S_{fe} = K_d \cdot \sqrt{P_p} \quad (cm^2) \qquad S_{fe} = 1,3 \cdot \sqrt{166} = 16,75 \, cm^2$$

Dalla Sezione del Nucleo Ferromagnetico e dalla dimensione C del lamierino si ricava lo Spessore del pacco di lamierini, tenendo in considerazione anche il coefficiente di stipamento lamierini K_s .

$$S_p = \frac{S_{fe}}{C} \cdot K_s \quad (cm) \qquad S_p = \frac{16,75}{4} \cdot 1,11 = 4,64 \, cm$$

Conoscendo le misure del lamierino e dello spessore pacco è necessario trovare un rocchetto di idonee dimensioni. Da un catalogo scelgo un rocchetto in plastica con le seguenti misure:

Cr=41mm	Spr=46mm	M=18mm	H=57mm
---------	----------	--------	--------

Lo spazio disponibile che offre questo rocchetto per ospitare gli avvolgimenti è dato da:

$$S_{disp} = H \cdot M \quad (mm^2) \qquad S_{disp} = 57 \cdot 18 = 1056 \, mm^2$$

Scelto il tipo di lamierino, scelto lo spessore del nucleo ferromagnetico scelto il rocchetto adatto alle nostre esigenze, è opportuno aggiornare i calcoli:

$$S_{fe} = \frac{S_p \cdot C}{K_s} \quad (cm^2) \qquad S_{fe} = \frac{4,5 \cdot 4,0}{1,11} = 16,22 \, cm^2$$

Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro

Conoscendo lo spessore del singolo lamierino $sl=0,5mm$, e lo spessore del pacco lamellare Sp :

$$N_L = \frac{Sp}{K_s \cdot sl} \quad (lamierini) \qquad N_L = \frac{4,5}{1,11 \cdot 0,05} = 81 \, lamierini$$

Considerando il peso di un centimetro di spessore di pacco lamellare G_f calcolo il peso totale del pacco lamellare:

$$G_l = G_f \cdot Sp \quad (Kg) \qquad G_l = 0,735 \cdot 4,5 = 3,3075 \, Kg$$

Conoscendo la cifra di perdita specifica del lamierino $ws=3W/Kg$ si possono valutare le perdite nel ferro pf del nucleo ferromagnetico:

$$pf = B^2 \cdot ws \cdot G_l \quad (watt) \qquad pf = 1^2 \cdot 3 \cdot 3,3075 = 9,922 \, watt$$

Numero Spire

La valutazione del numero delle spire dell'avvolgimento primario e secondario si effettua in relazione ai volt per spira:

$$e = 4,44 \cdot f \cdot S_{fe} \cdot B \cdot 10^{-4} \quad (V) \qquad e = 4,44 \cdot 50 \cdot 16,22 \cdot 1 \cdot 10^{-4} = 0,36 \, V$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento primario

$$N_1 = \frac{V_1}{e} \quad (spire) \qquad N_1 = \frac{160}{0,36} = 444 \, spire$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento secondario, considerando la tensione secondaria a vuoto

$$N_2 = \frac{V_{20}}{e} \quad (spire) \qquad N_2 = \frac{229,2}{0,36} = 637 \, spire$$

$$N_3 = \frac{V_{30}}{e} \quad (spire) \qquad N_3 = \frac{125}{0,36} = 347 \, spire$$

Essendo un Autotrasformatore Abbassatore calcoliamo N_s e N_d :

$$N_s = N_2 - N_1 \qquad N_s = 637 - 444 = 193 \, spire \quad (\text{numero spire avvolgimento A})$$

$$N_d = N_1 - N_3 \qquad N_d = 444 - 347 = 97 \, spire \quad (\text{numero spire avvolgimento B})$$

$$N_d = N_3 \qquad N_d = 347 \, spire \quad (\text{numero spire avvolgimento C})$$

Diametro dei Conduttori

Dalla corrente e dalla densità di corrente si trova il diametro del filo di rame nudo, poi dalla tabella filo rame si sceglie il valore più prossimo.

$$\phi_r = 2 \cdot \sqrt{\frac{I}{J \cdot \pi}} \quad (\text{mm})$$

$$\phi_{r1} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1,82}{2,5 \cdot \pi}} = 0,96 \text{ mm}$$

$$\phi_{r2} = 2 \cdot \sqrt{\frac{2,76}{2,5 \cdot \pi}} = 1,18 \text{ mm}$$

$$\phi_{r3} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,94}{2,5 \cdot \pi}} = 0,69 \text{ mm}$$

Dalla tabella scelgo un filo con le seguenti misure in millimetri:

Diametro Filo Nudo ϕ_N (mm)	Diametro Filo Isolato ϕ_I (mm)	Sezione filo rame nudo S_f (mm ²)	n° di Spire in 1 cm di spazio N_{spcm}	Coefficien. di Riempimento K_f	Resistenza di 1m di filo R_f (Ω)	Peso di 1m di filo di rame P_f (gr/m)
0,9	0,97	0,6362	9,27	1,11	0,0277	5,6619
1,1	1,19	0,9503	7,56	1,11	0,0185	8,4580
0,65	0,71	0,3318	12,64	1,11	0,0530	2,9533

Lunghezza Filo Avvolgimento e Peso del Rame

La lunghezza della spira media attorno al rocchetto è:

$$l_{spm} = 2 \cdot (Cr + M) + 2 \cdot (Spr + M) \quad (\text{mm})$$

$$l_{spm} = 2 \cdot (41 + 18) + 2 \cdot (46 + 18) = 246 \text{ mm}$$

La lunghezza totale del filo dell'avvolgimento in relazione al numero di spire:

$$l_{avv} = l_{spm} \cdot N \cdot 10^{-3} \quad (\text{m})$$

$$l_{avv1} = 246 \cdot 193 \cdot 10^{-3} = 47,48 \text{ m}$$

$$l_{avv2} = 246 \cdot 97 \cdot 10^{-3} = 23,86 \text{ m}$$

$$l_{avv3} = 246 \cdot 347 \cdot 10^{-3} = 85,3 \text{ m}$$

Considerando il peso di un metro di filo di rame P_f calcolo il peso rame totale degli avvolgimenti:

$$Gr = P_f \cdot l_{avv} \cdot 10^{-3} \quad (\text{Kg})$$

$$Gr_1 = 5,6619 \cdot 47,48 \cdot 10^{-3} = 0,2688 \text{ Kg}$$

$$Gr_2 = 8,4580 \cdot 23,86 \cdot 10^{-3} = 0,2018 \text{ Kg}$$

$$Gr_3 = 2,9533 \cdot 85,3 \cdot 10^{-3} = 0,2521 \text{ Kg}$$

Resistenza degli avvolgimenti

Considerando la resistenza di un metro di filo di rame R_f calcolo la resistenza totale degli avvolgimenti:

$$R = R_f \cdot l_{avv} \quad (\Omega)$$

$$R_1 = 0,0277 \cdot 47,48 = 1,31 \Omega$$

$$R_2 = 0,0185 \cdot 23,86 = 0,44 \Omega$$

$$R_3 = 0,0530 \cdot 85,3 = 4,52 \Omega$$

Perdite nel Rame

Determiniamo il nuovo valore di densità di corrente in relazione al filo utilizzato, poi conoscendo il peso del rame avvolgimento calcoliamo la potenza persa nel rame.

$$J = \frac{A}{S_f} \quad (\text{A/mm}^2)$$

$$J_1 = \frac{1,82}{0,6362} = 2,8 \text{ A/mm}^2$$

$$J_2 = \frac{2,76}{0,9503} = 2,9 \text{ A/mm}^2$$

$$J_3 = \frac{0,94}{0,3318} = 2,8 \text{ A/mm}^2$$

In relazione ai conduttori scelti la densità di corrente rientra nei limiti stabiliti, per cui si procede con il calcolo della potenza persa nel rame:

$$pr = 2,4 \cdot J^2 \cdot Gr \quad (\text{watt})$$

$$pr_1 = 2,4 \cdot 2,8^2 \cdot 0,2688 = 5,05 \text{ watt}$$

$$pr_2 = 2,4 \cdot 2,9^2 \cdot 0,2018 = 4,07 \text{ watt}$$

$$pr_3 = 2,4 \cdot 2,8^2 \cdot 0,2521 = 4,74 \text{ watt}$$

Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento

La tabella filo rame fornisce anche il numero delle spire che possono essere contenute assialmente in un centimetro N_{spcm} .

In base all'altezza H della finestra del rocchetto si può stabilire quante spire stanno in uno strato:

$$S_{Str} = H \cdot N_{spcm} \quad (\text{spire} \cdot \text{strato})$$

$$S_{Str1} = 5,7 \cdot 9,27 = 52,84 \text{ spire} \cdot \text{strato}$$

$$S_{Str2} = 5,7 \cdot 7,56 = 43,09 \text{ spire} \cdot \text{strato}$$

$$S_{Str2} = 5,7 \cdot 12,64 = 72,05 \text{ spire} \cdot \text{strato}$$

Considerando le spire totali si possono calcolare anche il numero degli strati necessari

$$N_{Str} = \frac{N}{S_{Str}} \quad (\text{strati})$$

$$N_{Str1} = \frac{193}{52,84} = 3,65 \text{ strati}$$

$$N_{Str2} = \frac{97}{43,09} = 2,25 \text{ strati}$$

$$N_{Str2} = \frac{347}{72,05} = 4,81 \text{ strati}$$

Controllo Ingombri

Calcoliamo l'Ingombro Rame considerando il diametro filo rame isolato come se fosse di sezione quadrata in modo da tenere conto anche degli spazi d'aria fra spira e spira, che moltiplichiamo per il numero di spire e per il coefficiente di riempimento Kf che tiene conto di una certa tolleranza nell'esecuzione dell'avvolgimento.

$$Ing_R = \phi_l^2 \cdot N \cdot Kf \quad (\text{mm}^2)$$

$$Ing_{R1} = 0,97^2 \cdot 193 \cdot 1,11 = 201 \text{ mm}^2$$

$$Ing_{R2} = 1,19^2 \cdot 97 \cdot 1,11 = 152 \text{ mm}^2$$

$$Ing_{R2} = 0,71^2 \cdot 347 \cdot 1,11 = 194 \text{ mm}^2$$

Totale Ingombro Rame

$$Ing_{Rtot} = \Sigma Ing_{Rx} \quad (\text{mm}^2)$$

$$Ing_{Rtot} = 201 + 152 + 194 = 547 \text{ mm}^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Strati. Supponendo di interporre fra ogni strato di spire un cartoncino isolante di spessore $Ist=0,2\text{mm}$,

$$Ing_{IST} = I_{ST} \cdot H \cdot \text{int}(N_{Str}) \quad (\text{mm}^2)$$

$$Ing_{IST1} = 0,2 \cdot 57 \cdot (3) = 34,2 \text{ mm}^2$$

$$Ing_{IST2} = 0,2 \cdot 57 \cdot (2) = 22,8 \text{ mm}^2$$

$$Ing_{IST2} = 0,2 \cdot 57 \cdot (4) = 45,6 \text{ mm}^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Strati:

$$Ing_{ISTtot} = \Sigma Ing_{ISTx} \quad (\text{mm}^2)$$

$$Ing_{ISTtot} = 34,2 + 22,8 + 45,6 = 102,6 \text{ mm}^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti. Terminata la costruzione alla fine di tutti gli avvolgimenti e fra un avvolgimento e l'altro supponiamo di inserire un cartoncino isolante di spessore $I_{av}=0,5mm$.

$$Ing_{I_{AV}} = I_{AV} \cdot H \quad (mm^2) \qquad Ing_{I_{AV}} = 0,5 \cdot 57 = 28,5 mm^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti:

Essendo $n^{\circ}Avv$ il numero di avvolgimenti primari e secondari che compongono il trasformatore.

$$Ing_{I_{AVtot}} = Ing_{I_{AV}} \cdot n^{\circ}Avv \quad (mm^2) \qquad Ing_{I_{AVtot}} = 28,5 \cdot 3 = 85,5 mm^2$$

Calcoliamo l'ingombro totale maggiorandolo di un coefficiente di ingombro percentuale $K_i=10\%$ che tiene conto delle imperfezioni nella realizzazione dell'avvolgimento e degli eventuali spazi d'aria.

$$Ing_{TOT} = Ing_{Rtot} + Ing_{ISTot} + Ing_{I_{AVtot}} \cdot \left(1 + \frac{K_i\%}{100}\right) \quad (mm^2)$$

$$Ing_{TOT} = 547 + 102,6 + 85,5 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) = 808,6 mm^2$$

Il valore dell'ingombro totale è minore dello spazio offerto dal rocchetto, quindi gli avvolgimenti saranno contenuti nel rocchetto comodamente.

Verifica controllo, rendimento e caduta di tensione

Verifica del Rendimento % considerando le eventuali perdite calcolate:

$$\eta\% = \frac{P}{P + p_f + p_r} \cdot 100 \quad (\%) \qquad \eta = \frac{400}{400 + 9,922 + 4,07 + 4,74} \cdot 100 = 95,5 \%$$

Calcolo della caduta di tensione secondaria considerando le eventuali perdite calcolate in riferimento ad un primario e un secondario a scelta (es. 160/120V):

$$v_2 = \frac{p_{r_1} \cdot N_2}{I_1 \cdot N_1} + \frac{p_{r_2}}{I_2} \quad (V) \qquad v_2 = \frac{4,07 \cdot 347}{2,76 \cdot 97} + \frac{4,74}{0,94} = 10,317 V$$

Calcolo della tensione secondaria a carico:

$$V_C = V_{20} - v_2 \quad (V) \qquad V_C = 125 - 10,317 = 114,6 V$$

Verifica della Caduta di Tensione %:

$$v\% = \frac{V_2 - V_C}{V_C} \cdot 100 \quad (\%) \qquad v\% = \frac{120 - 114,6}{114,6} \cdot 100 = 4,63 \%$$

Concludendo possiamo dire che il rendimento e la caduta di tensione % si discostano di poco rispetto ai valori calcolati in precedenza.

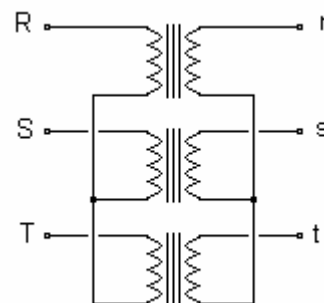
Comunque lo scopo di queste ultime verifiche è quello di capire se il dimensionamento del trasformatore è corretto, ed eventualmente se ne è il caso, correggere alcuni parametri in modo da rientrare con un rendimento e una c.d.t.% pressappoco nei valori previsti.

Introduzione al Trasformatore Trifase in Aria

Quando si crea l'energia elettrica in una centrale mediante un generatore questo produce energia elettrica trifase (tre fili). Le reti di distribuzione dell'energia elettrica sono trifasi ed anche numerosi utilizzatori sono previsti per alimentazione trifase.

L'energia di un sistema trifase può essere trasformata sia mediante tre trasformatori monofasi opportunamente collegati creando così un 'banco trifase', oppure mediante un trasformatore trifase che abbia la potenza uguale alla somma delle potenze dei tre trasformatori monofase.

In genere si preferisce questa ultima soluzione, un trasformatore trifase è costituito da un nucleo avente tre colonne, dove su ciascuna delle quali sono disposti gli avvolgimenti primario e secondario di una stessa fase.



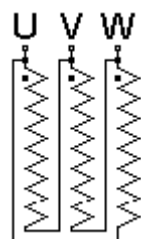
Questo ci fa capire che dobbiamo considerare il trasformatore trifase come tre circuiti monofasi indipendenti ciascuno formato da una fase, per cui nel calcolo faremo riferimento ad una sola fase, essendo le altre due uguali.

La potenza totale del trasformatore trifase sarà uguale alla somma delle tre singole potenze di ogni fase. Infatti in un sistema trifase simmetrico ed equilibrato (stesse tensioni e stesse correnti sulle tre fasi) è possibile misurare la potenza utilizzando un solo wattmetro inserito su una qualsiasi fase e la cui lettura va poi moltiplicata per tre.

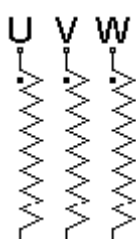
Tipi di collegamenti

Un sistema trifase è caratterizzato da tre conduttori di linea, quindi il trasformatore avrà tre avvolgimenti, ed ogni avvolgimento avrà un inizio e una fine, questi sei conduttori possono essere collegati fra di loro con tre metodi diversi:

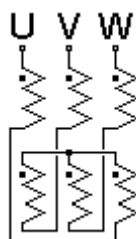
- **Triangolo** ogni avvolgimento fa capo con i suoi due estremi a due delle fasi, in modo che il loro insieme costituisca un triangolo dai cui vertici partono le tre fasi.
- **Stella** ogni avvolgimento fa capo con una fase, mentre gli estremi opposti sono collegati insieme e creano così il centro stella.
- **Zig-Zag** ogni avvolgimento è composto da due avvolgimenti, gli estremi dei primi avvolgimenti fanno capo con le fasi, mentre gli estremi opposti sono collegati agli estremi dei secondi avvolgimenti, i cui estremi opposti sono collegati insieme e creano così il centro stella.
- **Bifase** ogni avvolgimento è collegato in serie all'alto, la fine e l'inizio degli avvolgimenti esterni fanno capo alle due fasi, il punto dove convergono due avvolgimenti si considera il centro stella virtuale.



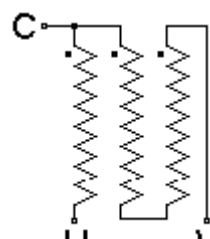
Triangolo



Stella



Zig-Zag



Bifase

I collegamenti fra le fasi del secondario possono essere uguali o diversi da quelli fra le fasi del primario, per cui si potrebbero avere in teoria nove combinazioni di collegamenti. Di solito nei trasformatori trifasi sono usati i seguenti collegamenti primario/secondario: stella/stella, triangolo/stella, stella/zig-zag, più raramente sono usati: triangolo/triangolo, stella/triangolo, mentre il collegamento a zig-zag è usato solitamente per il secondario e raramente per il primario.

Scelta dei collegamenti

La scelta delle combinazioni possibili di collegamenti dipende da considerazioni economiche e da esigenze di esercizio. Per esempio, in tutte le distribuzioni a tre fili con neutro, essendo necessario un centro accessibile, si possono impiegare soltanto trasformatori con secondario a stella o a zig-zag.

Quando si verificano degli squilibri di carico (fasi non equamente caricate) si può dire che scegliendo trasformatori con primario a triangolo e secondario a stella oppure con primario a stella e secondario a zig-zag tali squilibri si ripercuotono meno sulla linea di alimentazione primaria.

Per identificare i vari tipi di collegamenti che sono stati realizzati all'interno del trasformatore fra gli avvolgimenti di ogni fase si utilizza un codice alfanumerico:

- Y per indicare un collegamento a Stella.
- D per indicare un collegamento a Triangolo.
- Z per indicare un collegamento a Zig-Zag.

La lettera riportata in maiuscolo si riferisce al primario del trasformatore, mentre quella in minuscolo si riferisce al secondario. Se nel caso di collegamento a Stella o a Zig-Zag, il centro stella è accessibile dall'esterno (tramite un terminale a cui andrà collegato il conduttore di Neutro), al pedice della lettera Y (oppure y) si aggiunge la lettera N (oppure n). Per esempio Y_N significa primario collegato a Stella con centro stella accessibile dall'esterno, mentre per il secondario sarebbe y_n .

Di seguito a queste sigle trova posto un numero. Esso identifica il gruppo, ovvero le volte per cui è necessario moltiplicare 30° per ottenere l'effettivo spostamento angolare che si manifesta i vettori delle tensioni primarie e quelli delle tensioni secondarie in conseguenza al modo con cui sono stati collegati gli avvolgimenti. Un altro esempio: $D y_n 11$ significa primario collegato a triangolo, secondario a stella con centro stella accessibile, gruppo di appartenenza 11 (moltiplicando per 30° si ottiene 330° che rappresenta lo spostamento di fase della tensione secondaria rispetto quella primaria).

Alcuni pregi e difetti di alcuni collegamenti fra i più usati (vedi tabella):

- I collegamenti $Y-y_n-0$ (stella-stella gruppo 0) e $Y-y_n-6$ (stella-stella gruppo 6) non permettono il passaggio della 3^a armonica della corrente magnetizzante, e gli squilibri di corrente provocano forti squilibri di tensione se non esiste il filo del neutro primario. Di solito è meglio evitare questa combinazione di collegamenti.
- I collegamenti $D-d-0$ $D-d-6$ non sono adatti a circuiti con neutro.
- I collegamenti $D-y-11$ $D-y-5$ $Y-d-11$ $Y-d-5$ permettono il passaggio della 3^a armonica della corrente magnetizzante.
- I collegamenti $Y-z-11$ $Y-z-5$ non permettono il passaggio della 3^a armonica della corrente magnetizzante, collegando il neutro sul primario e sul secondario si diminuiscono gli squilibri sul primario dovuti a squilibri sul secondario.

Agli effetti economici si può dire che in linea di massima gli avvolgimenti a triangolo sono più costosi di quelli a stella, dovendo impiegare conduttori di diametro minore e dovendo avvolgere un maggiore numero di spire; mentre l'avvolgimento a zig-zag richiede a parità di tensione, un numero di spire secondarie maggiore del 15% di quello di un avvolgimento a stella.

Il costo dei conduttori smaltati per avvolgimenti dipende oltre che dal tipo di isolamento anche dalla sezione del conduttore, infatti più la sezione è piccola tanto maggiore è il costo.

Per quanto riguarda il cablaggio dei fili una volta terminata la costruzione del trasformatore trifase è opportuno individuare tutti gli inizi e le fini di ogni avvolgimento. Per evitare di sbagliare il collegamento si usa etichettare tutti i fili con lettere maiuscole per il primario e con lettere minuscole per il secondario, per ciò tutti gli inizi degli avvolgimenti con le lettere U V W e le fini con le lettere X Y Z, (per esempio, il primo avvolgimento avrà come inizio la U e come fine la X). Con tutti gli avvolgimenti così identificati sarà più facile effettuare i collegamenti sopra descritti facendo sempre riferimento alla "Tabella dei Gruppi di Collegamento". Nella morsettiera terminale verrà segnalato dove collegare l'alimentazione trifase, questo mediante le lettere maiuscole R S T Ne dove collegare il carico, mediante le lettere minuscole r s t n.

Spostamento di fase

Nei trasformatori trifasi ha inoltre importanza l'eventuale spostamento di fase della tensione secondaria rispetto alla tensione primaria. Ciò interessa agli effetti del collegamento in parallelo di trasformatori, che è possibile effettuare solo se i trasformatori sono perfettamente uguali (stessa potenza, stesso collegamento, stesso numero spire, stessa variazione di tensione da vuoto a carico).

Nei trasformatori monofasi e nei trasformatori trifasi a collegamenti omonimi stella/stella, triangolo/triangolo, la tensione secondaria può soltanto essere o in fase o in opposizione di fase, cioè equivale a uno spostamento di fase rispettivamente di 0° , oppure di 180° (gruppo 0 oppure gruppo 6).

Invece nei trasformatori trifasi a collegamento misto stella/triangolo, triangolo/stella, stella/zig-zag, questo spostamento di fase angolare non può mai essere né di 0° né di 180° , ma deve essere multiplo dispari di 30° .

Esaminando vettorialmente tutte le combinazioni possibili di collegamenti trifasi risulta in definitiva che si possono avere 12 distinti valori di spostamento angolare di 30° in 30° che costituiscono 12 gruppi (da 0 a 11).

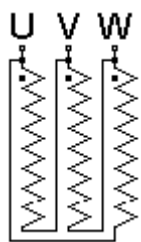
Questi gruppi rappresentano il ritardo della bassa tensione (secondario) rispetto alla alta tensione (primario), corrisponde alla lettura dell'ora su un quadrante d'orologio nel quale la lancetta lunga (minuti) rappresenta la f.e.m.i. nell'avvolgimento di alta tensione e sta sullo 0, mentre la lancetta corta (ore) rappresenta la f.e.m.i. nell'avvolgimento di bassa tensione e può stare su 0, 1, 2, 3, 4, 511.

Le norme CEI raccomandano come normali i gruppi 0, 5, 6, 11, che corrispondono a spostamenti angolari di fase di 0° , 150° , 180° , 330° , ed in particolare i gruppi 0, 11.

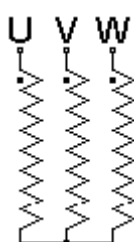
Al fine di collegare trasformatori in parallelo gli avvolgimenti devono essere collegati fra loro in modo tale che tutti abbiano lo stesso sfasamento e quindi appartengono allo stesso gruppo.

E' importante notare che i trasformatori trifasi del gruppo 6 possono essere convertiti al gruppo 0, e quelli del gruppo 5 possono essere convertiti al gruppo 11 mediante inversione di collegamenti interni degli avvolgimenti.

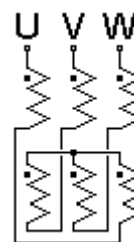
Non è invece mai possibile passare dai gruppi 0 e 6 ai gruppi 11 e 5 o viceversa: in altri termini non possono mai funzionare in parallelo trasformatori a collegamenti omonimi (stella/stella triangolo/triangolo), con trasformatori a collegamenti misti (stella/triangolo triangolo/stella).



Triangolo



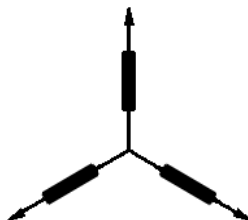
Stella



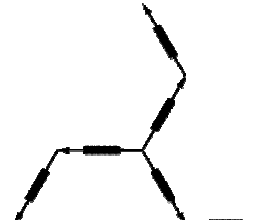
Zig-Zag



Triangolo



Stella



Zig-Zag

Tabella Spostamento di Fase dei Principali Gruppi

Gruppo 0 - Sfasam. vettoriale 0°	Yy0 	
	Dd0 	
	Dz0 	
Gruppo 5 - Sfasam. vettoriale 150°	Yd5 	
	Dy5 	
	Yz5 	
Gruppo 6 - Sfasam. vettoriale 180°	Yy6 	
	Dd6 	
	Dz6 	
Gruppo 11 - Sfasam. vettoriale 330°	Yd11 	
	Dy11 	
	Zy11 	

Per la identificazione dei terminali si fa riferimento alla norma CEI 14-7. Le lettere utilizzate per le tre fasi, sia primarie che secondarie sono U V W. Il neutro si identifica con la lettera N. Prima di ogni lettera, il numero 1 sta ad indicare il primario, il numero 2 sta ad indicare il secondario. In alcuni vecchi trasformatori si possono trovare terminali identificati con le lettere A B C in corrispondenza delle attuali U V W.

Per i collegamenti descritti si considerano gli avvolgimenti disegnati con in alto l'inizio e in basso la fine dell'avvolgimento stesso.

Considerazioni fra Parametri di Linea, di Fase e di Avvolgimento

Analizziamo un qualunque trasformatore trifase con nucleo ferromagnetico in lamierini a tre colonne dove su ogni colonna è avvolto un primario ed un secondario. Prendiamo in esame il singolo avvolgimento presente su di una sola colonna.

TABELLA RELAZIONI FRA TENSIONE DI AVVOLGIMENTO E TENSIONE DI LINEA

Tensione di un singolo Avvolgimento	Tensione di Linea con Collegamento STELLA	Tensione di Linea con Collegamento TRIANGOLO	Tensione di Linea con Collegamento ZIG-ZAG*	Tensione di Linea con Collegamento BIFASE
V_{avv}	$V_L = V_{avv} \cdot \sqrt{3}$	$V_L = V_{avv}$	$V_L = V_{avv} \cdot 3$	$V_L = V_{avv} \cdot 2$
127	220	127	380	254
220	380	220	660	440
380	658	380	1140	760

TABELLA RELAZIONI FRA TENSIONE DI AVVOLGIMENTO E TENSIONE DI FASE

Tensione di un singolo Avvolgimento	Tensione di Fase con Collegamento STELLA	Tensione di Fase con Collegamento TRIANGOLO	Tensione di Fase con Collegamento ZIG-ZAG*	Tensione di Fase con Collegamento BIFASE
V_{avv}	$V_f = V_{avv}$	$V_f = V_{avv}$	$V_f = V_{avv} \cdot \sqrt{3}$	$V_f = V_{avv} \cdot \sqrt{3}$
127	127	127	220	220
220	220	220	380	380
380	380	380	658	658

TABELLA RELAZIONI FRA POTENZA DI AVVOLGIMENTO E POTENZA DI LINEA

Potenza di un singolo Avvolgimento	Potenza di Linea con Collegamento STELLA	Potenza di Linea con Collegamento TRIANGOLO	Potenza di Linea con Collegamento ZIG-ZAG*	Potenza di Linea con Collegamento BIFASE**
P_{avv}	$P_L = P_{avv} \cdot 3$	$P_L = P_{avv} \cdot 3$	$P_L = P_{avv} \cdot \sqrt{3} \cdot 3$	$P_L = P_{avv} \cdot 2$
192	576	576	1000	384
333	1000	1000	1730	666
500	1500	1500	2598	1000

TABELLA RELAZIONI FRA POTENZA DI AVVOLGIMENTO E POTENZA DI FASE

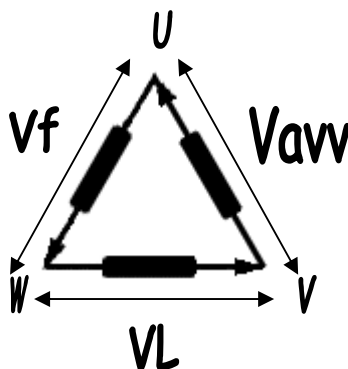
Potenza di un singolo Avvolgimento	Potenza di Fase con Collegamento STELLA	Potenza di Fase con Collegamento TRIANGOLO	Potenza di Fase con Collegamento ZIG-ZAG*	Potenza di Fase con Collegamento BIFASE**
P_{avv}	$P_f = P_{avv}$	$P_f = P_{avv}$	$P_f = P_{avv} \cdot \sqrt{3}$	$P_f = P_{avv} \cdot \sqrt{3}$
192	192	192	333	333
333	333	333	576	576
500	500	500	866	866

* l'avvolgimento a zig-zag è composto da 6 avvolgimenti. Da notare che collegando in serie i due avvolgimenti della stessa colonna si ottiene un collegamento a stella avente una tensione $2/\sqrt{3}$ volte maggiore. Se l'avvolgimento è un secondario comporta una potenza al primario di $2/\sqrt{3}$ volte maggiore di quella disponibile al secondario.

** da tenere in considerazione che per il collegamento Bifase di un avvolgimento secondario comporta una potenza al primario di 1,5 volte maggiore di quella disponibile al secondario.

Avvolgimento a Triangolo

Il collegamento a triangolo è prevalentemente utilizzato negli avvolgimenti primari, ma può essere utilizzato anche negli avvolgimenti secondari dei trasformatori trifasi. In questo tipo di collegamento non esiste un punto comune a tutti tre gli avvolgimenti, perciò non è disponibile il filo 'neutro'.



$$PL = VL \cdot IL \cdot \sqrt{3}$$

$$PL = Pf \cdot 3$$

$$P_{avv} = \frac{PL}{3}$$

$$Pf = Vf \cdot If$$

$$IL = \frac{PL}{VL \cdot \sqrt{3}}$$

$$IL = If \cdot \sqrt{3}$$

$$I_{avv} = \frac{P_{avv}}{V_{avv}}$$

$$If = \frac{PL}{VL \cdot 3}$$

$$380 \cdot 1,52 \cdot \sqrt{3} = 1000$$

$$333 \cdot 3 = 1000$$

$$\frac{1000}{3} = 333$$

$$380 \cdot 0,877 = 333$$

$$\frac{1000}{380 \cdot \sqrt{3}} = 1,52$$

$$0,877 \cdot \sqrt{3} = 1,52$$

$$\frac{333}{380} = 0,877$$

$$\frac{1000}{380 \cdot 3} = 0,877$$

$$VL = Vf = V_{avv}$$

$$Pf = P_{avv}$$

$$If = I_{avv}$$

VL	Vf	Vavv	IL	If	Iavv	PL	Pf	Pavv
380	380	380	1,52	0,877	0,877	1000	333	333

Per il dimensionamento del trasformatore con avvolgimento a triangolo è necessario tenere in considerazione i soli parametri che interessano il singolo avvolgimento; come Vavv, Iavv e Pavv.

Gli altri parametri di linea come PL e IL, subiscono le variazioni in funzione dei valori assunti dai parametri di avvolgimento come Pavv e Iavv, secondo le relazioni sopra descritte anche con esempi numerici.

Legenda:

VL Tensione di linea misurata fra fase e fase.

Vf Tensione di fase misurata fra fase e punto comune (neutro).

Vavv Tensione di avvolgimento misurata ai capi del singolo avvolgimento.

IL Corrente di linea misurata su uno dei 3 conduttori di fase collegati al trasformatore.

If Corrente di fase misurata sul terminale dell'avvolgimento.

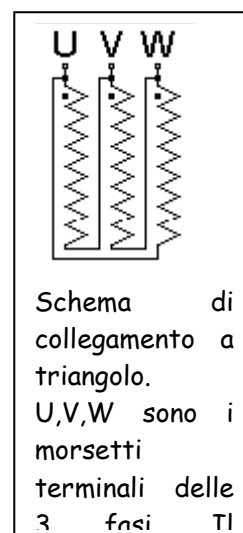
Iavv Corrente di avvolgimento misurata sul terminale del singolo avvolgimento

PL Potenza di Linea del sistema trifase completo.

Pf Potenza di fase riferita a una delle 3 fasi rispetto al punto comune.

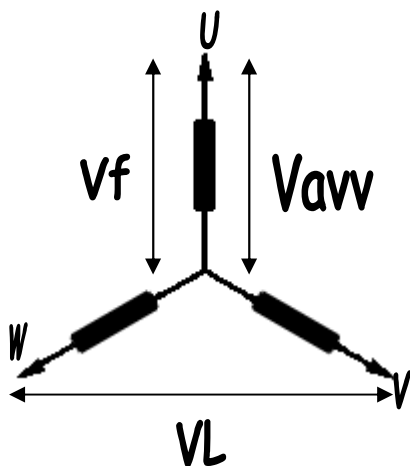
Pavv Potenza di avvolgimento del singolo avvolgimento.

PL₁ Potenza riflessa al primario del trasformatore



Avvolgimento a Stella

Il collegamento a stella normalmente è utilizzato sia negli avvolgimenti primari, sia negli avvolgimenti secondari dei trasformatori trifasi. In questo tipo di collegamento esiste un punto comune a tutti tre gli avvolgimenti che viene denominato 'centro stella' dove se lo si desidera è possibile collegare il filo 'neutro'. La connessione delle fasi a stella presenta il vantaggio di richiedere un isolamento degli avvolgimenti contro massa proporzionato alla tensione stellata (V_f), e cioè alla tensione di linea (V_L) divisa per $\sqrt{3}$: sotto questo aspetto la connessione a stella è particolarmente impiegata per le alte tensioni e dove necessita utilizzare il conduttore Neutro.



$$V_L = V_f \cdot \sqrt{3}$$

$$V_f = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$$

$$P_L = V_L \cdot I_L \cdot \sqrt{3}$$

$$P_L = P_f \cdot 3$$

$$P_f = V_f \cdot I_f$$

$$I_L = \frac{P_L}{V_L \cdot \sqrt{3}}$$

$$220 \cdot \sqrt{3} = 380$$

$$\frac{380}{\sqrt{3}} = 220$$

$$380 \cdot 1,52 \cdot \sqrt{3} = 1000$$

$$333 \cdot 3 = 1000$$

$$220 \cdot 1,52 = 333$$

$$\frac{1000}{380 \cdot \sqrt{3}} = 1,52$$

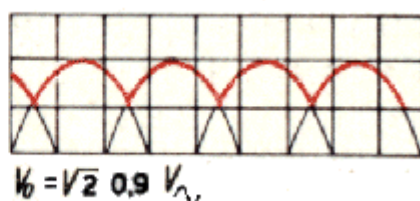
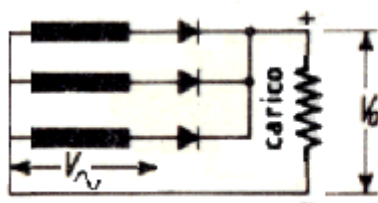
$$I_L = I_f = I_{avv}$$

$$V_f = V_{avv}$$

$$P_f = P_{avv}$$

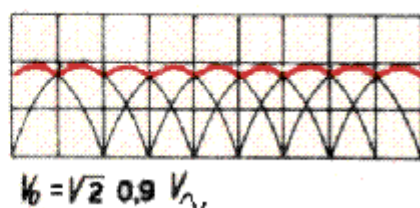
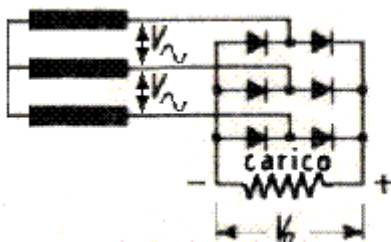
V_L	V_f	V_{avv}	I_L	I_f	I_{avv}	P_L	P_f	P_{avv}
380	220	220	1,52	1,52	1,52	1000	333	333

Raddrizzatore Trifase a Semionda: I diodi permettono il passaggio della sola semionda positiva. E' applicabile solo su collegamenti a Stella e a Zig-Zag con centro stella accessibile. (raddrizza la tensione di fase).



Schema di collegamento a stella. U, V, W sono i morsetti terminali delle 3 fasi. Il neutro

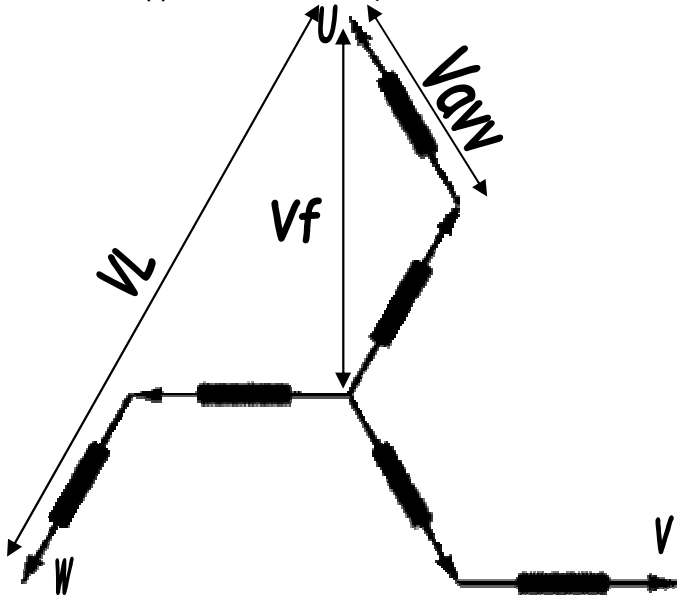
Raddrizzatore Trifase a Ponte di Graetz: I diodi permettono il passaggio della semionda positiva e negativa (onda intera). E' applicabile su tutti i collegamenti a Triangolo, Stella e Zig-Zag, senza centro stella accessibile (raddrizza la tensione di linea).



Con 3 fasi e un Ponte di Graetz si ottiene una continua livellata uguale come si otterrebbe con 6 fasi e 6 diodi a raddrizzatore a semionda. Il ripple risulta ottimale anche senza filtro di livellamento.

Avvolgimento a Zig-Zag

Il collegamento a zig-zag normalmente è utilizzato negli avvolgimenti secondari dei trasformatori trifasi di solito con primario a stella, come si nota dallo schema in figura, ciascuna fase si compone di due metà di avvolgimento disposte su due colonne diverse e collegate in serie fra loro in senso rovesciato l'una rispetto all'altra. Questo fatto porta all'eliminazione della terza armonica della tensione secondaria stellata. La ripartizione di ciascuna fase secondaria su due colonne, ha inoltre lo scopo di compensare gli squilibri delle tensioni dovuti alle dissimmetrie di carico sulle tre fasi. Questo tipo di collegamento può essere impiegato così nell'alimentazione delle reti a bassa tensione a quattro fili, in sostituzione del collegamento a stella. Per certe applicazioni il maggior costo dovuto ad un numero maggiore di spire rispetto al collegamento a stella si ritiene compensato dal vantaggio di eliminare la terza armonica delle tensioni secondarie, e dal vantaggio di rendere il trasformatore meglio adatto a sopportare carichi squilibrati.



$$\begin{aligned}
 VL &= V_{avv} \cdot 3 & 127 \cdot 3 &= 380 \\
 V_f &= V_{avv} \cdot \sqrt{3} & 127 \cdot \sqrt{3} &= 220 \\
 VL &= V_f \cdot \sqrt{3} & 220 \cdot \sqrt{3} &= 380 \\
 PL &= P_{avv} \cdot \sqrt{3} \cdot 3 & 192 \cdot \sqrt{3} \cdot 3 &= 1000 \\
 P_f &= P_{avv} \cdot \sqrt{3} & 192 \cdot \sqrt{3} &= 333 \\
 PL &= P_f \cdot 3 & 333 \cdot 3 &= 1000 \\
 IL &= \frac{PL}{VL \cdot \sqrt{3}} & \frac{1000}{380 \cdot \sqrt{3}} &= 1,51 \\
 I_f &= \frac{P_f}{V_f} & \frac{333}{220} &= 1,51 \\
 I_{avv} &= \frac{P_{avv}}{V_{avv}} & \frac{192}{127} &= 1,51 \\
 IL &= I_f = I_{avv} \\
 PL_1 &= (P_{avv} + P_{avv}) \cdot 3 & (192 + 192) \cdot 3 &= 1154 \\
 PL_1 &= PL \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} & 1000 \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} &= 1154
 \end{aligned}$$

VL	Vf	Vavv	IL	If	Iavv	PL	Pf	Pavv
380	220	127	1,51	1,51	1,51	1000	333	192

Per il dimensionamento del trasformatore con avvolgimento a zig-zag è necessario tenere in considerazione i soli parametri che interessano il singolo avvolgimento; come V_{avv} , I_{avv} e P_{avv} , da notare che sono 6 avvolgimenti.

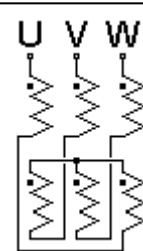
Gli altri parametri di fase come P_f e V_f , o di linea come PL e VL , subiscono le variazioni in funzione dei valori assunti dai parametri di avvolgimento come P_{avv} e V_{avv} , secondo le relazioni sopra descritte anche con esempi numerici.

Se l'avvolgimento a Zig-Zag è un secondario si deve considerare nel dimensionamento del trasformatore che la dimensione del nucleo ferromagnetico va calcolata in funzione della potenza riflessa al primario PL_1 cioè aumentata di $\frac{2}{\sqrt{3}}$ rispetto alla

potenza disponibile secondario

Viceversa se l'avvolgimento Zig-Zag è un primario la potenza disponibile al secondario

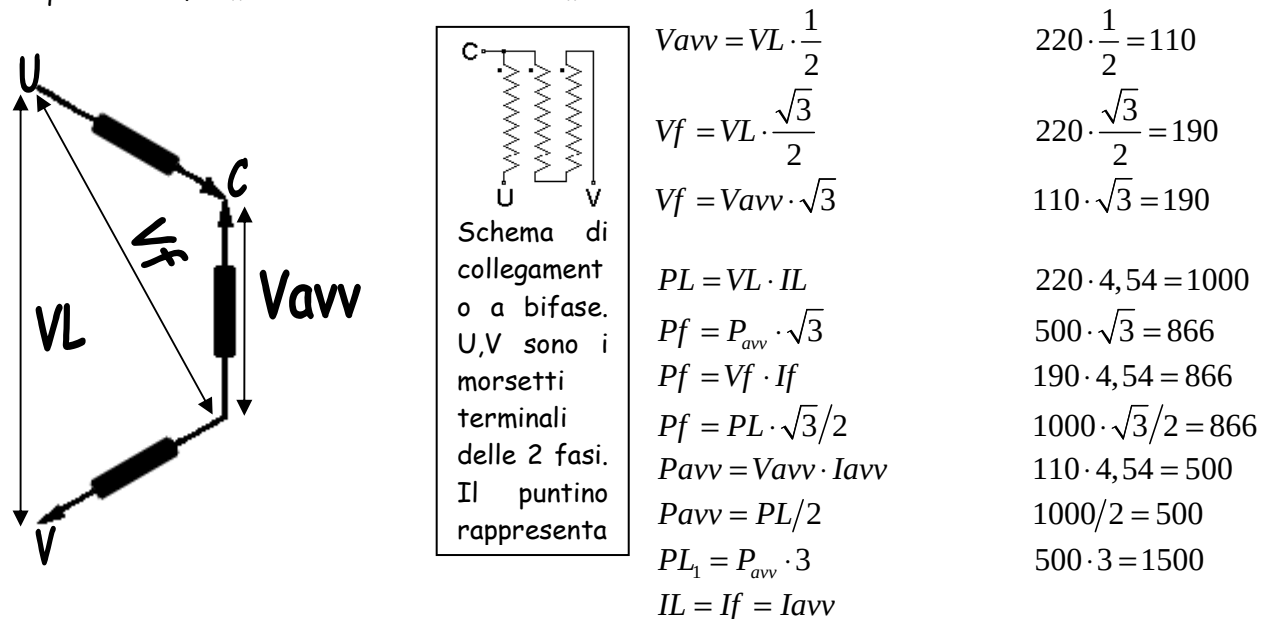
va diminuita di $\frac{2}{\sqrt{3}}$ rispetto alla potenza assorbita dal primario



Schema di collegamento a zig-zag. U,V,W sono i morsetti terminali delle 3 fasi.

Avvolgimento Bifase

Il collegamento a bifase normalmente è utilizzato solo negli avvolgimenti secondari dei trasformatori trifasi con primario a stella, corrisponde come è noto, allo schema in figura. Questo collegamento si utilizza per diminuire lo squilibrio del sistema trifase quando si ha l'esigenza di alimentare grossi carichi monofase da una rete trifase. Purtroppo non è semplice ripartire la corrente e la potenza in modo uniforme sulle 3 fasi della rete di alimentazione, ma questa può essere una soluzione. Infatti nella configurazione bifase la corrente dell'avvolgimento primario non è uguale nelle 3 fasi: la fase centrale assorbe una corrente doppia delle altre due. Se il primario fosse collegato a triangolo questo squilibrio sulla fase S provoca un calo di tensione sulle due fasi laterali del secondario, ecco perché il primario è di questo trasformatore deve essere a stella..



VL	Vf	Vavv	IL	If	Iavv	PL	Pf	Pavv
220	190	110	4,54	4,54	4,54	1000	866	500

Da tenere presente che la potenza di linea assorbita dall'avvolgimento primario di questo trasformatore è di 1,5 volte maggiore di quella disponibile al secondario, perciò se al secondario si ha $PL = 1000VA$ al primario si assorbe $PL_1 = 1500VA$.

Potenza di linea al primario	$PL_1 = P_{avv} \cdot 3$	$500 \cdot 3 = 1500$
Corrente di linea al primario a stella	$IL_m = \frac{PL_1}{VL_1 \cdot \sqrt{3}}$	$\frac{1500}{380 \cdot \sqrt{3}} = 2,28$
Corrente fase R primario colonna laterale	$I_R = IL_m \cdot 0,75$	$2,28 \cdot 0,75 = 1,71$
Corrente fase S primario colonna centrale	$I_S = IL_m \cdot 1,5$	$2,28 \cdot 1,5 = 3,42$
Corrente fase T primario colonna laterale	$I_T = IL_m \cdot 0,75$	$2,28 \cdot 0,75 = 1,71$

Nella realizzazione dell'avvolgimento primario a stella bisogna tenere valutare se è il caso di utilizzare un filo di sezione maggiore nella colonna centrale.

Attenzione, se il collegamento Bifase viene realizzato per l'avvolgimento Primario può essere alimentato solo da un altro trasformatore con secondario Bifase collegando tutti 3 i conduttori U, V, C. Questo per chiarire che alimentando solo le fasi U, V non genera al secondario una trifase.

Analisi di un Trasformatore Tri-Bifase 380V/150V

Analisi del trasformatore tri-bifase 380/150 con collegamento stella / bifase. Il trasformatore in esame è di potenza nominale 15KVA (10KVA al secondario), è realizzato su tre colonne e su ogni colonna è avvolto un primario ed un secondario. Gli avvolgimenti sono avvolti tutti nello stesso senso sulle tre rispettive colonne, ed il pallino nero indica l'inizio avvolgimento. Le dimensioni in millimetri del lamierino che realizza il circuito magnetico sono: A=360, B=400, C=80, D=80, E=200, F=80, G=80, Sp=110.

Il primario è collegato a stella con neutro N accessibile, la tensione di alimentazione è di VL=380V per ciò la tensione di fase è di Vf=220V e la tensione di un singolo avvolgimento è Vavv=220V.

Il secondario è collegato a bifase con centro stella C accessibile, la tensione di uscita è di VL=150V per ciò la tensione di un singolo avvolgimento è di Vavv=75V.

Per analizzare i volt/spira, e quindi risalire al numero delle spire che costituiscono l'avvolgimento è necessario ricorrere a questo espediente:

Avvolgere solo su una colonna 10 spire utilizzando un comune cavo da elettricista con sezione di 1mm². Alimentare il trasformatore con la tensione giusta, nel nostro caso VL=380V, misurare con un tester la tensione ai capi delle 10 spire avvolte, nel nostro caso ho misurato Vm=21,8V. Fare attenzione durante questa prova perché è molto facile prendere la scossa senza essere protetti da un differenziale.

Dalle considerazioni eseguite ne risulta che:

$$\text{I volt su una spira di questo trasformatore sono: } V_{\text{spira}} = \frac{V_m}{n^{\circ} \text{ spira}} = \frac{21,8}{10} = 2,18 \text{ V / spira}$$

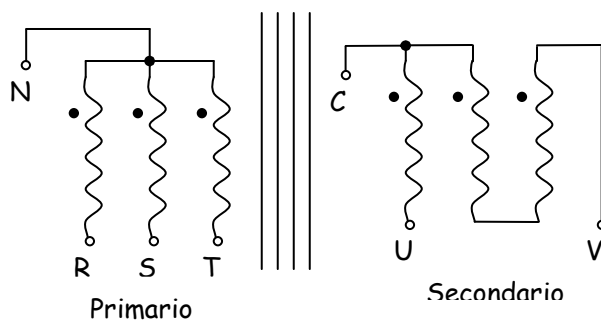
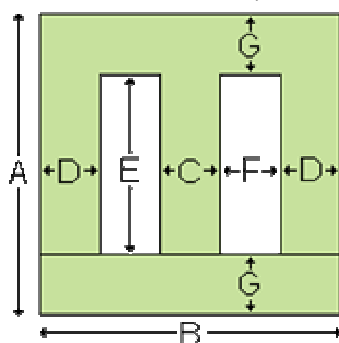
$$\text{Per ciò ogni avvolgimento primario sarà di: } N1 = \frac{V_{\text{avv}}}{V_{\text{spira}}} = \frac{220}{2,18} = 100 \text{ spire}$$

$$\text{Per ciò ogni avvolgimento secondario sarà di: } N2 = \frac{V_{\text{avv}}}{V_{\text{spira}}} = \frac{75}{2,18} = 35 \text{ spire}$$

$$\text{Sezione Nucleo Ferromagnetico } S_{fe} = \frac{C \cdot Sp}{1,1} = \frac{8 \cdot 11}{1,1} = 79,3 \text{ cm}^2$$

$$\text{Induzione Magnetica } B = \frac{e}{4,44 \cdot f \cdot S_{fe}} = \frac{2,18}{4,44 \cdot 50 \cdot 79,3 \cdot 10^{-4}} = 1,2 \text{ Wb/m}^2$$

Ovviamente esiste un primario di 100spire e un secondario di 35spire su ogni colonna.



Il secondario con collegamento Bifase può essere utilizzato in tre modi diversi:

Bifase: è infatti così chiamato perché essendo il terminale C (centro stella virtuale) collegato a terra, ci permette di avere come uscita la fase U e la fase V.

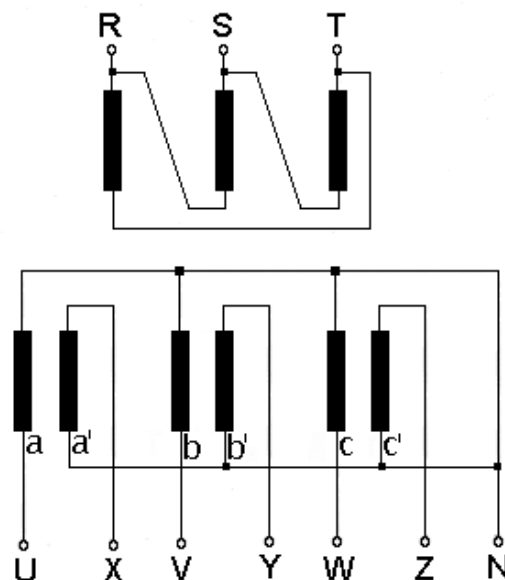
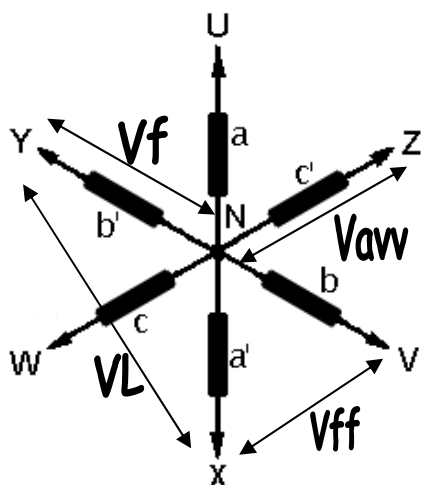
Monofase: lasciando il terminale C scollegato, e collegando il terminale U a terra, così si ottiene come uscita, V come fase, e U come neutro.

Monofase Isolato: senza collegare nessun terminale a terra utilizzando come uscite U e V, ma attenzione perché in questo caso il differenziale non vi protegge.

Il Trasformatore con collegamento Tri-Bifase trova importanti applicazioni specialmente nell'alimentazione dei grandi forni elettrici monofasi, o qualsiasi altro carico monofase di notevole potenza, quando si vogliono alimentare con una linea trifase ed ottenere un carico quasi equilibrato sulle tre fasi.

Avvolgimento Esafase a Doppia Stella

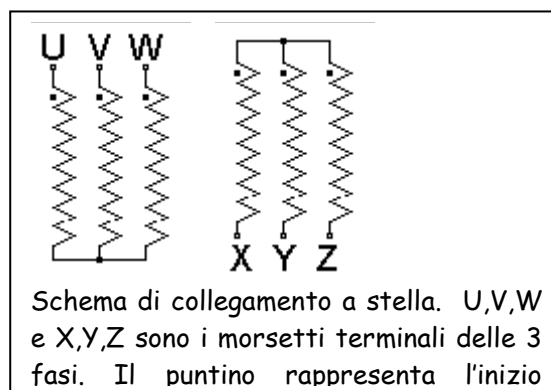
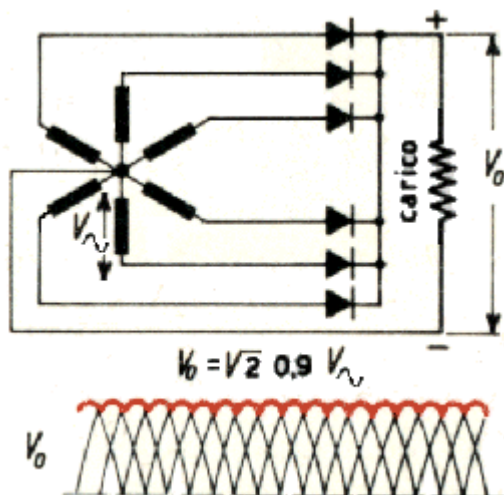
Il collegamento esafase a Doppia Stella normalmente è utilizzato solo negli avvolgimenti secondari dei trasformatori trifasi. Su ogni colonna del trasformatore sono avvolti due secondari identici tali da formare due stelle opposte. I due centri stella sono collegati fra loro per formare un unico centro stella dove se lo si desidera è possibile collegare il filo 'neutro'. Se il sistema esafase deve funzionare su un carico squilibrato con le fasi utilizzatrici derivate fra i fili di linea e il neutro, come accade nei raddrizzatori esafasi, per assicurare l'equilibrio delle tensioni secondarie, le fasi primarie del trasformatore devono essere collegate a triangolo.



VL	Vf	Vavv	IL	If	Iavv	PL	Pf	Pavv
380	220	220	1,52	1,52	1,52	1000	333	333

Raddrizzatore Trifase a Semionda:

$$V_{ff} = V_f = V_{avv}$$

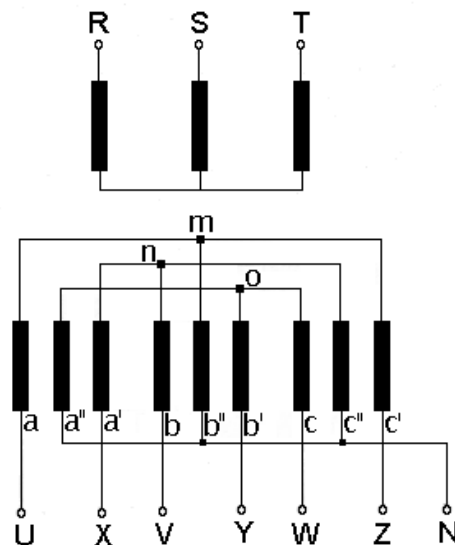
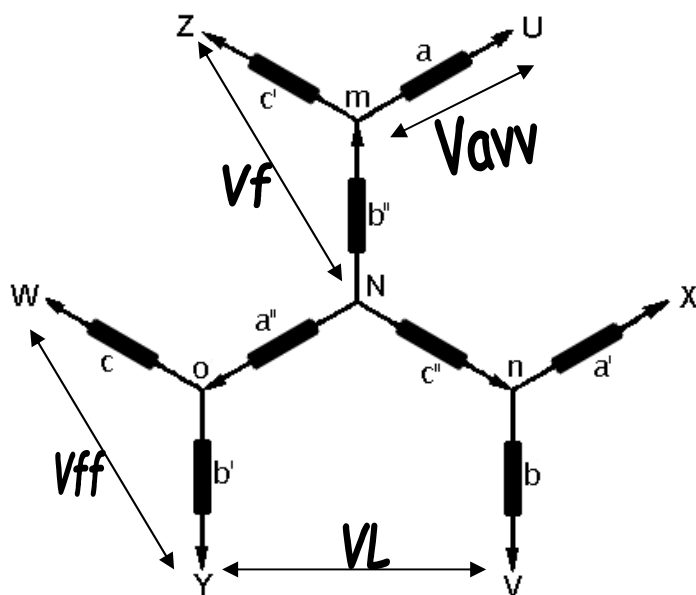


la tensione raddrizzata è $V_o = V_f \cdot \sqrt{2} \cdot 0,9$

Fondamentalmente si tratta di un trasformatore con collegamento Triangolo, Stella, Stella, Dy11y5. Le formule per il calcolo degli avvolgimenti secondari sono le stesse del collegamento a Stella, considerando due avvolgimenti secondari a stella identici.

Avvolgimento Esafase a Zig-Zag

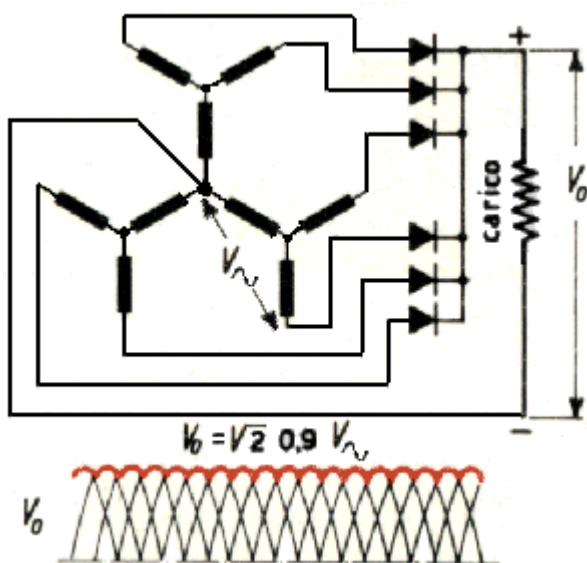
Il collegamento Esafase a Zig-Zag detto anche collegamento a 'Forca' normalmente è utilizzato solo negli avvolgimenti secondari dei trasformatori trifasi di solito con primario a stella. Questo collegamento migliora ulteriormente la ripartizione del carico sulla linea primaria, questo trasformatore porta avvolte su ogni colonna tre fasi secondarie eguali che vengono collegate fra loro come da figura. La ripartizione di ciascuna fase secondaria su due colonne, ha inoltre lo scopo di compensare gli squilibri delle tensioni dovuti alle dissimmetrie di carico sulle sei fasi, per questo motivo il primario di questo trasformatore può essere collegato a stella anziché a triangolo. Contemporaneamente può essere prelevata energia anche nei punti n,m,o,N (3 fasi+N) per alimentare delle reti a quattro fili. Per certe applicazioni il maggior costo dovuto ad un numero maggiore di spire rispetto al collegamento a doppia stella si ritiene compensato dal vantaggio di rendere il trasformatore meglio adatto a sopportare carichi squilibrati.



VL	Vf	Vavv	IL	If	Iavv	PL	Pf	Pavv
220	220	127	1,51	1,51	1,51	1000	333	192

Raddrizzatore Trifase a Semionda:

$$VL = Vff = Vf = Vavv \cdot \sqrt{3}$$



Fondamentalmente si tratta di un trasformatore con collegamento Stella, Zig-Zag, Zig-Zag, Yz11z5. Le formule per il calcolo degli avvolgimenti secondari sono le stesse del collegamento a Zig-Zag, considerando di avvolgere un avvolgimento in più su ogni colonna.

la tensione raddrizzata è $V_o = V_f \cdot \sqrt{2} \cdot 0,9$

Dimensionamento di un Trasformatore Trifase in aria

Per il dimensionamento dei trasformatori trifasi necessario interpretare bene la differenza che intercorre fra parametri di *linea* e parametri di *fase* e parametri di *avvolgimento*.

I parametri di linea sono quelli che considerano il trasformatore trifase come un blocco unico, considerandolo come una scatola dove entrano le tre fasi ed un eventuale neutro, ed escono altre tre fasi ed un altro eventuale neutro. In questo caso si parla di Potenza Totale di Linea del trasformatore, che rappresenta la potenza globale; Tensione di linea, che sarà quella misurata fra fase e fase; Corrente di linea, che sarà quella che si può misurare su uno dei conduttori di fase.

I parametri di fase sono quelli che considerano il singolo trasformatore, considerando il trasformatore trifase come se composto da tre trasformatori monofasi opportunamente collegati.

I parametri di avvolgimento sono quelli che considerano l'avvolgimento singolo del singolo trasformatore, quei parametri misurabili ai capi di ogni avvolgimento.

Per meglio capire, prendiamo come esempio il collegamento a Zig-Zag che è composto da 6 avvolgimenti distinti tutti uguali, ognuno dei quali avrà una tensione di avvolgimento V_{avv} , la serie di due avvolgimenti avrà la tensione di fase V_f , l'intero collegamento avrà una tensione di linea V_L .

I parametri di avvolgimento sono quelli che più ci interessano nel dimensionamento del trasformatore trifase. Quindi è indispensabile analizzare il tipo di collegamento trifase scelto ed individuare correttamente tutti i parametri di avvolgimento come P_{avv} , V_{avv} , I_{avv} per avere a disposizione tutti i dati necessari per effettuare il calcolo.

Elementi da prefissare

Conoscendo i seguenti dati di partenza è possibile calcolare un trasformatore in aria:

$PL_2 = 1000$ potenza di linea disponibile al secondario in voltampere VA.

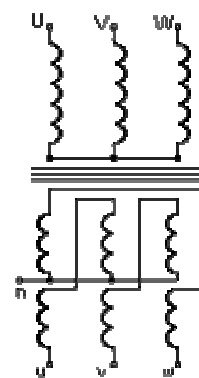
$f = 50$ frequenza alla quale dovrà funzionare il trasformatore in Hz.

$VL_1 = 380$ tensione di linea di alimentazione dell'avvolgimento primario.

$VL_2 = 220$ tensione di linea che dovrà fornire l'avvolgimento secondario a pieno carico.

$B = 1$ Induzione Magnetica in Wb/m² alla quale si vuole far funzionare il trasformatore.

Tipo Collegamento = avvolgimento Primario a Stella 'Y' e Secondario a Zig-Zag 'z'



Per meglio comprendere vengono riportati di seguito anche alcuni calcoli relativi agli altri tipi di collegamento: triangolo, stella, zig-zag e bifase.

Calcolo della Potenza Totale secondario

In relazione al tipo di collegamento scelto si calcola la potenza totale secondario che viene riflessa verso l'avvolgimento primario PL :

Se è stato scelto un Collegamento a Triangolo

$$PL = PL_2 \quad (VA) \quad 1000 = 1000 \quad (VA)$$

Se è stato scelto un Collegamento a Stella

$$PL = PL_2 \quad (VA) \quad 1000 = 1000 \quad (VA)$$

Se è stato scelto un Collegamento a Zig-Zag

$$PL = PL_2 \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (VA) \quad 1000 \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} = 1154 \quad (VA)$$

Se è stato scelto un Collegamento a Bifase

$$PL = PL_2 \cdot 1,5 \quad (VA) \quad 1000 \cdot 1,5 = 1500 \quad (VA)$$

Parametri di Singolo Avvolgimento Secondario

In relazione al tipo di collegamento scelto si calcolano i parametri del singolo avvolgimento:

Se è stato scelto un Collegamento a Triangolo

$$V_{avv2} = VL_2 \quad (V) \qquad P_{avv2} = \frac{PL_2}{3} \quad (VA) \qquad I_{avv2} = \frac{P_{avv2}}{V_{avv2}} \quad (A)$$

$$220 = 220 \, V \qquad \frac{1000}{3} = 333,3 \, VA \qquad \frac{333,3}{220} = 1,51 \, A$$

Se è stato scelto un Collegamento a Stella

$$V_{avv2} = \frac{VL_2}{\sqrt{3}} \quad (V) \qquad P_{avv2} = \frac{PL_2}{3} \quad (VA) \qquad I_{avv2} = \frac{P_{avv2}}{V_{avv2}} \quad (A)$$

$$\frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \, V \qquad \frac{1000}{3} = 333,3 \, VA \qquad \frac{333,3}{127} = 2,62 \, A$$

Se è stato scelto un Collegamento a Zig-Zag

$$V_{avv2} = \frac{VL_2}{3} \quad (VA) \qquad P_{avv2} = \frac{PL_2}{\sqrt{3} \cdot 3} \quad (VA) \qquad I_{avv2} = \frac{P_{avv2}}{V_{avv2}} \quad (A)$$

$$\frac{220}{3} = 73,3 \, V \qquad \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 3} = 192,4 \, VA \qquad \frac{192,4}{73,3} = 2,62 \, A$$

Se è stato scelto un Collegamento a Bifase

$$V_{avv2} = \frac{VL_2}{2} \quad (V) \qquad P_{avv2} = \frac{PL_2}{2} \quad (VA) \qquad I_{avv2} = \frac{P_{avv2}}{V_{avv2}} \quad (A)$$

$$\frac{220}{2} = 110 \, V \qquad \frac{1000}{2} = 500 \, VA \qquad \frac{500}{110} = 4,54 \, A$$

Parametri di Singolo Avvolgimento Primario

Dalla Potenza Totale Secondario si trova il Rendimento percentuale:

$$\eta = 60 + \left(\frac{\log_e (PL + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (PL + 1000)} \right) \quad (\%) \qquad 60 + \left(\frac{\log_e (1154 + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (1154 + 1000)} \right) = 93,8 \quad (\%)$$

La potenza dell'avvolgimento primario va considerata aumentata in funzione del rendimento:

$$PL_1 = \frac{PL}{\eta} \quad (VA) \qquad \frac{1154}{0,938} = 1230 \, VA$$

In relazione al tipo di collegamento scelto si calcolano i parametri del singolo avvolgimento:

Se è stato scelto un Collegamento a Triangolo

$$V_{avv1} = VL_1 \quad (V) \qquad P_{avv1} = \frac{PL_1}{3} \quad (VA) \qquad I_{avv1} = \frac{P_{avv1}}{V_{avv1}} \quad (A)$$

$$380 = 380 \, V \qquad \frac{1230}{3} = 410 \, VA \qquad \frac{410}{380} = 1,07 \, A$$

Se è stato scelto un Collegamento a Stella

$$V_{avv1} = \frac{VL_1}{\sqrt{3}} \quad (V) \qquad P_{avv1} = \frac{PL_1}{3} \quad (VA) \qquad I_{avv1} = \frac{P_{avv1}}{V_{avv1}} \quad (A)$$

$$\frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \, V \qquad \frac{1230}{3} = 410 \, VA \qquad \frac{410}{220} = 1,87 \, A$$

Se è stato scelto un Collegamento a Zig-Zag

$$V_{avv1} = \frac{VL_1}{3} \quad (V)$$

$$\frac{380}{3} = 126,6 \text{ V}$$

$$P_{avv1} = \frac{PL_1}{\sqrt{3} \cdot 3} \quad (VA)$$

$$\frac{1230}{\sqrt{3} \cdot 3} = 236 \text{ VA}$$

$$I_{avv1} = \frac{P_{avv1}}{V_{avv1}} \quad (A)$$

$$\frac{236}{126,6} = 1,87 \text{ A}$$

Se è stato scelto un Collegamento a Bifase

$$V_{avv1} = \frac{VL_1}{2} \quad (V)$$

$$\frac{380}{2} = 190 \text{ V}$$

$$P_{avv1} = \frac{PL_1}{2} \quad (VA)$$

$$\frac{1230}{2} = 615 \text{ VA}$$

$$I_{avv1} = \frac{P_{avv1}}{V_{avv1}} \quad (A)$$

$$\frac{615}{190} = 3,22 \text{ A}$$

Formato Lamierino

Tramite questa formula pratica si può trovare la superficie totale del Lamierino più adatto:

$$A \times B = 20 \cdot \sqrt{PL} \quad (cm^2)$$

$$A \times B = 20 \cdot \sqrt{1154} = 679 \text{ cm}^2$$

Dal valore di $A \times B$ ottenuto, utilizzando le formule specifiche del lamierino da noi scelto (vedi tabelle lamierini) si ricava la misura della colonna centrale C , di seguito tutte le altre quote del lamierino.

Dalla Tabella Lamierini scelgo questo lamierino con le seguenti misure:

$A \times B (cm^2)$	$A (mm)$	$B (mm)$	$C (mm)$	$D (mm)$	$E (mm)$	$F (mm)$	$G (mm)$	Tipo	$Gf (Kg/1cm)$
562,5	225	250	50	50	125	50	50	EI250	3,350

Sezione del Nucleo Ferromagnetico di una colonna

Il valore della Sezione Nucleo Ferromagnetico si calcola in funzione del coefficiente di dimensionamento K_d e della potenza secondaria.

$$S_{fe} = K_d \cdot \sqrt{\frac{PL}{3}} \quad (cm^2)$$

$$S_{fe} = 1,3 \cdot \sqrt{\frac{1154}{3}} = 25,5 \text{ cm}^2$$

Dalla Sezione del Nucleo Ferromagnetico e dalla dimensione C del lamierino si ricava lo Spessore del pacco di lamierini, tenendo in considerazione anche il coefficiente di stipamento lamierini K_s .

$$Sp = \frac{S_{fe}}{C} \cdot K_s \quad (cm)$$

$$Sp = \frac{25,5}{5} \cdot 1,11 = 5,6 \text{ cm}$$

Conoscendo le misure del lamierino e dello spessore pacco è necessario trovare un rocchetto di idonee dimensioni. Da un catalogo scelgo un rocchetto in plastica con le seguenti misure:

$Cr=51mm$	$Spr=51mm$	$M=24mm$	$H=122mm$
-----------	------------	----------	-----------

Ovviamente occorreranno tre rocchetti uguali uno per ogni colonna del lamierino.

Lo spazio disponibile che offre questo rocchetto per ospitare gli avvolgimenti è dato da:

$$S_{disp} = H \cdot M \quad (mm^2)$$

$$S_{disp} = 122 \cdot 24 = 2928 \text{ mm}^2$$

Scelto il tipo di lamierino, scelto lo spessore del nucleo ferromagnetico scelto il rocchetto adatto alle nostre esigenze, è opportuno aggiornare i calcoli:

$$S_{fe} = \frac{Sp \cdot C}{K_s} \quad (cm^2)$$

$$S_{fe} = \frac{5 \cdot 5}{1,11} = 22,5 \text{ cm}^2$$

Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro

Conoscendo lo spessore del singolo lamierino $sl=0,5mm$, e lo spessore del pacco lamellare Sp :

$$N_L = \frac{Sp}{K_s \cdot sl} \quad (\text{lamierini})$$

$$N_L = \frac{5}{1,11 \cdot 0,05} = 90 \text{ lamierini}$$

Considerando il peso di un centimetro di spessore di pacco lamellare Gf calcolo il peso totale del pacco lamellare:

$$Gl = Gf \cdot Sp \quad (Kg)$$

$$Gl = 3,350 \cdot 5 = 16,8 \text{ Kg}$$

Conoscendo la cifra di perdita specifica del lamierino $ws = 3W/Kg$ si possono valutare le perdite nel ferro pf del nucleo ferromagnetico:

$$pf = B^2 \cdot ws \cdot Gl \quad (\text{watt})$$

$$pf = 1^2 \cdot 3 \cdot 16,8 = 50,3 \text{ watt}$$

Numero Spire

La valutazione del numero delle spire dell'avvolgimento primario e secondario si effettua in relazione ai volt per spira:

$$e = 4,44 \cdot f \cdot Sfe \cdot B \cdot 10^{-4} \quad (V)$$

$$e = 4,44 \cdot 50 \cdot 22,5 \cdot 1 \cdot 10^{-4} = 0,5V$$

Al secondario si verifica una caduta di tensione % in relazione alla potenza del trasformatore:

$$v\% = \frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{PL}{2} + 2,72\right)\right)^{1,35}} \quad (\%)$$

$$\frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{1154}{2} + 2,72\right)\right)^{1,35}} = 3,28 \quad (\%)$$

Si può pertanto scrivere la relazione relativa alla tensione secondaria a vuoto:

$$V_{avv20} = \left(1 + \frac{v\%}{100}\right) \cdot V_{avv2} \quad (V)$$

$$V_{avv20} = \left(1 + \frac{3,28}{100}\right) \cdot 73,3 = 75,7V$$

Calcoliamo le spire di un avvolgimento primario

$$N_1 = \frac{V_{avv1}}{e} \quad (\text{spire})$$

$$N_1 = \frac{220}{0,5} = 439 \text{ spire}$$

Calcoliamo le spire di un avvolgimento secondario, considerando la tensione secondaria a vuoto

$$N_2 = \frac{V_{avv20}}{e} \quad (\text{spire})$$

$$N_2 = \frac{75,7}{0,5} = 152 \text{ spire}$$

Ovviamente nell'esecuzione dell'avvolgimento Primario o dell'avvolgimento Secondario considerare che:

Per realizzare un collegamento a Triangolo, o Stella, o Bifase si deve avvolgere 1 avvolgimento su ogni colonna per un totale di 3 avvolgimenti.

Per realizzare un collegamento a Zig-Zag si devono avvolgere 2 avvolgimenti su ogni colonna per un totale di 6 avvolgimenti.

Diametro dei Conduttori

Dalla corrente e dalla densità di corrente si trova il diametro del filo di rame nudo, poi dalla tabella filo rame si sceglie il valore più prossimo.

$$\phi r = 2 \cdot \sqrt{\frac{I}{J \cdot \pi}} \quad (mm)$$

$$\phi r_1 = 2 \cdot \sqrt{\frac{1,87}{2,5 \cdot \pi}} = 0,95 \quad (mm)$$

$$\phi r_2 = 2 \cdot \sqrt{\frac{2,62}{2,5 \cdot \pi}} = 1,15 \quad (mm)$$

Dalla tabella Filo Rame scegli questi fili con le seguenti misure:

Diametro Filo Nudo ϕ_N (mm)	Diametro Filo Isolato ϕ_I (mm)	Sezione filo rame nudo Sf (mm ²)	n° di Spire in 1 cm di spazio N_{spcm}	Coefficien. di Riempimento Kf	Resistenza di 1m di filo Rf (Ω)	Peso di 1m di filo di rame Pf (gr/m)
0,9	0,97	0,6362	9,27	1,11	0,0277	5,6619
1,1	1,19	0,9503	7,56	1,11	0,0185	8,4580

Lunghezza filo avvolgimento e peso del rame

La lunghezza della spira media attorno al rocchetto è:

$$l_{spm} = 2 \cdot (Cr + M) + 2 \cdot (Spr + M) \quad (mm)$$

$$l_{spm} = 2 \cdot (51 + 24) + 2 \cdot (51 + 24) = 300 \text{ mm}$$

La lunghezza totale del filo dell'avvolgimento in relazione al numero di spire:

$$l_{avv} = l_{spm} \cdot N \cdot 10^{-3} \quad (m)$$

$$l_{avv1} = 300 \cdot 439 \cdot 10^{-3} = 131,7 \text{ m}$$

$$l_{avv2} = 300 \cdot 152 \cdot 10^{-3} = 45,6 \text{ m}$$

se Zig-Zag c'è un avvolgimento in più:

$$l_{avv2} = 300 \cdot 152 \cdot 10^{-3} = 45,6 \text{ m}$$

Considerando il peso di un metro di filo di rame Pf calcolo il peso rame totale degli avvolgimenti:

$$Gr = Pf \cdot l_{avv} \cdot 10^{-3} \quad (Kg)$$

$$Gr_1 = 5,6619 \cdot 131,7 \cdot 10^{-3} = 0,745 \text{ Kg}$$

$$Gr_2 = 8,4580 \cdot 45,6 \cdot 10^{-3} = 0,385 \text{ Kg}$$

se Zig-Zag c'è un avvolgimento in più:

$$Gr_2 = 8,4580 \cdot 45,6 \cdot 10^{-3} = 0,385 \text{ Kg}$$

Resistenza degli avvolgimenti

Considerando la resistenza di un metro di filo di rame Rf calcolo la resistenza totale degli avvolgimenti:

$$R = Rf \cdot l_{avv} \quad (\Omega)$$

$$R_1 = 0,0277 \cdot 131,7 = 3,64 \Omega$$

$$R_2 = 0,0185 \cdot 45,6 = 0,84 \Omega$$

se Zig-Zag c'è un avvolgimento in più:

$$R_2 = 0,0185 \cdot 45,6 = 0,84 \Omega$$

Perdite nel Rame

Determiniamo il nuovo valore di densità di corrente in relazione al filo utilizzato, poi conoscendo il peso del rame avvolgimento calcoliamo la potenza persa nel rame.

$$J = \frac{A}{S_f} \quad (A/mm^2)$$

$$J_1 = \frac{1,87}{0,6362} = 2,9 \text{ A/mm}^2$$

$$J_2 = \frac{2,62}{0,9503} = 2,8 \text{ A/mm}^2$$

se Zig-Zag c'è un avvolgimento in più:

$$J_2 = \frac{2,62}{0,9503} = 2,8 \text{ A/mm}^2$$

In relazione ai conduttori scelti la densità di corrente rientra nei limiti stabiliti, per cui si procede con il calcolo della potenza persa nel rame:

$$pr = 2,4 \cdot J^2 \cdot Gr \quad (\text{watt})$$

$$pr_1 = 2,4 \cdot 2,9^2 \cdot 0,745 = 15,5 \text{ watt}$$

$$pr_2 = 2,4 \cdot 2,8^2 \cdot 0,384 = 7,1 \text{ watt}$$

se Zig-Zag c'è un avvolgimento in più:

$$pr_2 = 2,4 \cdot 2,8^2 \cdot 0,384 = 7,1 \text{ watt}$$

Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento

La tabella filo rame fornisce anche il numero delle spire che possono essere contenute assialmente in un centimetro N_{spcm} .

In base all'altezza H della finestra del rocchetto si può stabilire quante spire stanno in uno strato:

$$S_{Str} = H \cdot N_{spcm} \quad (\text{spire} \cdot \text{strato})$$

$$S_{Str1} = 12,2 \cdot 9,27 = 113,1 \text{ spire} \cdot \text{strato}$$

$$S_{Str2} = 12,2 \cdot 7,56 = 92,3 \text{ spire} \cdot \text{strato}$$

se Zig-Zag c'è un avvolgimento in più:

$$S_{Str2} = 12,2 \cdot 7,56 = 92,3 \text{ spire} \cdot \text{strato}$$

Considerando le spire totali si possono calcolare anche il numero degli strati necessari

$$N_{Str} = \frac{N}{S_{Str}} \quad (\text{strati})$$

$$N_{Str1} = \frac{439}{113,1} = 3,9 \text{ strati}$$

$$N_{Str2} = \frac{151}{92,3} = 1,6 \text{ strati}$$

se Zig-Zag c'è un avvolgimento in più:

$$N_{Str2} = \frac{151}{92,3} = 1,6 \text{ strati}$$

Controllo Ingombri

Calcoliamo l'Ingombro Rame considerando il diametro filo rame isolato come se fosse di sezione quadrata in modo da tenere conto anche degli spazi d'aria fra spira e spira, che moltiplichiamo per il numero di spire e per il coefficiente di riempimento Kf che tiene conto di una certa tolleranza nell'esecuzione dell'avvolgimento.

$$Ing_R = \phi_i^2 \cdot N \cdot Kf \quad (mm^2)$$

$$Ing_{R1} = 0,97^2 \cdot 439 \cdot 1,11 = 459 \text{ mm}^2$$

$$Ing_{R2} = 1,19^2 \cdot 152 \cdot 1,11 = 239 \text{ mm}^2$$

se Zig-Zag c'è un avvolgimento in più:

$$Ing_{R2} = 1,19^2 \cdot 152 \cdot 1,11 = 239 \text{ mm}^2$$

Totale Ingombro Rame

$$Ing_{Rtot} = \Sigma Ing_{Rx} \quad (\text{mm}^2)$$

$$Ing_{Rtot} = 459 + 239 + 239 = 937 \text{ mm}^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Strati. Supponendo di interporre fra ogni strato di spire un cartoncino isolante di spessore $I_{st}=0,2\text{mm}$,

$$Ing_{IST} = I_{ST} \cdot H \cdot \text{int}(N_{Str}) \quad (\text{mm}^2)$$

$$Ing_{IST1} = 0,2 \cdot 122 \cdot (3) = 73,2 \text{ mm}^2$$

$$Ing_{IST2} = 0,2 \cdot 122 \cdot (1) = 24,4 \text{ mm}^2$$

se Zig-Zag c'è un avvolgimento in più:

$$Ing_{IST2} = 0,2 \cdot 122 \cdot (1) = 24,4 \text{ mm}^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Strati:

$$Ing_{ISTot} = \Sigma Ing_{ISTx} \quad (\text{mm}^2)$$

$$Ing_{ISTot} = 73,2 + 24,4 + 24,4 = 122 \text{ mm}^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti. Terminata la costruzione alla fine di tutti gli avvolgimenti e fra un avvolgimento e l'altro supponiamo di inserire un cartoncino isolante di spessore $I_{av}=0,5\text{mm}$.

$$Ing_{IAV} = I_{AV} \cdot H \quad (\text{mm}^2)$$

$$Ing_{IAV} = 0,5 \cdot 122 = 61 \text{ mm}^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti:

Essendo $n^{\circ}Avv$ il numero di avvolgimenti primari e secondari che compongono il trasformatore.

$$Ing_{IAVtot} = Ing_{IAV} \cdot n^{\circ}Avv \quad (\text{mm}^2)$$

$$Ing_{IAVtot} = 61 \cdot 3 = 183 \text{ mm}^2$$

Calcoliamo l'ingombro totale maggiorandolo di un coefficiente di ingombro percentuale $Ki=10\%$ che tiene conto delle imperfezioni nella realizzazione dell'avvolgimento e degli eventuali spazi d'aria.

$$Ing_{TOT} = Ing_{Rtot} + Ing_{ISTot} + Ing_{IAVtot} \cdot \left(1 + \frac{Ki\%}{100}\right) \quad (\text{mm}^2)$$

$$Ing_{TOT} = 937 + 122 + 183 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) = 1367 \text{ mm}^2$$

Il valore dell' ingombro totale è minore dello spazio offerto dal rocchetto, quindi gli avvolgimenti saranno contenuti nel rocchetto comodamente.

Verifica controllo, rendimento e caduta di tensione

Verifica del Rendimento % considerando le eventuali perdite calcolate:

$$\eta\% = \frac{P}{P + pf + pr} \cdot 100 \quad (\%)$$

$$\eta\% = \frac{1154}{1154 + 50,3 + 15,5 + 7,1} \cdot 100 = 94\%$$

Calcolo della caduta di tensione secondaria considerando le eventuali perdite calcolate:

$$v2 = \frac{pr_1 \cdot N_2}{I_1 \cdot N_1} + \frac{pr_2}{I_2} \quad (V)$$

$$v2 = \frac{15,5 \cdot 152}{1,87 \cdot 439} + \frac{7,1}{2,62} = 5,57 V$$

Calcolo della tensione secondaria a carico:

$$Vc = V_{20} - v2 \quad (V)$$

$$Vc = 75,7 - 5,57 = 70,12 V$$

Verifica della Caduta di Tensione %:

$$v\% = \frac{V_2 - Vc}{Vc} \cdot 100 \quad (\%)$$

$$v\% = \frac{73,3 - 70,12}{70,12} \cdot 100 = 4,5\%$$

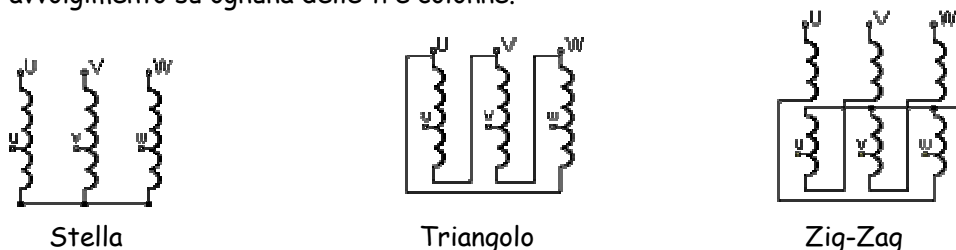
Concludendo possiamo dire che il rendimento e la caduta di tensione % si discostano di poco rispetto ai valori calcolati in precedenza.

Comunque lo scopo di queste ultime verifiche è quello di capire se il dimensionamento del trasformatore è corretto, ed eventualmente se ne è il caso, correggere alcuni parametri in modo da rientrare con un rendimento e una c.d.t.% pressappoco nei valori previsti.

Dimensionamento di un AutoTrasformatore Trifase in aria

Un autotrasformatore trifase può considerarsi come costituito da tre autotrasformatori monofasi opportunamente collegati. Quindi valgono le stesse regole del autotrasformatore monofase.

L'avvolgimento primario e secondario sono riuniti in un unico avvolgimento, ovviamente esiste un avvolgimento su ognuna delle tre colonne.



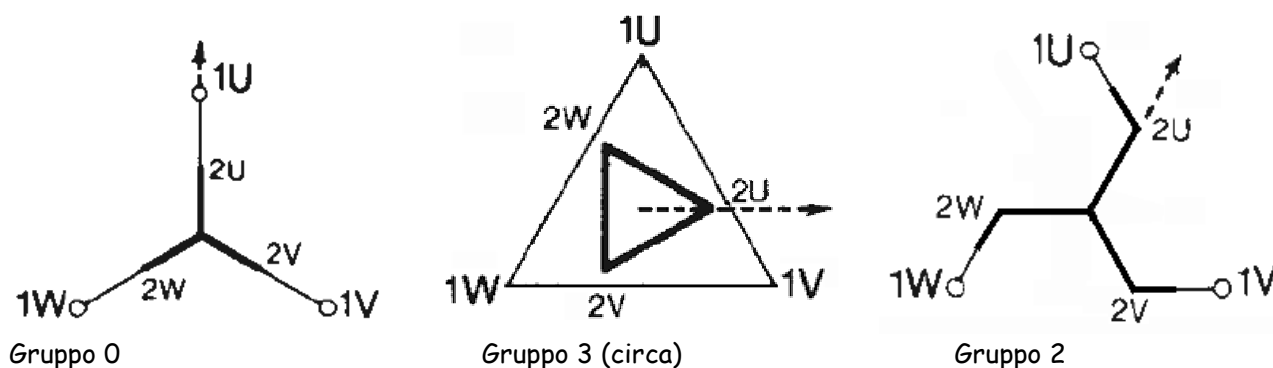
Spostamento di fase dell'autotrasformatore trifase

Come già descritto per i trasformatori trifasi anche negli autotrasformatori trifasi ha inoltre importanza l'eventuale spostamento di fase della tensione secondaria rispetto alla tensione primaria. Ciò interessa agli effetti del collegamento in parallelo di autotrasformatori, che è possibile effettuare solo se questi sono perfettamente uguali (stessa potenza, stesso collegamento, stesso numero spire, stessa variazione di tensione da vuoto a carico).

Nell'autotrasformatore con collegamento a Stella indifferentemente dal punto in cui viene prelevata la presa di uscita che identifica il secondario sull'intero avvolgimento, la tensione secondaria può soltanto essere in fase, cioè equivale a uno spostamento di fase rispettivamente di 0° (gruppo 0).

Nell'autotrasformatore con collegamento a Triangolo il punto in cui viene prelevata la presa di uscita che identifica il secondario sull'intero avvolgimento determina un diverso spostamento di fase progressivo, la tensione secondaria può essere da in fase fino a 120° sfasata rispetto alla tensione primaria, cioè equivale a uno spostamento di fase progressivo da 0° fino a 120° (da gruppo 0 a gruppo 4).

Nell'autotrasformatore con collegamento a Zig-Zag il punto in cui viene prelevata la presa di uscita che identifica il secondario sull'intero avvolgimento determina un diverso spostamento di fase in relazione all'avvolgimento superiore o inferiore in cui viene realizzata la presa, la tensione secondaria può essere o in fase oppure 60° sfasata rispetto alla tensione primaria, cioè equivale a uno spostamento di fase rispettivamente di 0° oppure 60° (gruppo 0 oppure gruppo 2). Se la presa è nell'avvolgimento superiore si ha gruppo 0, se invece è nell'avvolgimento inferiore gruppo 2.



Elementi da prefissare

Conoscendo i seguenti dati di partenza è possibile calcolare un trasformatore in aria:

$PL_2 = 1000$ potenza di linea disponibile al secondario in voltampere VA.

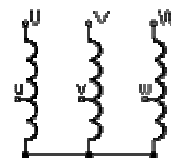
$f = 50$ frequenza alla quale dovrà funzionare il trasformatore in Hz.

$VL_1 = 380$ tensione di linea di alimentazione dell'avvolgimento primario.

$VL_2 = 220$ tensione di linea che dovrà fornire l'avvolgimento secondario a pieno carico.

$B = 1$ Induzione Magnetica in Wb/m² alla quale si vuole far funzionare il trasformatore.

Tipo di collegamento: Stella

**Calcolo della Potenza Totale secondario**

In relazione al tipo di collegamento si calcola la potenza totale secondario, cioè quella che viene riflessa verso l'avvolgimento primario:

Collegamento a Stella

$$PL = PL_2 \quad (\text{VA}) \qquad 1000 = 1000 \quad (\text{VA})$$

Parametri di Singolo Avvolgimento Secondario

In relazione al tipo di collegamento si calcolano i parametri del singolo avvolgimento:

E' stato scelto un Collegamento a Stella

$$\begin{aligned} V_{avv2} &= \frac{VL_2}{\sqrt{3}} \quad (\text{V}) & P_{avv2} &= \frac{PL_2}{3} \quad (\text{VA}) & I_{avv2} &= \frac{P_{avv2}}{V_{avv2}} \quad (\text{A}) \\ \frac{220}{\sqrt{3}} &= 127 \text{ V} & \frac{1000}{3} &= 333,3 \text{ VA} & \frac{333,3}{127} &= 2,62 \text{ A} \end{aligned}$$

Parametri di Singolo Avvolgimento Primario

Dalla Potenza Totale Secondario si trova il Rendimento percentuale:

$$\eta = 60 + \left(\frac{\log_e (PL + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (PL + 1000)} \right) (\%) \qquad 60 + \left(\frac{\log_e (1000 + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (1000 + 1000)} \right) = 93,4 (\%)$$

La potenza dell'avvolgimento primario va considerata aumentata in funzione del rendimento:

$$PL_1 = \frac{PL}{\eta} \quad (\text{VA}) \qquad \frac{1000}{0,934} = 1070 \text{ VA}$$

E' stato scelto un Collegamento a Stella

$$\begin{aligned} V_{avv1} &= \frac{VL_1}{\sqrt{3}} \quad (\text{V}) & P_{avv1} &= \frac{PL_1}{3} \quad (\text{VA}) & I_{avv1} &= \frac{P_{avv1}}{V_{avv1}} \quad (\text{A}) \\ \frac{380}{\sqrt{3}} &= 219,4 \text{ V} & \frac{1070}{3} &= 356 \text{ VA} & \frac{356}{219,4} &= 1,62 \text{ A} \end{aligned}$$

Corrente primario e secondario

Essendo un Autotrasformatore Abbassatore calcoliamo I_s e I_d :

$$I_s = I_{avv1} \qquad I_s = 1,62 \text{ A}$$

$$I_d = I_{avv2} - I_{avv1} \qquad I_d = 2,62 - 1,62 = 1 \text{ A}$$

Potenze dell'Autotrasformatore

Al secondario si verifica una caduta di tensione % in relazione alla potenza del trasformatore:

$$v\% = \frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{PL}{2} + 2,72\right)\right)^{1,35}} (\%) \quad \frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{1000}{2} + 2,72\right)\right)^{1,35}} = 3,4 (\%)$$

Si può pertanto scrivere la relazione relativa alla tensione secondaria a vuoto:

$$V_{avv20} = \left(1 + \frac{v\%}{100}\right) \cdot V_{avv2} \quad (V) \quad V_{avv20} = \left(1 + \frac{3,4}{100}\right) \cdot 127 = 131,3V$$

Essendo V_H la tensione più elevata e V_L la tensione più bassa dell'autotrasformatore. Calcoliamo il fattore di riduzione Kr : e di seguito ricaviamo il valore della Potenza Propria.

$$Kr = \frac{V_H - V_L}{V_H} \quad Kr = \frac{219,4 - 127}{219,4} = 0,4211$$

$$Pp = Kr \cdot PL \quad (VA) \quad Pp = 0,4211 \cdot 1000 = 421,1 VA$$

Formato Lamierino

Tramite questa formula pratica si può trovare la superficie totale del Lamierino più adatto:

$$A \times B = 20 \cdot \sqrt{Pp} \quad (cm^2) \quad A \times B = 20 \cdot \sqrt{421,1} = 410 \quad cm^2$$

Dal valore di $A \times B$ ottenuto, utilizzando le formule specifiche del lamierino da noi scelto (vedi tabelle lamierini) si ricava la misura della colonna centrale C , di seguito tutte le altre quote del lamierino.

Dalla Tabella Lamierini scelgo questo lamierino con le seguenti misure:

AxB(cm ²)	A(mm)	B(mm)	C(mm)	D(mm)	E(mm)	F(mm)	G(mm)	Tipo	Gf(Kg/1cm)
360	180	200	40	40	100	40	40	EI200	2,144

Sezione del Nucleo Ferromagnetico di una colonna

Il valore della Sezione Nucleo Ferromagnetico si calcola in funzione del coefficiente di dimensionamento Kd e della potenza secondaria.

$$Sfe = Kd \cdot \sqrt{\frac{Pp}{3}} \quad (cm^2) \quad Sfe = 1,3 \cdot \sqrt{\frac{421,1}{3}} = 15,4 \quad cm^2$$

Dalla Sezione del Nucleo Ferromagnetico e dalla dimensione C del lamierino si ricava lo Spessore del pacco di lamierini, tenendo in considerazione anche il coefficiente di stipamento lamierini K_s .

$$Sp = \frac{Sfe}{C} \cdot K_s \quad (cm) \quad Sp = \frac{15,4}{4} \cdot 1,11 = 4,27 \quad cm$$

Conoscendo le misure del lamierino e dello spessore pacco è necessario trovare un rocchetto di idonee dimensioni. Da un catalogo scelgo un rocchetto in plastica con le seguenti misure:

Cr=41mm	Spr=41mm	M=19mm	H=97mm
---------	----------	--------	--------

Ovviamente occorreranno tre rocchetti uguali uno per ogni colonna del lamierino.

Lo spazio disponibile che offre questo rocchetto per ospitare gli avvolgimenti è dato da:

$$Sdisp = H \cdot M \quad (mm^2) \quad Sdisp = 97 \cdot 19 = 1843 \quad mm^2$$

Scelto il tipo di lamierino, scelto lo spessore del nucleo ferromagnetico scelto il rocchetto adatto alle nostre esigenze, è opportuno aggiornare i calcoli:

$$Sfe = \frac{Sp \cdot C}{K_s} \quad (cm^2) \quad \frac{4 \cdot 4}{1,11} = 14,4 \quad cm^2$$

Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro

Conoscendo lo spessore del singolo lamierino $sl=0,5mm$, e lo spessore del pacco lamellare Sp :

$$N_L = \frac{Sp}{K_s \cdot sl} \quad (lamierini) \quad N_L = \frac{4}{1,11 \cdot 0,05} = 72 \quad lamierini$$

Considerando il peso di un centimetro di spessore di pacco lamellare G_f calcolo il peso totale del pacco lamellare:

$$G_l = G_f \cdot S_p \quad (Kg)$$

$$G_l = 2,144 \cdot 4 = 8,576 \text{ Kg}$$

Conoscendo la cifra di perdita specifica del lamierino $ws = 3W/Kg$ si possono valutare le perdite nel ferro pf del nucleo ferromagnetico:

$$pf = B^2 \cdot ws \cdot G_l \quad (watt)$$

$$pf = 1^2 \cdot 3 \cdot 8,576 = 25,72 \text{ watt}$$

Numero Spire

La valutazione del numero delle spire dell'avvolgimento primario e secondario si effettua in relazione ai volt per spira:

$$e = 4,44 \cdot f \cdot S_{fe} \cdot B \cdot 10^{-4} \quad (V)$$

$$e = 4,44 \cdot 50 \cdot 14,4 \cdot 1 \cdot 10^{-4} = 0,320V$$

Calcoliamo le spire di un avvolgimento primario

$$N_1 = \frac{V_{avv1}}{e} \quad (spire)$$

$$N_1 = \frac{219,4}{0,320} = 686 \text{ spire}$$

Calcoliamo le spire di un avvolgimento secondario, considerando la tensione secondaria a vuoto

$$N_2 = \frac{V_{avv20}}{e} \quad (spire)$$

$$N_2 = \frac{131,3}{0,320} = 410 \text{ spire}$$

Nel caso di Autotrasformatore Abbassatore calcoliamo N_s e N_d :

$$N_s = N_1 - N_2$$

$$N_s = 686 - 410 = 276 \text{ spire}$$

$$N_d = N_2$$

$$N_d = 410 \text{ spire}$$

Ovviamente nell'esecuzione dell'avvolgimento si deve avvolgere 1 avvolgimento N_s e 1 avvolgimento N_d su ogni colonna per un totale di 6 avvolgimenti:

Diametro dei Conduttori

Dalla corrente e dalla densità di corrente si trova il diametro del filo di rame nudo, poi dalla tabella filo rame si sceglie il valore più prossimo.

$$\phi_r = 2 \cdot \sqrt{\frac{I}{J \cdot \pi}} \quad (mm)$$

$$\phi_{r1} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1,62}{2,5 \cdot \pi}} = 0,90 \text{ (mm)}$$

$$\phi_{r2} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1}{2,5 \cdot \pi}} = 0,71 \text{ (mm)}$$

Dalla tabella Filo Rame scelgo questi fili con le seguenti misure:

Diametro Filo Nudo ϕ_N (mm)	Diametro Filo Isolato ϕ_I (mm)	Sezione filo rame nudo S_f (mm ²)	n° di Spire in 1 cm di spazio N_{spcm}	Coefficien. di Riempimento K_f	Resistenza di 1m di filo R_f (Ω)	Peso di 1m di filo di rame P_f (gr/m)
0,9	0,97	0,6362	9,27	1,11	0,0277	5,6619
0,7	0,76	0,3848	11,81	1,11	0,0457	3,4251

Lunghezza filo avvolgimento e peso del rame

La lunghezza della spira media attorno al rocchetto è:

$$l_{spm} = 2 \cdot (Cr + M) + 2 \cdot (Spr + M) \quad (mm)$$

$$l_{spm} = 2 \cdot (41 + 19) + 2 \cdot (41 + 19) = 240 \text{ mm}$$

La lunghezza totale del filo dell'avvolgimento in relazione al numero di spire:

$$l_{avv} = l_{spm} \cdot N \cdot 10^{-3} \quad (m)$$

$$l_{avv1} = 240 \cdot 276 \cdot 10^{-3} = 66 \text{ m}$$

$$l_{avv2} = 240 \cdot 410 \cdot 10^{-3} = 98 \text{ m}$$

Considerando il peso di un metro di filo di rame P_f calcolo il peso rame totale degli avvolgimenti:

$$Gr = P_f \cdot l_{avv} \cdot 10^{-3} \quad (Kg)$$

$$Gr_1 = 5,6619 \cdot 66 \cdot 10^{-3} = 0,374 \text{ Kg}$$

$$Gr_2 = 3,4251 \cdot 98 \cdot 10^{-3} = 0,336 \text{ Kg}$$

Resistenza degli avvolgimenti

Considerando la resistenza di un metro di filo di rame R_f calcolo la resistenza totale degli avvolgimenti:

$$R = R_f \cdot l_{avv} \quad (\Omega) \quad R_1 = 0,0277 \cdot 66 = 1,83 \Omega \quad R_2 = 0,0457 \cdot 98 = 4,5 \Omega$$

Perdite nel Rame

Determiniamo il nuovo valore di densità di corrente in relazione al filo utilizzato, poi conoscendo il peso del rame avvolgimento calcoliamo la potenza persa nel rame.

$$J = \frac{A}{S_f} \quad (A/mm^2) \quad J_1 = \frac{1,62}{0,6362} = 2,55 A/mm^2 \quad J_2 = \frac{1}{0,3848} = 2,59 A/mm^2$$

In relazione ai conduttori scelti la densità di corrente rientra nei limiti stabiliti, per cui si procede con il calcolo della potenza persa nel rame:

$$pr = 2,4 \cdot J^2 \cdot Gr \quad (\text{watt}) \quad pr_1 = 2,4 \cdot 2,55^2 \cdot 0,374 = 5,84 \text{ watt} \\ pr_2 = 2,4 \cdot 2,59^2 \cdot 0,336 = 5,41 \text{ watt}$$

Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento

La tabella filo rame fornisce anche il numero delle spire che possono essere contenute assialmente in un centimetro N_{spcm} .

In base all'altezza H della finestra del rocchetto si può stabilire quante spire stanno in uno strato:

$$S_{Str} = H \cdot N_{spcm} \quad (\text{spire} \cdot \text{strato}) \quad S_{Str1} = 9,7 \cdot 9,27 = 88,9 \text{ spire} \cdot \text{strato} \\ S_{Str2} = 9,7 \cdot 11,81 = 114,5 \text{ spire} \cdot \text{strato}$$

Considerando le spire totali si possono calcolare anche il numero degli strati necessari

$$N_{Str} = \frac{N}{S_{Str}} \quad (\text{strati}) \quad N_{Str1} = \frac{276}{89,9} = 3,1 \text{ strati} \quad N_{Str2} = \frac{410}{114,5} = 3,6 \text{ strati}$$

Controllo Ingombri

Calcoliamo l'Ingombro Rame considerando il diametro filo rame isolato come se fosse di sezione quadrata in modo da tenere conto anche degli spazi d'aria fra spira e spira, che moltiplichiamo per il numero di spire e per il coefficiente di riempimento K_f che tiene conto di una certa tolleranza nell'esecuzione dell'avvolgimento.

$$Ing_R = \phi_l^2 \cdot N \cdot K_f \quad (mm^2) \quad Ing_{R1} = 0,97^2 \cdot 276 \cdot 1,11 = 288,9 mm^2 \\ Ing_{R2} = 0,76^2 \cdot 410 \cdot 1,11 = 264 mm^2$$

Totale Ingombro Rame

$$Ing_{Rtot} = \Sigma Ing_{Rx} \quad (mm^2) \quad Ing_{Rtot} = 288,9 + 264 = 552,9 mm^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Strati. Supponendo di interporre fra ogni strato di spire un cartoncino isolante di spessore $I_{st}=0,2mm$,

$$Ing_{IST} = I_{ST} \cdot H \cdot \text{int}(N_{Str}) \quad (mm^2) \quad Ing_{IST1} = 0,2 \cdot 97 \cdot (3) = 58,2 mm^2 \\ Ing_{IST2} = 0,2 \cdot 97 \cdot (3) = 58,2 mm^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Strati:

$$Ing_{ISTot} = \Sigma Ing_{ISTx} \quad (mm^2) \quad Ing_{ISTot} = 58,2 + 58,2 = 116,4 mm^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti. Terminata la costruzione alla fine di tutti gli avvolgimenti e fra un avvolgimento e l'altro supponiamo di inserire un cartoncino isolante di spessore $I_{av}=0,5mm$.

$$Ing_{IAV} = I_{AV} \cdot H \quad (mm^2)$$

$$Ing_{IAV} = 0,5 \cdot 97 = 48,5 mm^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti:

Essendo $n^\circ Avv$ il numero di avvolgimenti primari e secondari che compongono il trasformatore.

$$Ing_{IAVtot} = Ing_{IAV} \cdot n^\circ Avv \quad (mm^2)$$

$$Ing_{IAVtot} = 48,5 \cdot 2 = 97 mm^2$$

Calcoliamo l'ingombro totale maggiorandolo di un coefficiente di ingombro percentuale $K_i=10\%$ che tiene conto delle imperfezioni nella realizzazione dell'avvolgimento e degli eventuali spazi d'aria.

$$Ing_{TOT} = Ing_{Rtot} + Ing_{ISTot} + Ing_{IAVtot} \cdot \left(1 + \frac{K_i\%}{100}\right) \quad (mm^2)$$

$$Ing_{TOT} = 552,9 + 116,4 + 97 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) = 843 mm^2$$

Il valore dell' ingombro totale è minore dello spazio offerto dal rocchetto, quindi gli avvolgimenti saranno contenuti nel rocchetto comodamente.

Verifica controllo, rendimento e caduta di tensione

Verifica del Rendimento % considerando le eventuali perdite calcolate:

$$\eta\% = \frac{P}{P + pf + pr} \cdot 100 \quad (\%)$$

$$\eta\% = \frac{1000}{1000 + 25,72 + 5,84 + 5,41} \cdot 100 = 96\%$$

Calcolo della caduta di tensione secondaria considerando le eventuali perdite calcolate:

$$v_2 = \frac{pr_1 \cdot Nd}{Is \cdot Ns} + \frac{pr_2}{Id} \quad (V)$$

$$v_2 = \frac{5,84 \cdot 410}{1,62 \cdot 276} + \frac{5,41}{1} = 10,76 V$$

Calcolo della tensione secondaria a carico:

$$V_c = V_{20} - v_2 \quad (V)$$

$$V_c = 131,3 - 10,76 = 120,53 V$$

Verifica della Caduta di Tensione %:

$$v\% = \frac{V_2 - V_c}{V_c} \cdot 100 \quad (\%)$$

$$v\% = \frac{127 - 120,53}{120,53} \cdot 100 = 5,3 \%$$

Concludendo possiamo dire che il rendimento e la caduta di tensione % si discostano di poco rispetto ai valori calcolati in precedenza.

Comunque lo scopo di queste ultime verifiche è quello di capire se il dimensionamento del trasformatore è corretto, ed eventualmente se ne è il caso, correggere alcuni parametri in modo da rientrare con un rendimento e una c.d.t.% pressappoco nei valori previsti.

Introduzione al Trasformatore di Uscita per Amplificatore Valvolare

Questo capitolo tratta separatamente la costruzione di Adattatori di Impedenza (trasformatori di uscita) per stadio asimmetrico (Single-Ended SE) e stadio simmetrico (Push-Pull PP). Per non confondere le idee e facilitare la conoscenza dei due tipi di adattatori di impedenza è stata ripetuta tutta la procedura di calcolo dall'inizio alla fine per entrambi i trasformatori di uscita.

Il trasformatore di uscita è costituito da un nucleo ferromagnetico di lamierini, e da due avvolgimenti di filo di rame smaltato; uno di essi è formato da molte spire e viene detto primario, l' altro è formato da poche spire e viene detto secondario. Il primario è inserito nel circuito fra il positivo alta tensione continua e l' anodo della valvola finale; il secondario è invece collegato direttamente alla bobina mobile dell' altoparlante o alla cassa acustica.

Generalità sul trasformatore di uscita

Il trasformatore di uscita ha la funzione di trasferire la potenza dell' amplificatore a bassa frequenza all' altoparlante, ciò non sarebbe possibile data la diversità tra le due impedenze. L'adattamento di impedenza tra la valvola o le valvole finali e l'altoparlante è importantissimo ai fini della qualità di riproduzione del suono, per cui il trasformatore di uscita è una delle sezioni più delicate del sistema di amplificazione. Possiamo dire che il trasformatore di uscita è un adattatore che serve per accoppiare due stadi ad impedenza diversa.

La bobina mobile dell' altoparlante è leggera e sottile per potersi muovere velocemente entro il sottile traferro del magnete, ed è formata solo da poche spire di filo di rame smaltato, per cui l'impedenza di carico (Z_c) che queste spire oppongono alle audiofrequenze risulta essere di pochi ohm (da 2Ω a 20Ω circa).

La valvola finale, invece si comporta come una resistenza di valore elevato, e funziona normalmente solo se nel suo circuito di anodo è presente una adeguata impedenza di carico, costituita dall' avvolgimento primario del trasformatore di uscita. Questa impedenza di carico che richiede la valvola dipende dal tipo di valvola utilizzata e dalle sue condizioni di lavoro, cioè dalle tensioni ad essa applicate, per cui l' impedenza di carico anodico di una valvola (Z_a) può essere diverse migliaia di ohm (da 1500Ω a 18000Ω circa)

Se inseriamo la bobina mobile dell' altoparlante direttamente sul circuito anodico dello stadio finale di bassa frequenza senza ricorrere al trasformatore di uscita questa si comporterebbe come una resistenza di pochi ohm posta in serie ad un'altra resistenza del valore di qualche migliaia di ohm: le due resistenze formerebbero un divisore di tensione dove ai capi della bobina mobile risulterebbe una tensione molto bassa praticamente zero volt, quindi l' altoparlante non sarebbe in grado di riprodurre la bassa frequenza ad elevata intensità.

Sarebbe possibile eliminare il trasformatore di uscita elevando l' impedenza della bobina mobile di circa un migliaio di volte, ma ciò richiederebbe un avvolgimento di moltissime spire, il che la appesantirebbe notevolmente. In passato venivano usati questi altoparlanti con bobina mobile ad alta impedenza di circa 3500Ω , il risultato era discreto ma non buono.

Il trasformatore di uscita è costituito da un avvolgimento primario con impedenza pari a quella richiesta dalla valvola finale dell' amplificatore e da un avvolgimento secondario di impedenza pari a quella della bobina mobile dell' altoparlante. Così si può dire che mentre nel circuito anodico della valvola finale vi è molta tensione e poca corrente, nel circuito della bobina mobile vi è poca tensione e molta corrente.

La qualità del trasformatore d'uscita

Il trasformatore di uscita è la parte più importante dell' amplificatore, perché solo se riesce a trasferire in modo perfetto tutta la banda audio frequenza all' altoparlante si può definire un trasformatore di qualità.

Nel caso di trasformatori di uscita normali per apparecchi radio le caratteristiche devono essere lineari tra 100 e 4500Hz, mentre negli amplificatori finali di qualità il trasformatore di uscita deve avere una banda passante compresa fra 50 e 10000Hz, ed infine negli impianti di alta fedeltà deve poter essere lineare da 20 a 20000Hz.

In tutti i trasformatori, verso le frequenze molto basse la permeabilità del nucleo tende ad opporsi al trasferimento lineare, è noto infatti che nei trasformatori d'alimentazione il nucleo ferromagnetico può essere diminuito con l' aumentare della frequenza di lavoro. In conformità a questo un trasformatore per frequenze molto basse dovrà avere dimensioni molto maggiori a parità di potenza resa, di un altro funzionante a frequenza più elevata. Verso le frequenze alte, entrano in gioco diversi fattori associati fra loro, come l'induttanza parassita degli avvolgimenti, le capacità parassite degli avvolgimenti, e l'insufficiente permeabilità del ferro, che può essere migliorata solo con l' impiego di lamierini speciali ad elevata permeabilità magnetica (silicio, permalloy, ecc...).

Caratteristiche di un buon trasformatore di uscita

I fattori che determinano la qualità di un buon trasformatore di uscita sono:

- ***Induttanza Primario*** solo se l' induttanza dell' avvolgimento primario è sufficientemente elevata, il trasformatore può trasferire al secondario e quindi all' altoparlante le frequenze più basse, diversamente tali frequenze vengono eliminate. Per ottenere un valore di induttanza elevata bisogna tenere alto per quanto possibile il numero delle spire primarie N_1 e la sezione del nucleo centrale S_{fe} .
- ***Capacità Primario*** la capacità parassita che si viene a creare fra spira e spira del primario deve essere più bassa possibile, poiché si trova in parallelo con l' induttanza del primario, e forma con esso un circuito risonante , la cui frequenza di risonanza deve cadere al di fuori della banda audio frequenze. Un buon trasformatore di uscita ha valori di capacità parassita sul primario che vanno da 200 a 300pF.
- ***Induttanza dispersa*** In un qualsiasi trasformatore esiste sempre una certa parte del flusso generato dal primario che non è raccolto dal secondario. L'entità di questa parte dipende principalmente dalla bontà di costruzione del trasformatore. Più è alta la frequenza di lavoro e maggiore può essere la perdita in questione che viene denominata flusso disperso.

Quando un flusso o parte di esso non viene utilizzato, il flusso disperso fa nascere negli avvolgimenti delle induttanze che non partecipano all' accoppiamento e che perciò risultano in serie a ciascun avvolgimento. Queste induttanze, pur essendo piccole, producono reattanze di dispersione le quali sviluppano delle controtensioni tanto maggiori quanto più elevata è la frequenza e tanto più intense sono le correnti che scorrono negli avvolgimenti. Queste controtensioni, in sostanza, si traducono in perdita di tensione nel secondario.

Quindi l'induttanza dispersa deve essere più bassa possibile, ed è dovuta alla qualità dell' avvolgimento. L' induttanza di dispersione è proporzionale al quadrato del numero delle spire dell'avvolgimento primario. Riducendo il numero delle spire si abbassa anche l'induttanza del primario quindi si peggiora la resa alle basse frequenze, ma è possibile ottenere ancora la medesima induttanza adoperando un materiale magnetico con maggiore permeabilità per il nucleo. Per abbassare l' induttanza dispersa occorre sezionare in più parti l' avvolgimento primario e secondario ed alternandone le sezioni allo scopo di migliorare l' accoppiamento magnetico, anche a costo di aumentare un po' la capacità parassita tra gli avvolgimenti. Un altro accorgimento è quello di adoperare nuclei magnetici piuttosto abbondanti e proporzionalmente ridurre le spire degli avvolgimenti.

Un buon trasformatore di uscita ha valori di induttanza dispersa sul primario che vanno da 15 a 20mH.

- ***Resistenza*** L'avvolgimento primario deve avere una resistenza da 100 a 300 ohm. Questo parametro dipende dal numero di spire e dalla sezione del filo con cui è avvolto il primario. Per diminuire la resistenza è sufficiente utilizzare un filo di sezione leggermente maggiore di quello richiesto.

Tra i requisiti sopra esposti alcuni entrano in contrasto tra di loro; l'elevata induttanza primaria comporta una forte resistenza dell' avvolgimento, dato il grande numero di spire di diametro forzatamente piccolo, ed una forte capacità parassita fra spira e spira; così come la bassa induzione (B)

alla quale si fa lavorare il ferro comporta un aumento delle dimensioni del nucleo ferromagnetico a scapito dell' induttanza primaria.

Per ottenere il compromesso migliore in modo da avere un' elevata induttanza e bassa capacità parassita è opportuno sezionare l'avvolgimento primario e secondario in più avvolgimenti, così facendo si sposta la risonanza tra induttanza e capacità all'estremo alto della gamma di lavoro. Qualora si desideri la risposta uniforme in frequenza fino a 20KHz, la frequenza di risonanza deve essere superiore a 60KHz.

Distorsioni sui trasformatori di uscita

Un trasformatore di uscita può dare luogo alle seguenti distorsioni:

- *Distorsione di frequenza* si può avere per tre cause principali: per scarsa induzione del primario, per eccessiva induttanza dispersa, infine per effetti di risonanza.
- *Distorsione di fase* provocata dalla controreazione presa dal secondario del trasformatore di uscita che produce delle oscillazioni a frequenza elevata dovute alla rotazione di fase provocata dall'induttanza dispersa e dalla capacità parassita.
- *Distorsione armonica* dovuta alla bassa induttanza primaria che alle basse frequenze provoca una diminuzione dell'impedenza primaria e di conseguenza una diminuzione del carico anodico sulla valvola finale. Tale distorsione può essere causata anche da una non linearità della variazione di flusso al variare della frequenza; per attenuare (non eliminare) questa distorsione occorre tenere basso il valore l'induzione magnetica, conviene non superare il limite massimo di $B = 0,7 \text{ Wb/m}^2$ per single-ended e $B = 0,9 \text{ Wb/m}^2$ per push-pull.

Materiali ferro-magnetici

Il trasformatore di uscita deve essere il più possibile lineare nella sua risposta, cioè deve riprodurre fedelmente al secondario senza distorsione la forma d'onda applicata al primario. Per fare questo si cerca di curare più accuratamente la parte ferro-magnetica (lamierini) cercando di usare dei lamierini che siano in grado di magnetizzarsi e smagnetizzarsi velocemente con bassi valori di intensità di campo (il suono risulta più dinamico). Per cui avremo che una piccola variazione della corrente anodica provocherà una debole variazione dell'intensità di campo magnetico ed il lamierino "sensibile" ne risentirà subito, tale sensibilità è definita da un parametro chiamato permeabilità magnetica.

I trasformatori di uscita di solito si costruiscono con lamierini normali o lamierini al silicio, cioè quei lamierini usati anche nella costruzione di trasformatori di alimentazione, ma se si vuole migliorare la qualità (specialmente alle alte frequenze) occorre usare particolari materiali ferro-magnetici pregiati dotati di una maggiore permeabilità magnetica come il Permalloy, Mumetal, ecc... ossia speciali leghe magnetiche contenenti ferro, cobalto, nichel, rame.

Intensità di campo magnetico

Un avvolgimento percorso da una corrente elettrica genera al suo interno un campo magnetico meglio chiamato come "intensità di campo magnetico" (simbolo H). Tale campo magnetico è proporzionale al valore della corrente I, al numero delle spire N che formano l'avvolgimento ed inversamente proporzionale alla lunghezza del circuito magnetico, la sua unità di misura è Amperespire su metro (Asp/m) secondo la seguente relazione:

$$H = \frac{N \cdot I}{l} \text{ (Asp / m)}$$

Induzione Magnetica

L'induzione magnetica come già descritto in precedenza per i trasformatori di alimentazione è un parametro molto importante nel calcolo del trasformatore di uscita. Questo parametro è responsabile del corretto funzionamento del ciclo di magnetizzazione del nucleo ferromagnetico. La scelta del valore di induzione magnetica 'B' più adeguata dipende dal tipo di materiale ferromagnetico utilizzato e dall'esperienza pratica acquisita sul campo nella costruzione di trasformatori. Tale scelta va ponderata in funzione del trasformatore di uscita che si desidera realizzare, sapendo che i trasformatori di uscita si dividono in due famiglie: Single-Ended e Push-Pull possiamo dire:

Per single-ended si può scegliere un valore di induzione magnetica 'B' compresa fra 0,3 e 0,7 Wb/m².

Per push-pull si può scegliere un valore di induzione magnetica 'B' compresa fra 0,6 e 1,1 Wb/m².

Permeabilità Magnetica

Ogni materiale magnetico ha una sua caratteristica specifica e si comporta in diversi modi quando è sottoposto a campi magnetici. La permeabilità magnetica μ rappresenta l'attitudine che possiede un certo materiale ferro-magnetico a lasciarsi attraversare dal flusso magnetico, si misura in Henry su metro (H/m). Quindi i materiali che possiedono una permeabilità magnetica elevata si magnetizzano molto intensamente anche con intensità di campo magnetico basso. La permeabilità magnetica non è sempre un valore costante e lineare, ma assume dei valori variabili in funzione del valore di induzione 'B'. La permeabilità magnetica del vuoto o dell'aria viene presa come riferimento, ed è definita permeabilità dell'aria μ_0 che vale:

$$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ (H / m)}$$

Per tutti gli altri materiali si indica la Permeabilità Relativa μ_r , relativa al materiale stesso, indicata da tabelle dove è ben visibile come varia la permeabilità al variare dell'induzione magnetica. Per ottenere la permeabilità assoluta μ si deve moltiplicare la permeabilità dell'aria con la permeabilità relativa:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \text{ (H / m)}$$

Nei calcoli del trasformatore di uscita non è importante sapere il valore della permeabilità assoluta, ma è importante assegnare il valore di induzione 'B' più appropriato. Se utilizziamo un altro lamierino, i calcoli sono sempre gli stessi, ovviamente con un lamierino ad elevata permeabilità ci accorgeremo in fase di ascolto la differenza.

Trasformatori di Uscita collegati in Serie

Avendo due o più trasformatori di uscita (meglio se tutti identici) possiamo collegarli in serie, cioè, gli avvolgimenti primari in serie nel circuito anodico ed gli avvolgimenti secondari in serie collegati ai capi della bobina mobile dell'altoparlante.

Si ottiene che il rapporto fra le impedenze non è variato, quindi non è cambiato neppure il rapporto di trasformazione K, ma c'è una variazione del valore delle impedenze primaria e secondaria complessiva. Per cui due trasformatori di uscita uguali di potenza 30VA, con impedenza primaria di 3500Ω, e impedenza secondaria 6Ω, se collegati in serie, si comportano come uno solo con impedenza primaria 7000Ω, e impedenza secondaria 12Ω.

L'impedenza complessiva Primaria e Secondaria dei trasformatori di uscita collegati in serie:

$$Z = Z_1 + Z_2 + \dots Z_n \quad Z = 3500 + 3500 = 7000 \text{ } \Omega \quad Z = 6 + 6 = 12 \text{ } \Omega$$

Come si vede nei due casi il rapporto di trasformazione K è sempre lo stesso:

$$K = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} \quad K = \sqrt{\frac{3500}{6}} = 24,15 \quad K = \sqrt{\frac{7000}{12}} = 24,15$$

La potenza complessiva è uguale alla somma delle potenze di tutti i trasformatori utilizzati:

$$P_{tot} = P_1 + P_2 + \dots P_n \quad P_{tot} = 30 + 30 = 60 \text{ VA}$$

Per meglio comprendere analizziamo gli avvolgimenti, supponiamo che il trasformatore di esame 3500Ω/6Ω sia realizzato con il seguente rapporto spire 2415/100 spire.

Come si vede nei due casi il rapporto di trasformazione K è sempre lo stesso:

$$K = \frac{N_1}{N_2} \quad K = \frac{2415}{100} = 24,15 \quad K = \frac{4830}{200} = 24,15$$

Trasformatori di Uscita collegati in Parallelo

Avendo due o più trasformatori di uscita (meglio se tutti identici) possiamo collegarli in parallelo, cioè, gli avvolgimenti primari in parallelo nel circuito anodico ed gli avvolgimenti secondari in parallelo collegati ai capi della bobina mobile dell'altoparlante.

Si ottiene che il rapporto fra le impedenze non è variato, quindi non è cambiato neppure il rapporto di trasformazione K , ma c'è una variazione del valore delle impedenze primaria e secondaria complessiva. Per cui due trasformatori di uscita uguali di potenza 30VA, con impedenza primaria di 3500Ω, e impedenza secondaria 6Ω, se collegati in parallelo, si comportano come uno solo con impedenza primaria 1750Ω, e impedenza secondaria 3Ω.

L'impedenza complessiva Primaria e Secondaria dei trasformatori di uscita collegati in parallelo:

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \dots + \frac{1}{Z_n}} \quad Z = \frac{1}{\frac{1}{3500} + \frac{1}{3500}} = 1750 \, \Omega \quad Z = \frac{1}{\frac{1}{6} + \frac{1}{6}} = 3 \, \Omega$$

Come si vede nei due casi il rapporto di trasformazione K è sempre lo stesso.

$$K = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} \quad K = \sqrt{\frac{3500}{6}} = 24,15 \quad K = \sqrt{\frac{1750}{3}} = 24,15$$

La potenza complessiva è uguale alla somma delle potenze di tutti i trasformatori utilizzati:

$$P_{tot} = P_1 + P_2 + \dots + P_n \quad P_{tot} = 30 + 30 = 60VA$$

Per meglio comprendere analizziamo gli avvolgimenti, supponiamo che il trasformatore i esame 3500Ω/6Ω sia realizzato con il seguente rapporto spire 2415/100 spire.

Come si vede nei due casi il rapporto di trasformazione K è sempre lo stesso:

$$K = \frac{N_1}{N_2} \quad K = \frac{2415}{100} = 24,15 \quad K = \frac{2415}{100} = 24,15$$

Trasformatori di Uscita collegati in Serie e in Parallelo

Avendo due o più trasformatori di uscita (meglio se tutti identici) possiamo collegarli in serie, cioè, gli avvolgimenti primari in serie nel circuito anodico ed gli avvolgimenti secondari in parallelo collegati ai capi della bobina mobile dell' altoparlante.

Si ottiene che il rapporto fra le impedenze è variato, quindi è cambiato anche il rapporto di trasformazione K , ma c'è anche una variazione del valore delle impedenze primaria e secondaria complessiva. Per cui due trasformatori di uscita uguali di potenza 30VA, con impedenza primaria di 3500Ω, e impedenza secondaria 6Ω, se collegati in serie e in parallelo, si comportano come uno solo con impedenza primaria 7000Ω, e impedenza secondaria 3Ω.

L'impedenza complessiva Primaria e Secondaria dei trasformatori di uscita collegati serie parallelo:

$$Z = 3500 + 3500 = 7000 \, \Omega \quad Z = \frac{1}{\frac{1}{6} + \frac{1}{6}} = 3 \, \Omega$$

Come si vede nei due casi il rapporto di trasformazione K è cambiato:

$$K = \sqrt{\frac{3500}{6}} = 24,15 \quad K = \sqrt{\frac{7000}{3}} = 48,3$$

La potenza complessiva è uguale alla somma delle potenze di tutti i trasformatori utilizzati:

$$P_{tot} = P_1 + P_2 + \dots + P_n \quad P_{tot} = 30 + 30 = 60VA$$

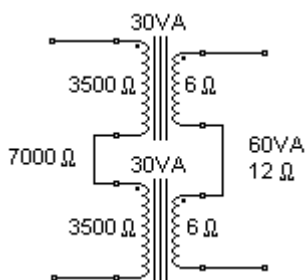
Per meglio comprendere analizziamo gli avvolgimenti, supponiamo che il trasformatore i esame 3500Ω/6Ω sia realizzato con il seguente rapporto spire 2415/100 spire.

Come si vede nei due casi il rapporto di trasformazione K cambia:

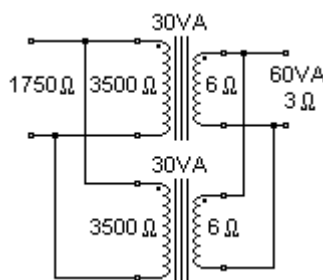
$$K = \frac{N_1}{N_2} \quad K = \frac{2415}{100} = 24,15 \quad K = \frac{4830}{100} = 48,3$$

Esempi di Trasformatori di Uscita collegati in Serie e in Parallelo per SE

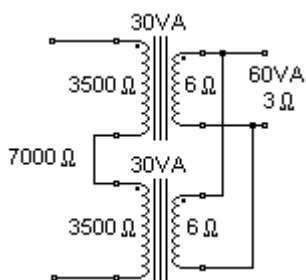
Avendo a disposizione due trasformatori per single-ended da 30VA $3500\Omega/6\Omega$, collegando gli avvolgimenti primari in serie e gli avvolgimenti secondari in serie si ottiene come risultato complessivo come se fosse un unico trasformatore di uscita da 60VA $7000\Omega/12\Omega$.



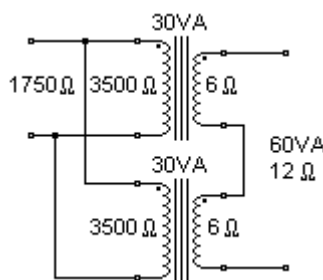
Avendo a disposizione due trasformatori per single-ended da 30VA $3500\Omega/6\Omega$, collegando gli avvolgimenti primari in parallelo e gli avvolgimenti secondari in parallelo si ottiene come risultato complessivo come se fosse un unico trasformatore di uscita da 60VA $1750\Omega/3\Omega$.



Avendo a disposizione due trasformatori per single-ended da 30VA $3500\Omega/6\Omega$, collegando gli avvolgimenti primari in serie e gli avvolgimenti secondari in parallelo si ottiene come risultato complessivo come se fosse un unico trasformatore di uscita da 60VA $7000\Omega/3\Omega$.

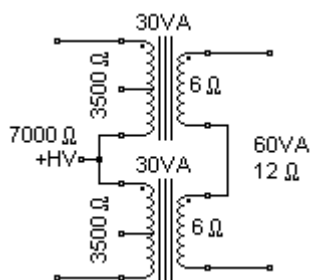


Avendo a disposizione due trasformatori per single-ended da 30VA $3500\Omega/6\Omega$, collegando gli avvolgimenti primari in parallelo e gli avvolgimenti secondari in serie si ottiene come risultato complessivo come se fosse un unico trasformatore di uscita da 60VA $1750\Omega/12\Omega$.

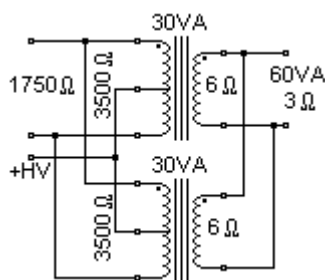


Esempi di Trasformatori di Uscita collegati in Serie e in Parallelo per PP

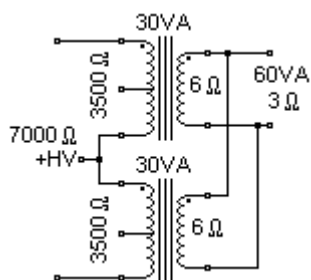
Avendo a disposizione due trasformatori per Push-Pull da 30VA $3500\Omega/6\Omega$, collegando gli avvolgimenti primari in serie e gli avvolgimenti secondari in serie si ottiene come risultato complessivo come se fosse un unico trasformatore di uscita da 60VA $7000\Omega/12\Omega$.



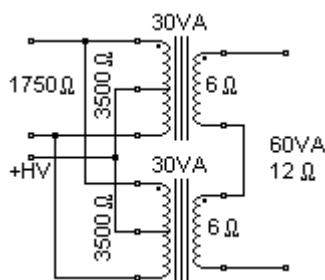
Avendo a disposizione due trasformatori per Push-Pull da 30VA $3500\Omega/6\Omega$, collegando gli avvolgimenti primari in parallelo e gli avvolgimenti secondari in parallelo si ottiene come risultato complessivo come se fosse un unico trasformatore di uscita da 60VA $1750\Omega/3\Omega$.



Avendo a disposizione due trasformatori per Push-Pull da 30VA $3500\Omega/6\Omega$, collegando gli avvolgimenti primari in serie e gli avvolgimenti secondari in parallelo si ottiene come risultato complessivo come se fosse un unico trasformatore di uscita da 60VA $7000\Omega/3\Omega$.



Avendo a disposizione due trasformatori per Push-Pull da 30VA $3500\Omega/6\Omega$, collegando gli avvolgimenti primari in parallelo e gli avvolgimenti secondari in serie si ottiene come risultato complessivo come se fosse un unico trasformatore di uscita da 60VA $1750\Omega/12\Omega$.



Valvole finali collegate in parallelo

Quando è necessario ottenere una potenza di uscita superiore a quella che un certo tubo elettronico può dare, si effettua il collegamento di due o più valvole in parallelo tutte dello stesso tipo. Questo significa che gli elementi corrispondenti dei vari tubi elettronici vengono connessi insieme. La potenza di uscita è proporzionale al numero delle valvole impiegate, mentre il segnale di griglia, o tensione eccitatrice, ha lo stesso valore richiesto da un solo tubo.

In questi casi il trasformatore di uscita va calcolato prendendo in esame tutte le valvole finali utilizzate, per cui:

Nella configurazione asimmetrica Single-Ended (SE) la potenza P sarà uguale alla potenza di una singola valvola finale per il numero delle valvole utilizzate; l'impedenza Z_a sarà uguale all'impedenza di una singola valvola diviso il numero delle valvole; la corrente I_a che circherà nel primario del trasformatore sarà uguale alla corrente richiesta da una sola valvola finale per il numero delle valvole utilizzate

Esempio SE in figura: con due valvole finali 6L6GC in parallelo si ha:

una potenza di $10,8 \times 2 = 21,6$ Watt

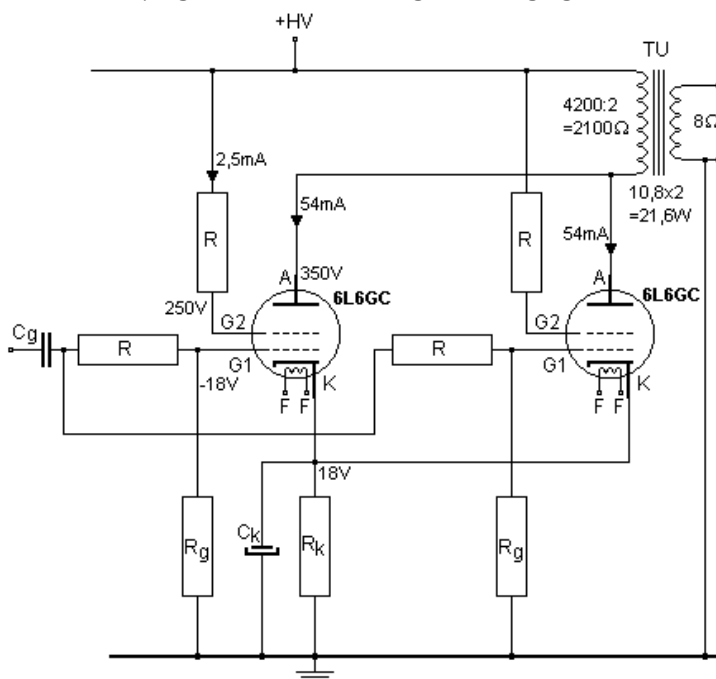
una impedenza di $4200:2 = 2100$ ohm

una corrente di $54\text{mA} \times 2 = 108\text{mA}$

per cui si costruisce un trasformatore con $P = 21,6\text{W}$

$Z_a = 2100\Omega$

$I_a = 108\text{mA}$.



Nella configurazione simmetrica

Push-Pull (PP)

la potenza P sarà uguale alla potenza erogata da una coppia di valvole finali per il numero di coppie di valvole utilizzate; l'impedenza Z_{aa} sarà uguale all'impedenza di una coppia di valvole, diviso il numero delle coppie di valvole, la corrente I_a che circherà nel primario del trasformatore sarà uguale alla corrente richiesta da una sola valvola finale per il numero delle coppie di valvole utilizzate

Esempio: con quattro valvole finali (2 coppie) di EL34, due a due in parallelo si ha:

una potenza di $55 \times 2 = 110$ Watt

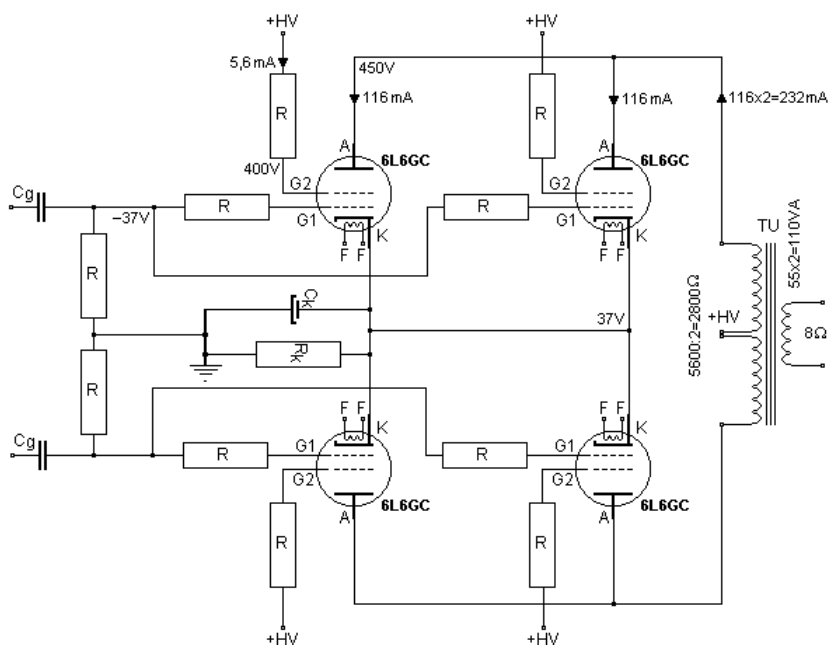
una impedenza di $5600:2 = 2800$ ohm

una corrente di $116\text{mA} \times 2 = 232\text{mA}$

per cui si costruisce un trasformatore con $P = 110\text{VA}$

$Z_{aa} = 2800\Omega$

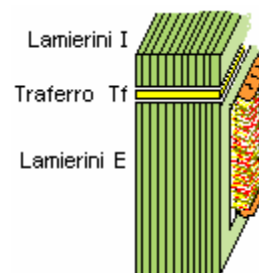
$I_a = 232\text{mA}$



Trasformatore di Uscita Asimmetrico (Single-Ended SE)

Il trasformatore di uscita per una valvola finale (stadio asimmetrico) presenta la particolarità di risultare soggetto nello stesso tempo sia alla corrente continua I_a che alimenta l'anodo della valvola finale, che a correnti alternate I_{ca} di frequenze diverse corrispondenti al suono. Essendo le correnti I_a e I_{ca} di senso concorde percorrono l'avvolgimento primario nello stesso senso. Quindi gli effetti magnetizzanti della corrente continua " I_a " nel trasformatore asimmetrico provoca una magnetizzazione molto forte tendendo a fare saturare il nucleo ferro-magnetico, impedendo il trasferimento di potenza. Per evitare questo si crea un traferro così da portare la saturazione del materiale ferro-magnetico a valori più elevati.

I lamierini che costituiscono il nucleo ferromagnetico vanno montati come se fosse un'induttanza, cioè prima si infilano tutte le "E" da una parte, poi dall'altra parte del rocchetto tutte le "I" si appoggiano alle "E" interponendo uno stato di cartoncino di spessore come da calcolo che funge da traferro. Per bloccare il trasformatore sarà necessario un serrapacco avendo cura di tenerlo isolato dai lamierini con dei pezzi di cartoncino.



Trasformatore di Uscita Simmetrico (Push-Pull PP)

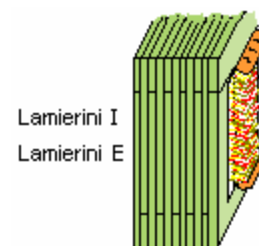
Il trasformatore di uscita per due valvole finali (stadio simmetrico) detto anche push-pull o controfase permette l'eliminazione del traferro " T_f " ma richiede la presa centrale nell'avvolgimento primario.

Le due valvole utilizzate in questo tipo di amplificatori devono essere dello stesso tipo con uguali caratteristiche, in modo da avere le stesse identiche condizioni di funzionamento (coppie di valvole).

Le correnti I_{a1} e I_{a2} sono rispettivamente le correnti della I° e della II° valvola, tali correnti percorrono l'avvolgimento primario entrando dalla presa centrale e uscendo dalle due estremità, per poi finire sugli anodi delle due valvole. Si capisce così che il primario è percorso dalle due correnti in senso contrario per cui se le correnti sono perfettamente uguali non si crea nessuna intensità di campo magnetico " H ", per ciò il traferro non è necessario.

Quindi gli effetti magnetizzanti della corrente continua " I_a " nel trasformatore simmetrico non esistono per cui il trasformatore sarà di dimensioni minori e minore sarà anche la distorsione, infatti i migliori amplificatori Hi-Fi utilizzano la configurazione Push-Pull con trasformatori di uscita simmetrici.

I lamierini che costituiscono il nucleo ferromagnetico vanno montati alternando le E e le I come per tutti i trasformatori standard di alimentazione, serrando bene il pacco lamellare per evitare dei traferri. Per bloccare il trasformatore sarà necessario un serrapacco avendo cura di tenerlo isolato dai lamierini con dei pezzi di cartoncino.



Avvolgimenti nei trasformatori di Uscita

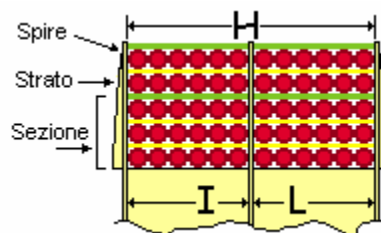
L'avvolgimento primario e secondario va scomposto in blocchi chiamati "sezioni", ogni sezione è composta da tanti "strati", ogni strato è composto un certo numero di spire, tante quante il rocchetto ne riesce a contenere in tutta la sua lunghezza senza sovrapporre le spire.

Il numero delle sezioni da fare è a scelta, dipende dal numero di spire dell'avvolgimento primario, normalmente una sezione di avvolgimento primario può contenere più o meno da 2 a 8 strati.

Dal calcolo si capisce di quante spire è composto l'avvolgimento, di quante spire occorrono per completare uno strato e quanti strati dobbiamo fare per completare l'avvolgimento. A questo punto possiamo valutare in quante sezioni suddividere l'avvolgimento.

Fra strato e strato bisogna interporre un giro di carta paraffinata, fra sezione e sezione interporre due giri di carta paraffinata.

Scomporre in sezioni l'avvolgimento primario; avere cura di isolare strati e sezioni; avvolgere in modo uniforme senza creare degli ammassamenti di spire; tutto questo per cercare di diminuire al massimo l'induttanza dispersa e le capacità parassite che si creano fra spira e spira.



Tutte le sezioni di primario devono essere collegate in serie, cioè la fine di una sezione va collegata con l'inizio della sezione successiva.

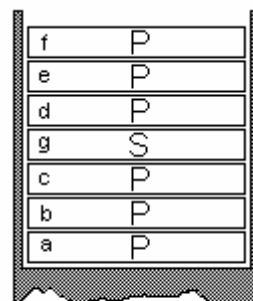
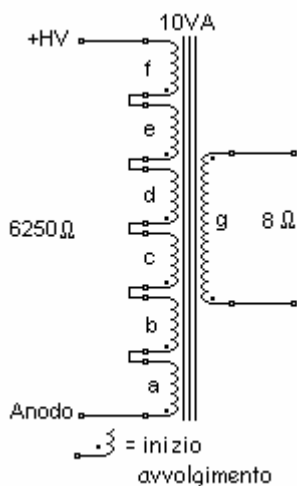
In mezzo alle sezioni primarie si inseriscono le sezioni secondarie al fine di ottenere degli avvolgimenti primari e secondari ben amalgamati fra loro.

Come avvolgere il trasformatore di uscita Asimmetrico Single-Ended

Avvolgere il trasformatore di uscita per una valvola finale (stadio asimmetrico) è molto simile alla costruzione di un normale trasformatore di alimentazione.

Per questo trasformatore occorre un normale rocchetto in plastica o in cartoncino ad un gola di dimensioni idonee a contenere dentro di sé i lamierini del nucleo ferromagnetico. Nella realizzazione gli avvolgimenti sia il primario che il secondario vanno avvolti tutti nello stesso senso, solo che il primario richiede più attenzioni.

Se decidiamo di scomporre il primario N1 in sei sezioni, l'unica sezione del secondario N2 va inserita a metà, fra la terza e la quarta sezione. Se per esempio l'avvolgimento primario N1 = 2400 spire posso dividerlo in sei sezioni così da ottenere $2400:6=400$ spire ogni sezione (vedi figura).



P Primario
S Secondario

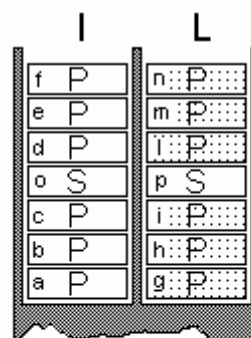
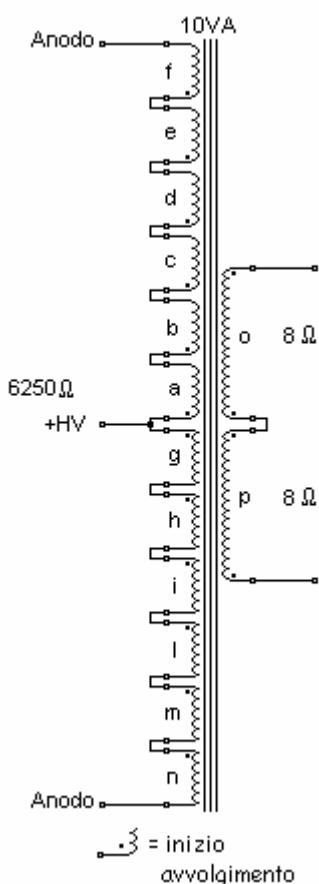
Come avvolgere il trasformatore di uscita Simmetrico Push-Pull

Avvolgere il trasformatore di uscita per due valvole finali (stadio simmetrico) è molto più difficoltoso perché necessita di alcuni accorgimenti.

Per questo trasformatore occorre un normale rocchetto in plastica o in cartoncino a due gole di dimensioni idonee a contenere dentro di sé i lamierini del nucleo ferromagnetico.

In una gola saranno contenuti gli avvolgimenti per la 'I°' valvola e nell'altra gola saranno contenuti gli avvolgimenti della 'II°' valvola. L'avvolgimento primario N1 calcolato rappresenta tutto il trasformatore, per cui va diviso in due, metà per ogni valvola, poi suddiviso in sezioni di avvolgimento. Tutte le spire primarie delle sezioni contenute nella gola 'I' dedicata alla 'I°' valvola saranno avvolte in senso antiorario, mentre tutte le spire primarie delle sezioni contenute nella gola 'L' dedicata alla 'II°' valvola saranno avvolte in senso orario.

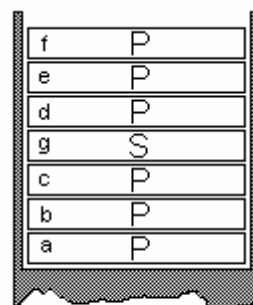
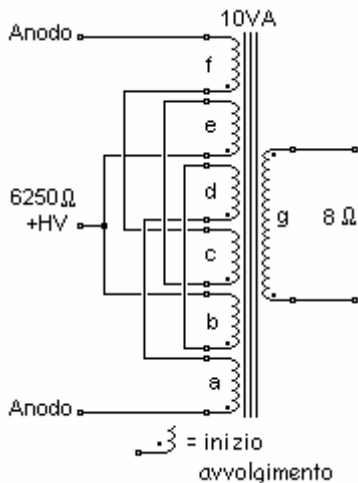
Ogni metà primario viene diviso per esempio in sei sezioni, l'avvolgimento secondario N2 va inserito a metà, fra la terza e quarta sezione di ogni gola. Se per esempio l'avvolgimento primario N1 = 2400 spire devo dividerlo in due parti $2400:2=1200$ spire per ogni gola, le quali posso dividerle in sei sezioni così da ottenere $1200:6=200$ spire ogni sezione (vedi figura).



P Primario
S Secondario

□ avvolgimento in
senso antiorario
■ avvolgimento in
senso orario

In mancanza di un rocchetto a due gole possiamo realizzare il trasformatore di uscita per Push-Pull anche utilizzando un rocchetto a semplice gola. Per far ciò si seguono le indicazioni già descritte per la costruzione degli avvolgimenti per trasformatori Single-Ended. L'unica differenza sostanziale sta nel collegamento in serie delle sezioni dell'avvolgimento primario che devono essere prese in un certo modo come indicato in figura per bilanciare il più possibile l'impedenza delle singole sezioni di spire al fine di creare la presa centrale.



P Primario
S Secondario

Mentre utilizzando un rocchetto a due gole la presa centrale del trasformatore alla quale si collega il +HV risulta essere all'inizio del rocchetto, utilizzando un rocchetto a singola gola la presa centrale del

trasformatore alla quale si collega il +HV risulta essere a circa metà del rocchetto.

Per questo motivo le sezioni di spire: $a = f$ devono avere lo stesso numero di spire, $b = e$ devono avere lo stesso numero di spire, $c = d$ devono avere lo stesso numero di spire.

Trasformatore di Uscita Ultralineare

Il collegamento ultralineare del trasformatore di uscita permette all'amplificatore di riprodurre una più vasta gamma di frequenze audio. La parte lineare della loro curva di risposta alle frequenze audio è molto più lunga di quella degli amplificatori convenzionali da ciò il termine ultralineari.

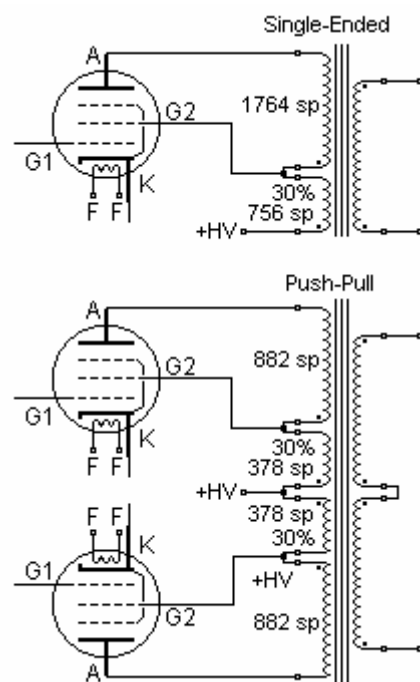
In questi amplificatori vengono utilizzati esclusivamente dei pentodi disposti in modo che possono funzionare anche come triodi. Le valvole finali degli ultralineari pur essendo pentodi, funzionano come se fossero dei triodi, senza però essere dei triodi, in quanto la loro griglia schermo 'g2' non è collegata alla placca 'A'. La griglia schermo dei pentodi finali è collegata ad una appropriata presa dell'avvolgimento primario del trasformatore di uscita. In tal modo, la stessa tensione di placca viene applicata alle griglie schermo. La presa al primario è importante, in quanto dalla sua posizione dipende il funzionamento dello stadio ultralineare. Se la presa è molto vicina alla placca, le valvole finali funzionano quasi da triodi, se invece è vicina alla presa di alimentazione dove è collegata l'alta tensione +HV, funzionano esclusivamente da pentodi.

In teoria, la presa per le griglie schermo deve trovarsi ad un punto tale che l'impedenza dell'avvolgimento sia del 18,5%, rispetto l'impedenza del primario misurata dalla presa +HV. In pratica la presa può venire fatta in punti compresi tra il 20% e il 40%. Più è alta la percentuale, più è bassa la distorsione, ma più è alta anche la diminuzione di guadagno.

Con il 18,5%, la distorsione risulta molto ridotta con minima riduzione della resa d'uscita. Tale minima riduzione è però relativa, in quanto si tratta, in media del 35%.

A seconda della presa per griglia schermo, varia l'impedenza dell'avvolgimento primario, e quindi il numero dei spire e il loro rapporto, ne consegue che sono necessari appositi trasformatori di uscita. Questo è il secondo inconveniente degli amplificatori ultralineari, il primo è quello della riduzione della resa d'uscita.

Teoricamente ma scarsamente utilizzato in pratica si può creare un avvolgimento di un certo numero di spire dedicato solo per la griglia schermo 'g2' in modo da non influenzare il corretto funzionamento dell'avvolgimento primario anodico. Questo comporta un aumento degli avvolgimenti del trasformatore



con conseguente aumento degli ingombri. Normalmente si preferisce derivare una appropriata presa ultralineaare dall'avvolgimento primario, anche perché la corrente I_{g2} che percorre la griglia schermo è molto bassa rispetto alla corrente anodica I_a (circa il 5%) e quindi poco influente.

Il numero di spire che costituisce questa presa ultralineaare o l'avvolgimento dedicato è uguale ad una percentuale da noi scelta in funzione del numero di spire di cui è realizzato l'avvolgimento primario.

In riferimento al calcolo del trasformatore di uscita push-pull descritto nelle pagine più avanti proviamo a fare qualche esempio:

L'avvolgimento primario $Z_{aa} = 6350 \Omega$ è composto da $N_{aa} = 2520$ spire suddivise nelle due gole in 28 strati di 90 spire ciascuno. In ogni gola ci sono $N_a = 1260$ spire suddivise in 3 sezioni rispettivamente di:

$$N_{SpStr} = N_{Str} \cdot S_{Str} \text{ (spire)} \quad 5 \cdot 90 = 450 \text{ spire}$$

$$N_{SpStr} = N_{Str} \cdot S_{Str} \text{ (spire)} \quad 4 \cdot 90 = 360 \text{ spire}$$

$$N_{SpStr} = N_{Str} \cdot S_{Str} \text{ (spire)} \quad 5 \cdot 90 = 450 \text{ spire}$$

Sfruttando le sezioni di spire già presenti evitando di creare una presa personalizzata per collegare la 'g2' possiamo valutare di collegarla alla fine della I° sezione di spire, per cui la percentuale di spire che definisce l'ultraleaare sarà:

$$\%_{Ultra} = \frac{N_{Ultra} \cdot 100}{N_a} \text{ (%) } \quad \%_{Ultra} = \frac{450 \cdot 100}{1260} = 35,7 \%$$

Valutiamo anche di collegarla alla fine della II° sezione di spire, per cui la percentuale di spire che definisce l'ultraleaare sarà:

$$\%_{Ultra} = \frac{N_{Ultra} \cdot 100}{N_a} \text{ (%) } \quad \%_{Ultra} = \frac{(450 + 360) \cdot 100}{1260} = 64,3 \%$$

In questo caso la presa di collegamento è sconsigliabile perché fuori dai limiti previsti.

Se invece decidiamo di creare un avvolgimento dedicato, oppure di derivare una presa per ultraleaare ad un valore esempio del 30% dobbiamo calcolare il numero di spire :

$$N_{Ultra} = \frac{N_a \cdot \%_{Ultra}}{100} \text{ (spire)} \quad N_{Ultra} = \frac{1260 \cdot 30}{100} = 378 \text{ spire}$$

Per i trasformatori Ultraleaari Single-Ended valgono le stesse considerazioni sopra indicate e mostrate anche con esempi numerici nelle figure.

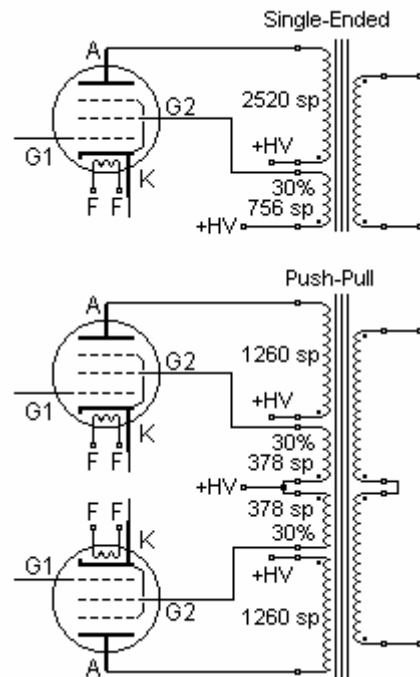
Qualche consiglio utile per un buon Trasformatore di Uscita:

Scelto il tipo di valvola da utilizzare, si procede alla realizzazione del trasformatore di uscita e di alimentazione secondo come specificato dalle caratteristiche tecniche della valvola utilizzata.

Dopo aver calcolato il trasformatore e verificato che gli avvolgimenti siano contenuti nella finestra del lamierino si procede alla costruzione fisica del trasformatore.

Questa è la fase più delicata, infatti ci vuole precisione e tanta costanza, volontà e pazienza. Il buon funzionamento e la qualità del trasformatore dipende per 80% dalla sua costruzione.

Quando si esegue un calcolo di un nuovo trasformatore è buona norma eseguire un primo calcolo di massima partendo dalla potenza totale del trasformatore per ottenere le dimensioni del pacco



lamellare. Quindi trovato il lamierino e rocchetto che soddisfa le nostre esigenze si ripete il calcolo partendo dal pacco lamellare a disposizione. Tutto ciò tenendo sempre sotto occhio gli ingombri degli avvolgimenti.

E' molto importante la precisione e la cura con cui si esegue la costruzione manuale dell'avvolgimento.

Per amplificatori stereo tutti e due i trasformatori di uscita devono essere identici in tutte le sue parti. Cioè devono essere composti dallo stesso numero di lamierini, dallo stesso tipo di filo smaltato, dallo stesso isolamento fra strato e strato, dagli stessi strati, dallo stesso numero di spire.

Avvolgere il filo sul rocchetto in modo uniforme, accostando le spire l'una all'altra.

Completare lo strato, non terminare mai l'avvolgimento a metà rocchetto ma arrivare fino alle fiancate laterali, evitando di avvolgere le spire distanti fra loro (avvolgimento rado). Inserire l'avvolgimento secondario a circa metà dell' avvolgimento primario. Oppure ancora meglio inserire più avvolgimenti secondari in mezzo al avvolgimento primario. Questi secondari saranno realizzati con un numero di spire opportuno, che poi collegheremo in serie o parallelo, in modo da ottenere il numero di spire richiesto dal calcolo per tale impedenza.

Realizzare l' avvolgimento secondario secondo quanto descritto nel capitolo Secondari Multipli, oppure avvolgere in bifilare, trifilare, quadrifilare, ecc... (2, 3, 4, fili di rame smaltato paralleli da avvolgere tutti contemporaneamente) sempre avendo cura di completare lo strato, non terminare mai l'avvolgimento a metà rocchetto, ma arrivare fino alle fiancate laterali. Se per fare ciò è necessario aggiungere o togliere alcune spire (da 3 a 5 spire circa) rispetto al calcolo è da considerare una cosa ininfluente.

E' buona norma se necessario cambiare sezione del filo in modo da completare lo strato con il numero di spire calcolato. Se non abbiamo a disposizione altre sezioni di filo smaltato, possiamo aggiungere o togliere le spire che ci servono per completare lo strato.

Se la variazione di spire è consistente è necessario fare una verifica del calcolo per tenere conto delle variazioni di spire aggiunte o tolte, in modo da rispettare il più possibile il rapporto di trasformazione. Non tralasciare questa regola perché molto più importante per l' avvolgimento secondario che per il primario

Calcoliamo sempre il numero spire delle sezioni dei secondari in modo da poterli combinare fra loro (in serie e in parallelo) per ottenere le impedenze da noi richieste senza lasciare mai avvolgimenti liberi a vuoto (senza carico). Vedi capitolo Secondari Multipli.

Utilizzare nel calcolo un' induzione magnetica da 0,4 a 0,6 Wb/m² per Single-Ended. Mentre un' induzione magnetica da 0,8 a 1 Wb/m² per Push-Pull.

A trasformatore finito eseguire tutti i collegamenti rispettando gli inizi e le fini degli avvolgimenti come indicato nei disegni.

Trasformatori di elevata qualità HI-FI

Per i trasformatori di uscita HI-FI occorre usare nei calcoli un valore di frequenza minima (f_{min}) molto bassa di solito da 20Hz a 50Hz naturalmente come conseguenza la sezione del nucleo (S_{fe}) e il numero di spire degli avvolgimenti N_1 e N_2 raggiungeranno valori di notevole entità rispetto ai normali trasformatori economici per i quali si arriva a considerare una frequenza minima (f_{min}) da 100Hz a 200Hz.

Essendo richiesta pure la presenza di note molto più alte di quelle considerate si ha allora che f_{max} solitamente sui 4000-5000Hz sale sui 15000-20000Hz. Ciò comporta uno speciale montaggio degli avvolgimenti al fine di minimizzare la capacità parassita, causa prima dell'attenuazione delle frequenza alte.

E' richiesta infine una rigorosa disposizione simmetrica degli avvolgimenti, affinché le correnti anodiche "Ia" fornite da ciascuna valvola risultino il più uguali possibili (nei trasformatori per PP) e così la distorsione della seconda armonica venga ridotta al minimo.

Quindi è necessario in fase di costruzione segnare su un foglietto tutte le spire avvolte in ogni strato e in ogni sezione, segnare anche l'inizio e la fine di ogni sezione avvolta, e il senso di avvolgimento (orario o antiorario).

Per trasformatori di elevata qualità si consiglia l'uso di materiali magnetici ad bassa forza coercitiva, alta permeabilità iniziale. Sono leghe ferro nichel (Fe-Ni) con aggiunte di manganese (Mn), cromo (Cr), rame (Cu), molibdeno (Mo), (Permalloy A, Permanorm, Mumetal, Perminvar, Megaperm, ecc...).

Soprattutto nei trasformatori asimmetrici per Single-Ended, per migliorare la qualità del suono è consigliabile collegare l'anodo della valvola all'inizio dell'avvolgimento primario più vicino al nucleo centrale ferromagnetico perché è quello con minore capacità parassita, mentre il positivo +HV andrà collegato all'avvolgimento primario più lontano.

Così facendo la fine dell' avvolgimento secondario sarà il positivo, mentre l' inizio dell' avvolgimento secondario sarà il negativo dove vanno collegati i diffusori acustici.

Comunque è sempre meglio effettuare delle prove di ascolto per valutare al meglio il collegamento più soddisfacente.

Nel realizzare un trasformatore di uscita è preferibile utilizzare sempre un rocchetto a sezione quadrata.

Nuovi valori di Impedenze dopo la variazione numero spire:

Successivamente al calcolo dopo aver scelto il rocchetto più idoneo e controllato gli ingombri occorre verificare il numero spire per strato S_{Str} e il numero degli strati di spire N_{Str} necessari alla realizzazione del completo avvolgimento.

Come già ripetuto è buona norma, completare lo strato, da fiancata a fiancata laterale, evitando di avvolgere le spire distanti fra loro, oppure terminare l'avvolgimento a metà rocchetto.

Soprattutto nei trasformatori di uscita per raggiungere l'obiettivo di completare lo strato è possibile anche aggiungere o togliere qualche spira, poi però è necessario fare una verifica del calcolo sugli altri avvolgimenti del trasformatore in modo da rispettare il più possibile il rapporto di trasformazione K per valutare le variazioni di spire aggiunte o tolte.

In riferimento al calcolo del trasformatore di uscita push-pull descritto nelle pagine più avanti proviamo a vedere cosa si ottiene modificando il numero spire avvolgimenti al fine di ottenere delle sezioni di avvolgimento complete da fiancata a fiancata del rocchetto senza lasciare alcuni strati di spire incompleti.

Dal calcolo dobbiamo prendere in esame i seguenti dati:

$P_1 = 10W$ potenza assorbita dall'avvolgimento primario.

$e = 0,1V$ tensione in Volt generati da una spira.

$v\% = 15,24\%$ caduta di tensione percentuale.

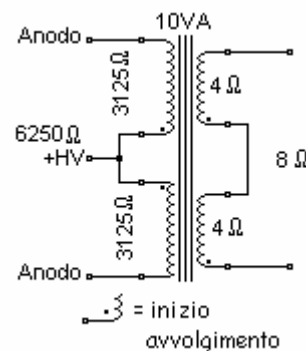
$\eta = 72,8\%$ rendimento percentuale del trasformatore.

$S_{Str1} = 89,68 \text{ spire} \cdot \text{strato}$ numero di spire in uno strato avvolgimento primario.

$S_{Str2} = 21,17 \text{ spire} \cdot \text{strato}$ numero di spire in uno strato avvolgimento secondario.

$N_{Str1} = 27,8 \text{ strati}$ numero strati di spire avvolgimento primario.

$N_{Str2} = 4,15 \text{ strati}$ numero strati di spire avvolgimento secondario.



Calcoliamo il nuovo numero spire avvolgimento considerando di arrotondare al numero intero il Numero di Spire per Strato S_{Str} e il Numero di Strati N_{Str} :

$$N_{aa} = S_{Str1} \cdot N_{Str1} \text{ (spire)}$$

$$N_{aa} = 90 \cdot 28 = 2520 \text{ spire}$$

$$N_c = S_{Str2} \cdot N_{Str2} \text{ (spire)}$$

$$N_c = 21 \cdot 4 = 84 \text{ spire}$$

Nel calcolo l'avvolgimento primario era formato da 2500 spire, mentre ora occorrono 20 spire in più. Mentre l'avvolgimento secondario era formato da 88 spire, mentre ora occorrono 4 spire in meno.

In riferimento al nuovo numero spire si calcola la tensione avvolgimento:

$$V_1 = e \cdot N_{aa} \text{ (Volt)}$$

$$V_1 = 0,1 \cdot 2520 = 252 \text{ Volt}$$

$$V_{20} = e \cdot N_c \text{ (Volt)}$$

$$V_{20} = 0,1 \cdot 84 = 8,4 \text{ Volt}$$

$$V_2 = \frac{V_{20}}{\left(1 + \frac{v\%}{100}\right)} \text{ (Volt)}$$

$$V_2 = \frac{8,4}{\left(1 + \frac{15,24}{100}\right)} = 7,28 \text{ Volt}$$

Calcoliamo i nuovi valori di Impedenze:

$$Z_{aa} = \frac{V_1^2}{P_1} \text{ (}\Omega\text{)}$$

$$Z_{aa} = \frac{252^2}{10} = 6350 \Omega$$

$$Z_c = \frac{V^2}{P_1 \cdot \eta} (\Omega)$$

$$Z_c = \frac{7,28^2}{10 \cdot 0,728} = 7,28 \Omega$$

Questo trasformatore di uscita era stato calcolato per $Z_{aa} = 6250$ e $Z_c = 8$ con la modifica del numero spire si sono ottenute le due nuove impedenze indicate nei calcoli che discostano un poco da quelle previste ma che non compromettendo il funzionamento corretto del trasformatore. Per migliorare ulteriormente il rapporto di trasformazione Z_{aa}/Z_c in modo da mantenerlo il più possibile vicino a quello calcolato bisogna provare a ripetere il calcolo sopra descritto utilizzando un filo smaltato di diametro diverso e arrotondando i valori di S_{Str} e di N_{Str} al valore intero.

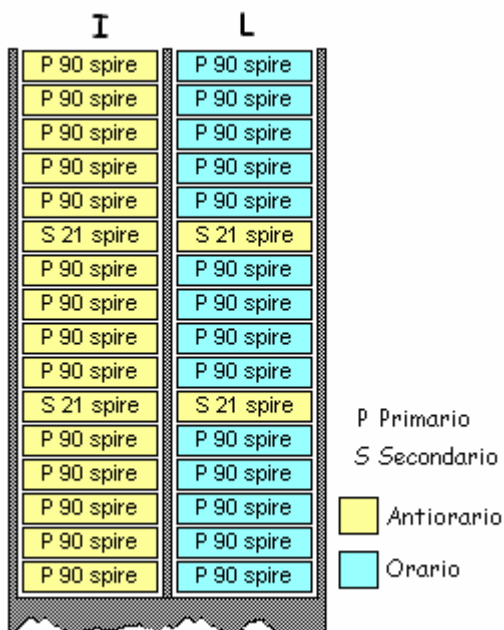
Schema degli Avvolgimenti del Trasformatore di Uscita

Nella costruzione degli avvolgimenti per un trasformatore di uscita push-pull si utilizza un rocchetto plastico a due gole di uguale larghezza (gola I e gola L). Gli avvolgimenti primario e secondario vengono suddivisi in sezioni che contengono più strati, inoltre gli avvolgimenti vengono anche intercalati fra loro in modo omogeneo al fine di ottenere diverse sezioni di primari e secondari ben amalgamati come in figura. Per questo tipo di trasformatore gli avvolgimenti sono avvolti alcuni in senso orario e altri in senso antiorario, questo per mantenere il più possibile la simmetria degli avvolgimenti.

L'avvolgimento primario $Z_{aa} = 6350 \Omega$ deve essere composto da $N_{aa} = 2520$ spire suddivise nelle due gole in 28 strati di 90 spire ciascuno.

L'avvolgimento secondario $Z_c = 7,28 \Omega$ deve essere composto da $N_c = 84$ spire suddivise nelle due gole in 4 strati di 21 spire ciascuno.

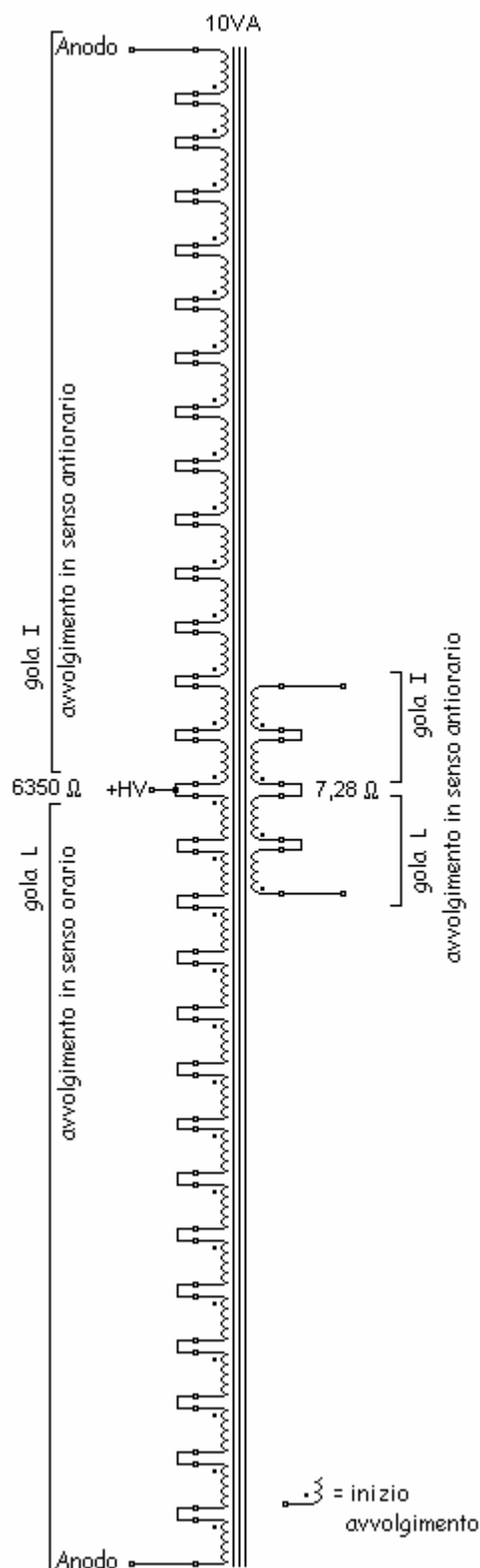
Per maggior chiarezza la rappresentazione in figura descrive integralmente i singoli strati di spire.



integralmente i singoli strati di spire.

Come già detto, fra strato e strato bisogna interporre un giro di carta paraffinata, fra sezione e

sezione interporre due giri di carta paraffinata.



Trasformatori di Uscita con Avvolgimenti Secondari Multipli

Mediante la descrizione in 'schede di configurazione' si cerca di approfondire la realizzazione pratica degli avvolgimenti secondari complessi per trasformatori di uscita per amplificatori valvolari.

Per comprendere meglio l'argomento analizziamo singolarmente alcune configurazioni in modo pratico.

Lo scopo di queste configurazioni è quello di utilizzare tutte le spire senza lasciare avvolgimenti a vuoto (senza carico, condizione ottimale di funzionamento e di resa per il TU), ma ovviamente bisogna accettare qualche compromesso: un notevole aumento del numero di spire secondario, una maggior difficoltà nella realizzazione pratica dovuta a un aumento degli strati, e la impossibilità di avere combinazioni di impedenze di uscita di valore preciso come 4Ω , 8Ω , 16Ω , ecc....

Se ad esempio si vuole realizzare un trasformatore di uscita adattabile ad una sola impedenza di uscita ma lo si vuole stratificare maggiormente (intercalando primario e secondario più volte) l'avvolgimento può essere realizzato come in configurazione C, poi si collega per una sola impedenza di uscita

Sarebbe buona norma realizzare un trasformatore di uscita adattabile ad una sola impedenza di uscita per non ricorrere a queste complicate configurazioni di avvolgimenti secondari. Ma certe volte è necessario avere la possibilità di adattare diverse impedenze di uscita, (per esempio casse acustiche da 4Ω , 8Ω , 16Ω , ecc....) e le cose si complicano un pochino.

Ovviamente noi possiamo scegliere i valori di impedenza che più ci soddisfano, come si vede ad esempio nella configurazione G si possono ottenere impedenze di uscita di $3,9\Omega$, 7Ω , $15,7\Omega$, oppure come indicato fra parentesi si possono ottenere valori di 2Ω , $3,5\Omega$, $7,9\Omega$. Quindi tutto dipende dal valore di impedenza più alta che scegliamo, dopodichè si ottengono di conseguenza anche le impedenze più basse, ma sempre in funzione del rapporto descritto dalla configurazione scelta.

E' buona norma per un corretto dimensionamento e qualità del trasformatore di uscita con secondari multipli, che il numero di spire 'n' calcolato riesca ad occupare lo strato completo, cioè deve coprire perfettamente tutta la larghezza disponibile del rocchetto. Per fare ciò è necessario trovare il diametro di filo giusto, oppure avvolgere in bifilare, trifilare, ecc....

Ogni secondario parziale (quello indicato con 'n') o principale (tutto l'avvolgimento secondario) deve essere composto da un numero intero di spire. Mentre se necessario le spire per strato possono anche non essere in numero intero.

La linea tratteggiata indicata fra gli avvolgimenti rappresenta una parte dell'avvolgimento primario, il secondario parziale indicato con la lettera A è quello più vicino al nucleo ferromagnetico di lamierini.

Si ricorda che l'avvolgimento primario calcolato è solo spezzettato in parti uguali per premettere la stratificazione poi sarà collegato tutto in serie. Nel caso di T.U. Single-Ended tutti gli avvolgimenti primari e secondari sono avvolti nello stesso senso, mentre per T.U. Push-Pull tutti i primari avvolti nella gola di sinistra sono avvolti in senso antiorario, tutti i primari avvolti nella gola di destra sono avvolti in senso orario e tutti i secondari avvolti nella gola di sinistra e di destra sono avvolti in senso antiorario.

La tabella mostra in relazione ad ogni configurazione di avvolgimenti secondari presentata come aumenta in percentuale l'ingombro totale rispetto all'ingombro del singolo avvolgimento calcolato, di come diminuisce la sezione del filo e di come aumenta il numero spire: cioè facendo riferimento ad esempio alla scheda configurazione D si nota che per realizzare la massima impedenza è necessario collegare in parallelo due rami di avvolgimenti collegati in serie; quindi si può utilizzare un filo di metà sezione, l'ingombro aumenta di circa il 5% dovuto al doppio del numero di spire che comporta un aumento dell'isolante da interporre fra gli strati.

Tipo di Configurazione	Ingombro totale avv.sec.	Sezione Filo	Numero spire sec.
A	-	-	-
B	-	-	-
C	-	-	-
D	+5%	metà	doppio
E	+10%	un terzo	triplo
F	+10%	un terzo	triplo
G	+5%	metà	doppio
H	+10%	un terzo	triplo

Tabella Configurazioni Avvolgimenti Secondari

In questa tabella riassuntiva sono visibili tutte le configurazioni di avvolgimenti secondari per trasformatori di uscita Single-Ended e Push-Pull per amplificatori valvolari, che (escluso configurazione A) permettono di utilizzare tutte le spire senza lasciare avvolgimenti a vuoto (senza carico).

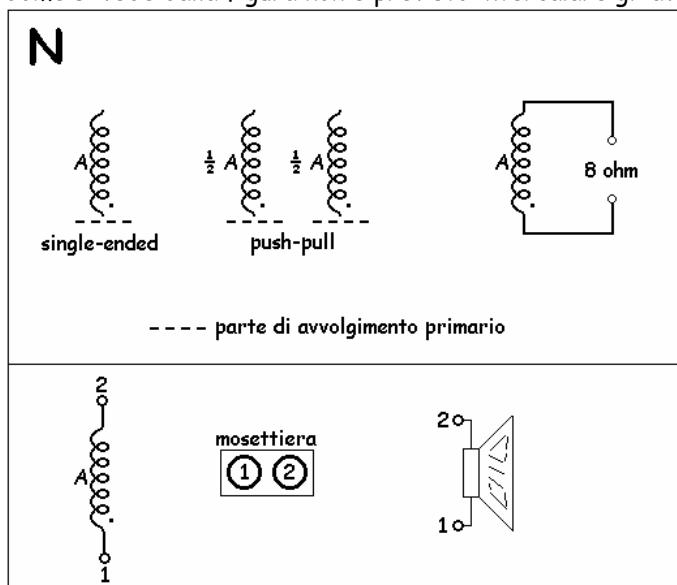
A single-ended push-pull	B single-ended push-pull	C single-ended push-pull
D single-ended push-pull	E single-ended	F single-ended push-pull
G single-ended push-pull	H single-ended push-pull	N single-ended push-pull NOTE ● la parte tratteggiata - - - - indica una parte di avvolgimento primario ● la configurazione A necessita di due o più secondari diversi fra loro, combinabili solo in Serie. ● è buona norma iniziare con un avvolgimento primario e terminare con un avvolgimento primario

Il secondario parziale indicato con la lettera A è quello più vicino al nucleo ferromagnetico di lamierini. Si ricorda che l'avvolgimento primario calcolato (indicato in tratteggio) è solo spezzettato in parti uguali per premettere la stratificazione poi sarà collegato tutto in serie. Nel caso di T.U. Single-Ended si utilizza un rocchetto ad una gola, tutti gli avvolgimenti primari e secondari sono avvolti nello stesso senso. Mentre per T.U. Push-Pull si utilizza un rocchetto ad due gole, tutti i primari avvolti nella gola di sinistra sono avvolti in senso antiorario, tutti i primari avvolti nella gola di destra sono avvolti in senso orario e tutti i secondari avvolti nella gola di sinistra e di destra sono avvolti in senso antiorario. Il puntino indicato a fianco dell'avvolgimento rappresenta il punto di 'inizio avvolgimento'.

Configurazione N

La configurazione N rappresenta la soluzione minima è detta anche configurazione base, dopodichè se si vuole si può elaborare l'avvolgimento come descritto nelle altre configurazioni. Questa configurazione prevede una sola impedenza di uscita, di solito è molto utilizzata nei trasformatori di media e bassa qualità. Infatti trova largo impiego in tutti quei casi dove non si richiede una notevole precisione sonora.

Come si vede dalla figura non è previsto intercalare gli avvolgimenti primari e secondari.



Nel Push-Pull si realizzano due avvolgimenti secondari uno per ogni gola, costituiti da metà numero di spire che poi verranno collegati in serie per realizzare l'avvolgimento secondario completo. Come qualità di suono questa configurazione è meglio della configurazione A nella quale alcuni avvolgimenti rimangono a vuoto (senza carico).

In alternativa, per migliorare la qualità, si può scegliere la configurazione C, questo per suddividere gli avvolgimenti primari e secondari intercalandoli fra loro in modo da stratificare maggiormente tutto l'avvolgimento.

I terminali della cassa acustica e tutti gli inizi e fine di ogni avvolgimento secondario vengono collegati nella parte dietro di questa morsettiera a 2 morsetti rispettando il numero del morsetto

come visibile in figura (es. inizio avv. A sul morsetto 1, fine avv. A morsetto 2, altoparlante morsetto 1 e 2).

Esempio pratico: realizziamo un trasformatore di uscita adattabile a casse da $8\ \Omega$ scegliamo la configurazione N, la quale richiede 1 secondario. Dal calcolo del trasformatore eseguito in precedenza si vede che il numero di spire secondario per $8\ \Omega$ corrisponde ad esempio a 120spire.

Per Trasformatore di Uscita Single-Ended: si avvolge tutto l' avvolgimento primario e di seguito tutto l'avvolgimento secondario di 120spire.

Per Trasformatore di Uscita Push-Pull si utilizza un rocchetto a 2 gole: si avvolge metà spire avvolgimento primario in senso antiorario in una gola, poi metà spire avvolgimento primario in senso orario nell'altra gola. Successivamente si avvolge metà spire avvolgimento secondario 60spire in senso orario in una gola, poi metà spire avvolgimento secondario 60spire in senso orario nell'altra gola. Di seguito gli avvolgimenti saranno collegati in serie in modo che la somma spire raggiunga il valore delle spire calcolate.

Sia in questa configurazione che in quelle successive descritte di seguito è buona norma seguire le indicazioni già spiegate in precedenza per l'ottimizzazione dell'avvolgimento in modo da completare lo strato con un numero di spire di sezione adeguata. In riferimento alla sezione del filo S_f (mm²) ottenuta dal calcolo si devono eseguire alcuni semplice calcoli manuali per ricercare il diametro del filo isolato ottimale con cui realizzare l'avvolgimento.

Supponiamo che dal calcolo le 120spire devono essere avvolte con filo $\phi_l = 1,08\text{mm}$ $S_f = 0,7854\text{mm}^2$,

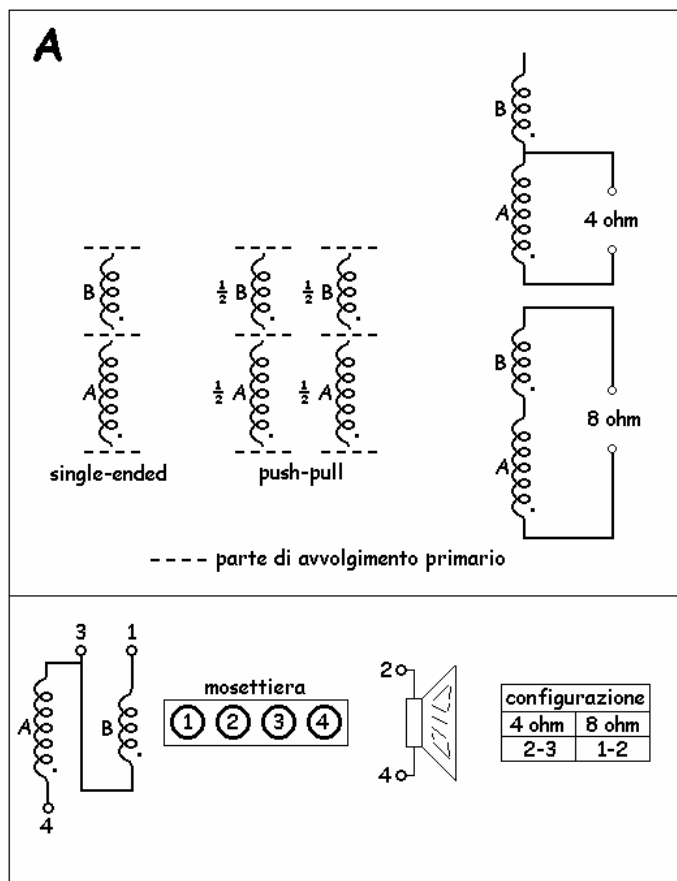
supponiamo che la finestra del rocchetto sia larga 30mm, $\frac{30\text{ mm}}{120\text{ spire}} = 0,25\text{ mm}$ questo valore rappresenta il

diametro filo isolato necessario per realizzare le 120 spire su un solo strato. Visto che tale diametro è molto inferiore rispetto a quello previsto si può utilizzare un filo di diametro maggiore, posso moltiplicare tale valore per 3 o anche per 4, $0,25 \cdot 4 = 1\text{mm}$. Sul mercato si trova del filo $\phi_l = 0,97\text{mm}$ $S_f = 0,6362\text{mm}^2$, la sezione è leggermente inferiore da quella prevista ma si può tranquillamente utilizzare eseguendo l'avvolgimento in 4 strati.

Essendo la sezione del filo leggermente inferiore, anche gli ingombri avvolgimento saranno leggermente inferiori di quelli calcolati, per cui il rocchetto conterrà comodamente tutte le spire.

Configurazione A

La configurazione A è la più anomala rispetto a tutte le altre presentate di seguito ma è la più diffusa in assoluto nei trasformatori di media e bassa qualità, infatti trova largo impiego in tutti quei casi dove non si richiede una notevole precisione sonora, infatti alcuni avvolgimenti rimangono a vuoto (senza carico). Si ha la possibilità di scegliere le impedenze di uscita desiderate. Le uscite sono realizzate da più avvolgimenti collegati in serie. In quest'esempio il secondario è realizzato da 2 avvolgimenti (A B) che combinati fra loro in serie, oppure utilizzandone solo uno realizzano l'adattamento di impedenza



desiderato, per esempio di 8 Ω e di 4 Ω.

Per quel che riguarda il rapporto di trasformazioni fra gli avvolgimenti vale sempre la solita espressione:

$$K = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Per facilitare i collegamenti, in modo da rendere semplice e facile il passaggio da un'impedenza di uscita all'altra è possibile utilizzare una morsettiera a 4 morsetti.

I terminali della cassa acustica e tutti gli inizi e fine di ogni avvolgimento secondario vengono collegati nella parte dietro di questa morsettiera rispettando il numero del morsetto come visibile in figura (es. inizio avv. B sul morsetto 3, fine avv. B morsetto 1, altoparlante morsetto 2 e 4, e via di seguito).

Quindi eseguendo dei semplici passi sul davanti di questa morsettiera come indicato nella tabella 'configurazione' è possibile ottenere in uscita una delle due impedenze desiderate.

Se ad esempio faccio il passo 1-2 corrisponde a 8 Ω, se faccio il passo 2-3 corrisponde un'impedenza di 4 Ω.

Esempio pratico: realizziamo un trasformatore di uscita adattabile a casse sia da 4 Ω che da 8 Ω scegliamo la configurazione A, la quale richiede 2 secondari parziali collegati in serie. Consideriamo il valore di impedenza più alta 8 Ω vediamo nella configurazione che è realizzata collegando in serie gli avvolgimenti A e B. Dal calcolo del trasformatore eseguito in precedenza si vede che il numero di spire secondario per 8 Ω ($A+B$) corrisponde ad esempio a 113 spire.

$$K = \sqrt{\frac{Z_A + Z_B}{Z_A}} = \sqrt{\frac{8}{4}} = 1,41$$

Il rapporto di trasformazione è:

$$N_A = \frac{N_{A+B}}{K} = \frac{113}{1,41} = 80 \text{ spire}$$

Numero Spire avvolgimento A :

$$N_B = N_{A+B} - N_A = 113 - 80 = 33 \text{ spire}$$

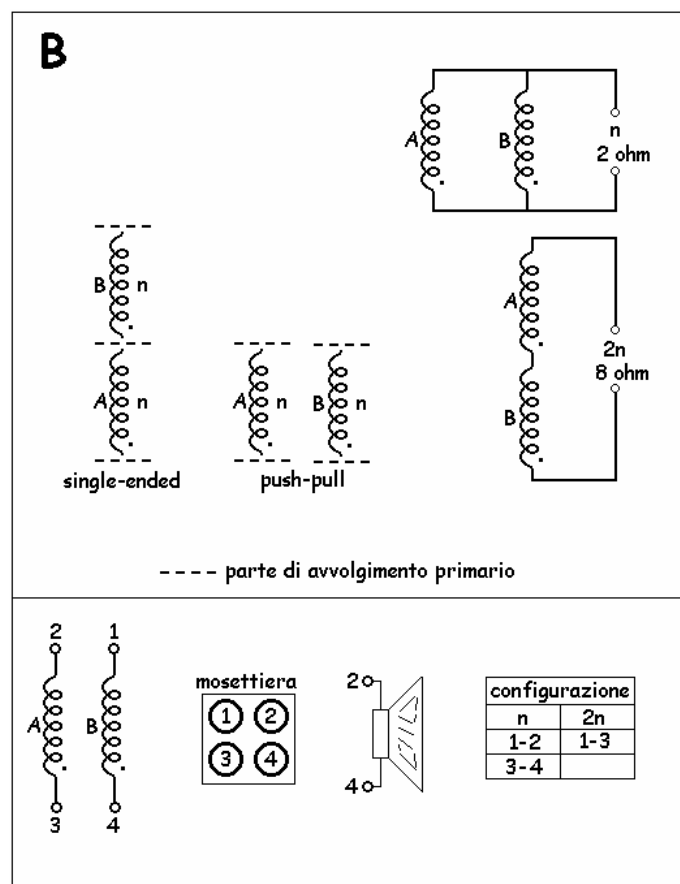
Numero Spire avvolgimento B :

L'avvolgimento A deve essere avvolto con una sezione filo corrispondente a quella indicata dal calcolo per 4 Ω.

L'avvolgimento B deve essere avvolto con una sezione filo corrispondente a quella indicata dal calcolo per 8 Ω.

Configurazione B

La configurazione B è molto semplice ma poco utilizzata, infatti trova largo impiego solo, nel caso che si voglia stratificare ulteriormente il trasformatore. Normalmente si configura per una sola impedenza di uscita (una fra le due descritte), però da la possibilità di scegliere. Avendo a disposizione due avvolgimenti uguali combinabili fra loro permette a questa configurazione di ottenere una notevole



differenza fra le relative impedenze di uscita rispetto alle altre configurazioni. Il secondario è realizzato da 2 avvolgimenti (n n) che combinati fra loro in n e in 2n realizzano un adattamento di impedenza di 2 Ω e di 8 Ω .

Per quel che riguarda il rapporto di trasformazioni fra gli avvolgimenti vale sempre la solita espressione:

$$K = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Per facilitare i collegamenti, in modo da rendere semplice e facile il passaggio da un impedenza di uscita all'altra è possibile utilizzare una morsettiera a 4 morsetti.

I terminali della cassa acustica e tutti gli inizi e fine di ogni avvolgimento vengono collegati nella parte dietro di questa morsettiera rispettando il numero del morsetto come visibile in figura (es. inizio avv. B sul morsetto 4, fine avv. B morsetto 1, altoparlante morsetto 2 e 4, e via di seguito).

Quindi eseguendo dei semplici passi sul davanti di questa morsettiera come indicato nella tabella 'configurazione' è possibile ottenere in uscita una delle due impedenze desiderate.

Se ad esempio faccio il passo 1-3 corrisponde la configurazione 2n che nell'esempio equivale a 8ohm.

Esempio pratico: si vuole realizzare un trasformatore di uscita adattabile a casse sia da 2 Ω che da 8 Ω scegliamo la configurazione B, la quale richiede 2 secondari parziali di n n spire. Consideriamo il valore di impedenza più alta 8 Ω vediamo nella configurazione che è realizzata con 2n. Dal calcolo del trasformatore eseguito in precedenza si vede che il numero di spire secondario per 8 Ω corrisponde ad esempio a 181spire, essendo questo numero non divisibile per 2 (questo perché 2n è la configurazione che dà 8 Ω) proviamo a aumentare o diminuire di qualche spira fino a trovare il valore più vicino al numero calcolato divisibile per 2. Infatti diminuendo di una spira 180:2=90spire, tale valore rappresenta 'n'. Quindi si faranno due secondari parziali di n (90spire).

Il rapporto di trasformazione è: $K = \frac{2n}{n} = \frac{2}{1} = 2$

L'Impedenza è: $Zn = \frac{Z2n}{K^2} = \frac{8}{2^2} = 2 \Omega$

Impedenze Avvolgimenti: $Z2n = Zn \cdot 2^2 = 2 \cdot 4 = 8 \Omega$

Numero Spire avvolgimento 2n: $N2n = 180$ spire (come prescritto dal calcolo)

Numero Spire avvolgimento n: $Nn = \frac{N2n}{K} = \frac{180}{2} = 90$ spire

L'avvolgimento n deve essere avvolto con una sezione filo corrispondente a quella indicata dal calcolo per 2n.

Configurazione C

La configurazione C è abbastanza semplice e mediamente utilizzata, infatti trova largo impiego solo, nel caso che si voglia stratificare ulteriormente il trasformatore. Normalmente si configura per una sola impedenza di uscita (una fra le tre descritte, meglio quella con tutti gli avvolgimenti in serie). Avendo a disposizione avvolgimenti tutti uguali combinabili fra loro permette a questa configurazione di ottenere una differenza

fra le relative impedenze di uscita molto elevata rispetto alle altre configurazioni. Il secondario è realizzato da 4 avvolgimenti (n n n n) che combinati fra loro in n in $2n$ ed in $4n$ realizzano un adattamento di impedenza di 2Ω di 8Ω e di 32Ω .

Per quel che riguarda il rapporto di trasformazioni fra gli avvolgimenti vale sempre la solita espressione:

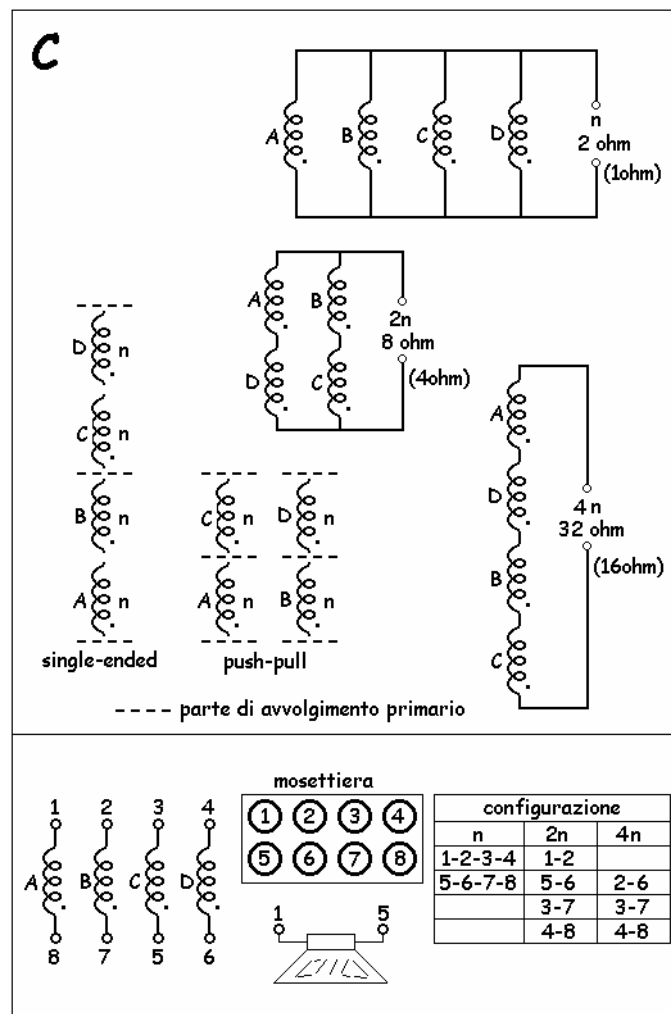
$$K = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Per facilitare i collegamenti, in modo da rendere semplice e facile il passaggio da un'impedenza di uscita all'altra è possibile utilizzare una morsettiera ad 8 morsetti.

I terminali della cassa acustica e tutti gli inizi e fine di ogni avvolgimento vengono collegati nella parte dietro di questa morsettiera rispettando il numero del morsetto come visibile in figura (es. inizio avv. C sul morsetto 5, fine avv. C morsetto 3, e via di seguito).

Quindi eseguendo dei semplici passi sul davanti di questa morsettiera come indicato nella tabella 'configurazione' è possibile ottenere in uscita una delle tre impedenze desiderate.

Se ad esempio la configurazione $4n$ corrisponde a 32Ω si avrà come configurazione $2n$ un'impedenza di 8Ω , e come configurazione n un'impedenza di 2Ω .



impedenza di 2Ω . Oppure se la configurazione $4n$ corrisponde a 16Ω si avrà come configurazione $2n$ un'impedenza di 4Ω , e come configurazione n un'impedenza di 1Ω .

Esempio pratico: si vuole realizzare un trasformatore di uscita adattabile a casse sia da 2Ω che da 8Ω e da 32Ω scegliamo la configurazione C, la quale richiede 4 secondari parziali di n n n n spire. Consideriamo il valore di impedenza più alta 32Ω vediamo nella configurazione che è realizzata con $4n$. Dal calcolo del trasformatore eseguito in precedenza si vede che il numero di spire secondario per 32Ω corrisponde ad esempio a 182spire, essendo questo numero non divisibile per 4 (questo perché $4n$ è la configurazione che dà 32Ω) proviamo a aumentare o diminuire di qualche spira fino a trovare il valore più vicino al numero calcolato divisibile per 4. Infatti diminuendo di due spire $180:4=45$ spire, tale valore rappresenta 'n'. Quindi si faranno quattro secondari parziali di n (45spire).

Il rapporto di trasformazione è: $K = \frac{4n}{n} = \frac{4}{1} = 4$

L'Impedenza è: $Zn = \frac{Z4n}{K^2} = \frac{32}{4^2} = 2\Omega$

Impedenze Avvolgimenti: $Z2n = Zn \cdot 2^2 = 2 \cdot 4 = 8\Omega$

$Z4n = Zn \cdot 4^2 = 2 \cdot 16 = 32\Omega$

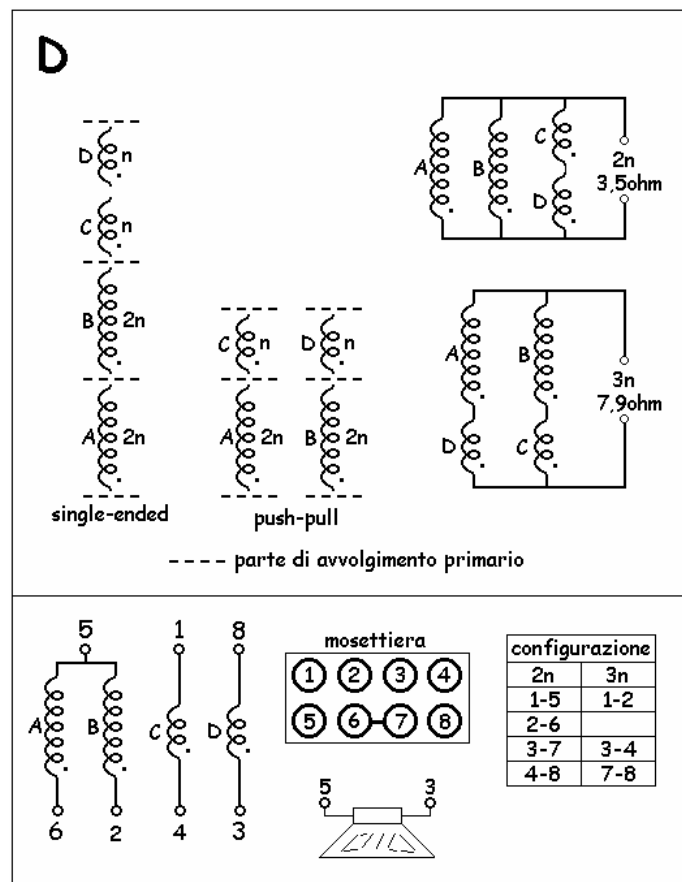
Numero Spire avvolgimento $4n$: $N4n = 180$ spire (come prescritto dal calcolo)

Numero Spire avvolgimento n : $Nn = \frac{N4n}{K} = \frac{180}{4} = 45$ spire

L'avvolgimento n deve essere avvolto con una sezione filo corrispondente a quella indicata dal calcolo per $4n$.

Configurazione D

La configurazione D è fra le più utilizzate nella realizzazione di avvolgimenti secondari a due prese. Il secondario è realizzato da 4 avvolgimenti ($2n$ $2n$ n n) che combinati fra loro in $2n$ ed in $3n$ realizzano un adattamento di impedenza di $3,5 \Omega$ e di $7,9 \Omega$.



Per quel che riguarda il rapporto di trasformazioni fra gli avvolgimenti vale sempre la solita espressione:

$$K = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Per facilitare i collegamenti, in modo da rendere semplice e facile il passaggio da un'impedenza di uscita all'altra è possibile utilizzare una morsettiera ad 8 morsetti.

I terminali della cassa acustica e tutti gli inizi e fine di ogni avvolgimento vengono collegati nella parte dietro di questa morsettiera rispettando il numero del morsetto come visibile in figura (es. inizio avv. C sul morsetto 4, fine avv. C morsetto 1, e via di seguito).

Quindi eseguendo dei semplici passi sul davanti di questa morsettiera come indicato nella tabella 'configurazione' è possibile ottenere in uscita una delle due impedenze desiderate.

Sul dietro della morsettiera dove si ammarano

i terminali degli avvolgimenti è necessario fare un passo fisso 6-7 con un pezzo di filo di rame.

Se ad esempio faccio i passi 1-2 3-4 7-8 corrisponde la configurazione $3n$ che nell'esempio equivale a $7,9 \Omega$.

Esempio pratico: si vuole realizzare un trasformatore di uscita adattabile a casse sia da 4Ω che da 8Ω scegliamo la configurazione D, la quale richiede 4 secondari parziali di $2n$ $2n$ n n spire. Consideriamo il valore di impedenza più alta 8Ω vediamo che nella configurazione è realizzata con $3n$. Dal calcolo del trasformatore eseguito in precedenza si vede che il numero di spire secondario per $7,9 \Omega$ corrisponde ad esempio a 157 spire, essendo questo numero non divisibile per 3 (questo perché $3n$ è la configurazione che dà $7,9 \Omega$) proviamo a aumentare o diminuire di qualche spira fino a trovare il valore più vicino al numero calcolato divisibile per 3. Infatti diminuendo di una spira $156:3=52$ spire, tale valore rappresenta 'n'. Quindi si faranno due secondari parziali di $2n$ (104 spire) e due secondari parziali di n (52 spire).

Il rapporto di trasformazione è: $K = \frac{3n}{n} = \frac{3}{1} = 3$

L'Impedenza è: $Z_n = \frac{Z_{3n}}{K^2} = \frac{7,9}{3^2} = 0,877 \Omega$

Impedenze Avvolgimenti: $Z_{2n} = Z_n \cdot 2^2 = 0,877 \cdot 4 = 3,5 \Omega$

$Z_{3n} = Z_n \cdot 3^2 = 0,877 \cdot 9 = 7,9 \Omega$

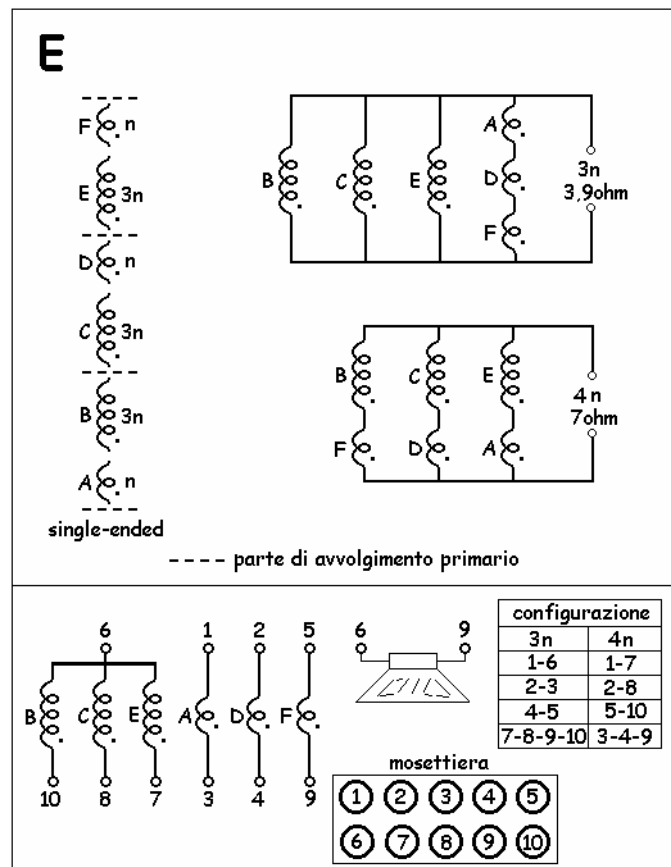
Numero Spire avvolgimento $3n$: $N_{3n} = 156$ spire (come prescritto dal calcolo)

Numero Spire avvolgimento n : $N_n = \frac{N_{3n}}{K} = \frac{156}{3} = 52$ spire

Come si vede in figura l'impedenza più alta è realizzata con il collegamento $3n$ che è ottenuta con due rami di avvolgimenti in parallelo. Questo ci fa capire che gli avvolgimenti devono essere avvolti con un sezione filo corrispondente alla metà di quella indicata dal calcolo per $3n$.

Configurazione E (solo per Single-Ended)

La configurazione E è la più complicata nella realizzazione di avvolgimenti secondari a due prese. Avendo a disposizione più avvolgimenti combinabili fra loro permette a questa configurazione di ottenere una differenza fra le relative impedenze di uscita più ridotta rispetto alle precedenti configurazioni. Il secondario è realizzato da 6 avvolgimenti (n $3n$ $3n$ n $3n$ n) che combinati fra loro in $3n$ ed in $4n$ realizzano un adattamento di impedenza di $3,9 \Omega$ e di 7Ω .



Per quel che riguarda il rapporto di trasformazioni fra gli avvolgimenti vale sempre la solita espressione:

$$K = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Per facilitare i collegamenti, in modo da rendere semplice e facile il passaggio da un'impedenza di uscita all'altra è possibile utilizzare una morsettiera ad 10 morsetti.

I terminali della cassa acustica e tutti gli inizi e fine di ogni avvolgimento vengono collegati nella parte dietro di questa morsettiera rispettando il numero del morsetto come visibile in figura (es. inizio avv. C sul morsetto 8, fine avv. C morsetto 6, e via di seguito).

Quindi eseguendo dei semplici passi sul davanti di questa morsettiera come indicato nella tabella 'configurazione' è possibile ottenere in

uscita una delle due l'impedenze desiderate. Se ad esempio faccio i passi 1-7 2-8 5-10 3-4-9 corrisponde la configurazione $4n$ che nell'esempio equivale a 7Ω .

Esempio pratico: si vuole realizzare un trasformatore di uscita adattabile a casse sia da 4Ω che da 8Ω scegliamo la configurazione E, la quale richiede 6 secondari parziali di n $3n$ $3n$ n $3n$ n spire. Consideriamo il valore di impedenza più alta 8Ω vediamo che nella configurazione è realizzata con $4n$. Dal calcolo del trasformatore eseguito in precedenza si vede che il numero di spire secondario per 7Ω corrisponde ad esempio a 157spire, essendo questo numero non divisibile per 4 (questo perché $4n$ è la configurazione che dà 7Ω) proviamo a aumentare o diminuire di qualche spira fino a trovare il valore più vicino al numero calcolato divisibile per 4. Infatti diminuendo di una spira $156:4=39$ spire, tale valore rappresenta 'n'. Quindi si faranno tre secondari parziali di $3n$ (117spire) e tre secondari parziali di n (39spire).

Il rapporto di trasformazione è: $K = \frac{4n}{n} = \frac{4}{1} = 4$

L'Impedenza è: $Zn = \frac{Z_{4n}}{K^2} = \frac{7}{4^2} = 0,44 \Omega$

Impedenze Avvolgimenti: $Z_{3n} = Zn \cdot 3^2 = 0,44 \cdot 9 = 3,9 \Omega$

$Z_{4n} = Zn \cdot 4^2 = 0,44 \cdot 16 = 7 \Omega$

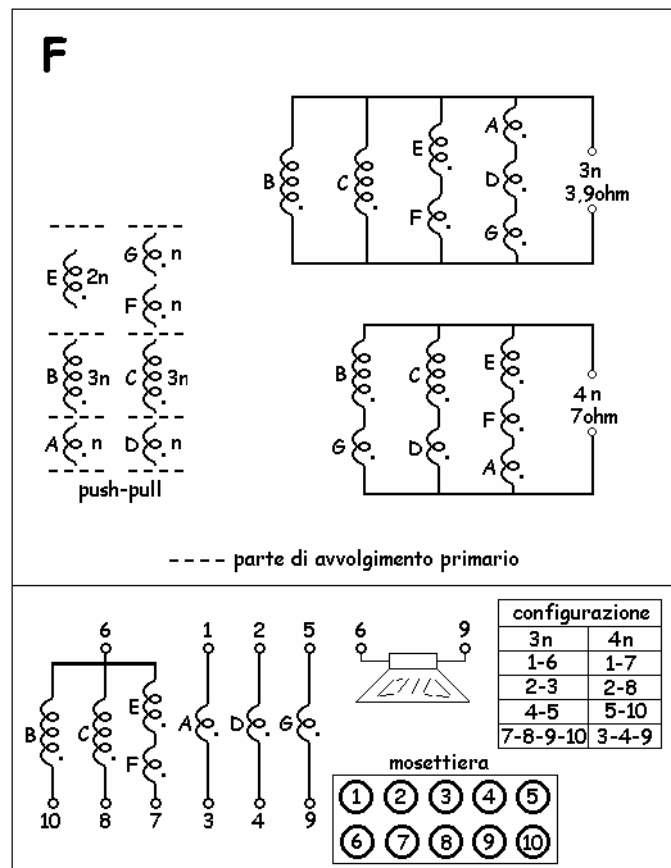
Numero Spire avvolgimento $4n$: $N_{4n} = 156$ spire (come prescritto dal calcolo)

Numero Spire avvolgimento n : $N_n = \frac{N_{4n}}{K} = \frac{156}{4} = 39$ spire

Come si vede in figura l'impedenza più alta è realizzata con il collegamento $4n$ che è ottenuta con tre rami di avvolgimenti in parallelo. Questo ci fa capire che gli avvolgimenti devono essere avvolti con un sezione filo corrispondente ad un terzo di quella indicata dal calcolo per $4n$.

Configurazione F (solo per Push-Pull)

La configurazione F è la più complicata nella realizzazione di avvolgimenti secondari a due prese. Avendo a disposizione più avvolgimenti combinabili fra loro permette a questa configurazione di ottenere una differenza fra le relative impedenze di uscita più ridotta rispetto alle precedenti configurazioni. Il secondario è realizzato da 7 avvolgimenti (n n $3n$ $3n$ $2n$ n n) che combinati fra loro in $3n$ ed in $4n$ realizzano un adattamento di impedenza di $3,9 \Omega$ e di 7Ω .



Per quel che riguarda il rapporto di trasformazioni fra gli avvolgimenti vale sempre la solita espressione:

$$K = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Per facilitare i collegamenti, in modo da rendere semplice e facile il passaggio da un'impedenza di uscita all'altra è possibile utilizzare una morsettiera ad 10 morsetti.

I terminali della cassa acustica e tutti gli inizi e fine di ogni avvolgimento vengono collegati nella parte dietro di questa morsettiera rispettando il numero del morsetto come visibile in figura (es. inizio avv. C sul morsetto 8, fine avv. C morsetto 6, e via di seguito).

Quindi eseguendo dei semplici passi sul davanti di questa morsettiera come indicato nella

tabella 'configurazione' è possibile ottenere in uscita una delle due impedenze desiderate. Se ad esempio faccio i passi 1-7 2-8 5-10 3-4-9 corrisponde la configurazione $4n$ che nell'esempio equivale a 7Ω .

Esempio pratico: si vuole realizzare un trasformatore di uscita adattabile a casse sia da 4Ω che da 8Ω scegliamo la configurazione F, la quale richiede 7 secondari parziali di n n $3n$ $3n$ $2n$ n n spire. Consideriamo il valore di impedenza più alta 8Ω vediamo che nella configurazione è realizzata con $4n$. Dal calcolo del trasformatore eseguito in precedenza si vede che il numero di spire secondario per 7Ω corrisponde ad esempio a 157 spire, essendo questo numero non divisibile per 4 (questo perché $4n$ è la configurazione che dà 7Ω) proviamo a aumentare o diminuire di qualche spira fino a trovare il valore più vicino al numero calcolato divisibile per 4. Infatti diminuendo di una spira $156:4=39$ spire, tale valore rappresenta 'n'. Quindi si faranno due secondari parziali di $3n$ (117 spire), un secondario parziale di $2n$ (78 spire) e quattro secondari parziali di n (39 spire).

Il rapporto di trasformazione è: $K = \frac{4n}{n} = \frac{4}{1} = 4$

L'Impedenza è: $Z_n = \frac{Z_{4n}}{K^2} = \frac{7}{4^2} = 0,44 \Omega$

Impedenze Avvolgimenti: $Z_{3n} = Z_n \cdot 3^2 = 0,44 \cdot 9 = 3,9 \Omega$

$Z_{4n} = Z_n \cdot 4^2 = 0,44 \cdot 16 = 7 \Omega$

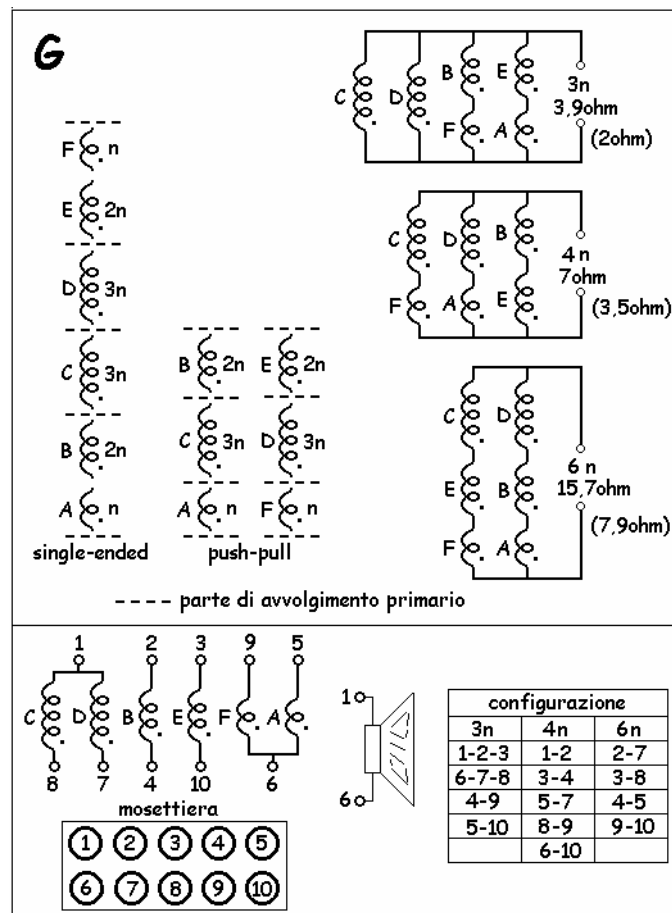
Numero Spire avvolgimento $4n$: $N_{4n} = 156$ spire (come prescritto dal calcolo)

Numero Spire avvolgimento n : $N_n = \frac{N_{4n}}{K} = \frac{156}{4} = 39$ spire

Come si vede in figura l'impedenza più alta è realizzata con il collegamento $4n$ che è ottenuta con tre rami di avvolgimenti in parallelo. Questo ci fa capire che gli avvolgimenti devono essere avvolti con un sezione filo corrispondente ad un terzo di quella indicata dal calcolo per $4n$.

Configurazione G

La configurazione G è abbastanza complicata, perché necessita di un maggior numero di avvolgimenti, però da la possibilità di scegliere fra 3 impedenze di uscita. Avendo a disposizione molti avvolgimenti combinabili fra loro permette a questa configurazione di ottenere una differenza fra le relative impedenze di uscita più ridotta rispetto alle altre configurazioni. Il secondario è realizzato da 6 avvolgimenti (n $2n$ $3n$ $3n$ $2n$ n) che



combinati fra loro in $3n$ in $4n$ ed in $6n$ realizzano un adattamento di impedenza di $3,9 \Omega$ di 7Ω e di $15,7 \Omega$.

Per quel che riguarda il rapporto di trasformazioni fra gli avvolgimenti vale sempre la solita espressione:

$$K = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Per facilitare i collegamenti, in modo da rendere semplice e facile il passaggio da un'impedenza di uscita all'altra è possibile utilizzare una morsettiera ad 10 morsetti.

I terminali della cassa acustica e tutti gli inizi e fine di ogni avvolgimento vengono collegati nella parte dietro di questa morsettiera rispettando il numero del morsetto come visibile in figura (es. inizio avv. C sul morsetto 8, fine avv. C morsetto 1, e via di seguito).

Quindi eseguendo dei semplici passi sul davanti di questa morsettiera come indicato nella tabella 'configurazione' è possibile ottenere in uscita una delle tre impedenze desiderate. Se ad esempio faccio i passi 1-2 3-4 5-7 8-9 6-10 corrisponde la configurazione $4n$ che nell'esempio equivale a 7Ω .

Esempio pratico: si vuole realizzare un trasformatore di uscita adattabile a casse sia da 4Ω che da 8Ω e da 16Ω scegliamo la configurazione G, la quale richiede 6 secondari parziali di n $2n$ $3n$ $3n$ $2n$ n spire. Consideriamo il valore di impedenza più alta 16Ω vediamo nella configurazione che è realizzata con $6n$. Dal calcolo del trasformatore eseguito in precedenza si vede che il numero di spire secondario per $15,7 \Omega$ corrisponde ad esempio a 182spire, essendo questo numero non divisibile per 6 (questo perché $6n$ è la configurazione che dà $15,7 \Omega$) proviamo a aumentare o diminuire di qualche spira fino a trovare il valore più vicino al numero calcolato divisibile per 6. Infatti diminuendo di due spire $180:6=30$ spire, tale valore rappresenta 'n'. Quindi si faranno due secondari parziali di n (30spire) due secondari parziali di $2n$ (60spire) e due secondari parziali di $3n$ (90spire).

Il rapporto di trasformazione è: $K = \frac{6n}{n} = \frac{6}{1} = 6$

L'Impedenza è: $Zn = \frac{Z6n}{K^2} = \frac{15,7}{6^2} = 0,436 \Omega$

$$Z3n = Zn \cdot 3^2 = 0,436 \cdot 9 = 3,9 \Omega$$

$$Z4n = Zn \cdot 4^2 = 0,436 \cdot 16 = 7 \Omega$$

$$Z6n = Zn \cdot 6^2 = 0,436 \cdot 36 = 15,7 \Omega$$

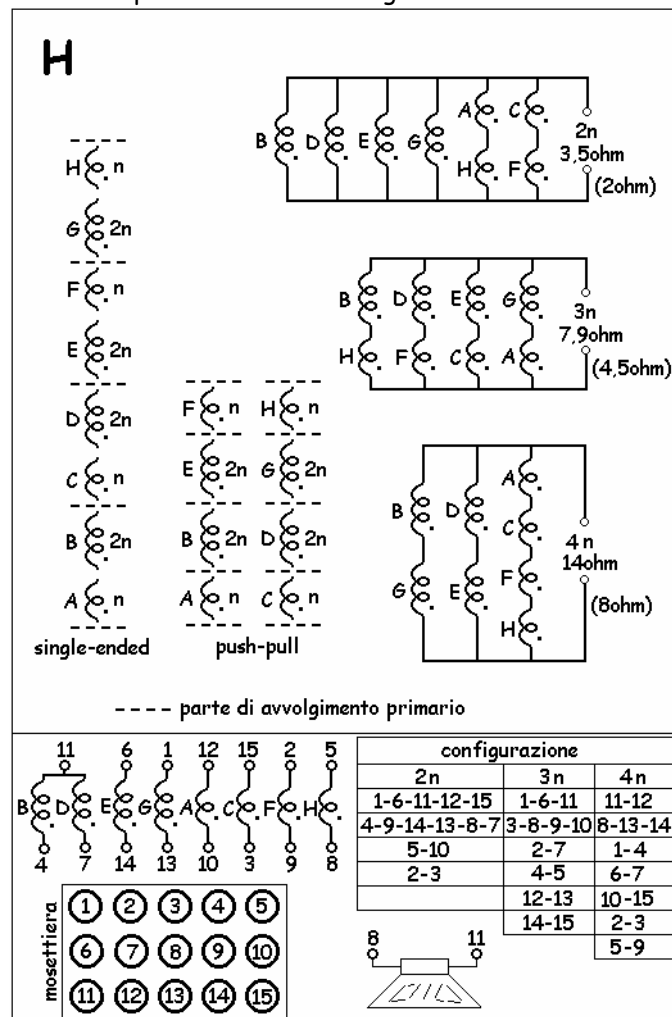
Numero Spire avvolgimento $4n$: $N6n = 180$ spire (come prescritto dal calcolo)

Numero Spire avvolgimento n : $Nn = \frac{N6n}{K} = \frac{180}{6} = 30$ spire

Come si vede in figura l'impedenza più alta è realizzata con il collegamento $6n$ che è ottenuta con due rami di avvolgimenti in parallelo. Questo ci fa capire che gli avvolgimenti devono essere avvolti con un sezione filo corrispondente alla metà di quella indicata dal calcolo per $6n$.

Configurazione H

La configurazione H è la più complicata, perché necessita di un maggior numero di avvolgimenti, però da la possibilità di scegliere fra 3 impedenze di uscita. Avendo a disposizione molti avvolgimenti combinabili fra loro permette a questa configurazione di ottenere una differenza fra le relative impedenze di uscita più ridotta rispetto alle altre configurazioni. Il secondario è realizzato da 8 avvolgimenti (n $2n$ n $2n$ $2n$ n $2n$ n)



che combinati fra loro in $2n$ in $3n$ ed in $4n$ realizzano un adattamento di impedenza di $3,5 \Omega$ di $7,9 \Omega$ e di 14Ω .

Per quel che riguarda il rapporto di trasformazioni fra gli avvolgimenti vale sempre la solita espressione:

$$K = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Per facilitare i collegamenti, in modo da rendere semplice e facile il passaggio da un impedenza di uscita all'altra è possibile utilizzare una morsettiera ad 15 morsetti.

I terminali della cassa acustica e tutti gli inizi e fine di ogni avvolgimento vengono collegati nella parte dietro di questa morsettiera rispettando il numero del morsetto come visibile in figura (es. inizio avv. C sul morsetto 3, fine avv. C morsetto 15, e via di seguito).

Quindi eseguendo dei semplici passi sul davanti di questa morsettiera come indicato nella tabella 'configurazione' è possibile ottenere in uscita una delle tre l'impedenze desiderate. Se ad esempio faccio i passi 1-6-11-12-15 4-9-14-13-8-7 5-10 2-3 corrisponde la configurazione $2n$ che nell'esempio equivale a $3,5 \text{ohm}$.

Esempio pratico: si vuole realizzare un

trasformatore di uscita adattabile a casse sia da 4Ω che da 8Ω e da 16Ω scegliamo la configurazione H, la quale richiede 8 secondari parziali di n $2n$ n $2n$ $2n$ n $2n$ n spire. Consideriamo il valore di impedenza più alta 16Ω vediamo nella configurazione che è realizzata con $4n$. Dal calcolo del trasformatore eseguito in precedenza si vede che il numero di spire secondario per 14Ω corrisponde ad esempio a 182spire, essendo questo numero non divisibile per 4 (questo perché $4n$ è la configurazione che dà 14Ω) proviamo a aumentare o diminuire di qualche spira fino a trovare il valore più vicino al numero calcolato divisibile per 4. Infatti diminuendo di due spire $180:4=45$ spire, tale valore rappresenta 'n'. Quindi si faranno quattro secondari parziali di n (45spire) e quattro secondari parziali di $2n$ (90spire).

Il rapporto di trasformazione è: $K = \frac{4n}{n} = \frac{4}{1} = 4$

L'Impedenza è: $Zn = \frac{Z_{4n}}{K^2} = \frac{14}{4^2} = 0,875 \Omega$

$$Z_{2n} = Zn \cdot 2^2 = 0,875 \cdot 4 = 3,5 \Omega$$

$$Z_{3n} = Zn \cdot 3^2 = 0,875 \cdot 9 = 7,9 \Omega$$

$$Z_{4n} = Zn \cdot 4^2 = 0,875 \cdot 16 = 14 \Omega$$

Numero Spire avvolgimento $4n$: $N_{4n} = 180$ spire (come prescritto dal calcolo)

Numero Spire avvolgimento n : $Nn = \frac{N_{4n}}{K} = \frac{180}{4} = 45$ spire

Come si vede in figura l'impedenza più alta è realizzata con il collegamento $4n$ che è ottenuta con tre rami di avvolgimenti in parallelo. Questo ci fa capire che gli avvolgimenti devono essere avvolti con un sezione filo corrispondente ad un terzo di quella indicata dal calcolo per $4n$.

Identificazione di un trasformatore di uscita

Per verificare o collaudare il trasformatore costruito, oppure identificare un vecchio trasformatore di uscita recuperato da un vecchio finale distrutto, per vedere se può essere riutilizzato per i nostri scopi bisogna seguire questo procedimento dove occorre un normale tester:

Analizziamo lo stato costruttivo del trasformatore: Se tutti i lamierini a forma di E sono inseriti nel rocchetto dallo stesso verso e i lamierini a forma di I sono appoggiati alle E con interposto un cartoncino che funge da spessore creando un traferro siamo in possesso di un trasformatore idoneo Single-Ended. Mentre se i lamierini sono inseriti nel rocchetto in modo alternato come per i comuni trasformatori di alimentazione siamo in possesso di un trasformatore idoneo per Push-Pull. Inoltre il trasformatore di uscita per Push-Pull deve essere munito di presa centrale sul primario.

Misurare con un ohmmetro la resistenza fra i terminali per individuare la continuità degli avvolgimenti e il loro valore ohmico. Al primario corrisponderanno resistenze dell'ordine di centinaia di ohm; mentre al secondario corrisponderanno resistenze dell'ordine di qualche ohm o quasi in cortocircuito.

Collegare l'avvolgimento primario (per push-pull fra A1 e A2, estremi dell'avvolgimento) ai morsetti di un Variac il quale sarà collegato alla rete (220 Vca) e regolare con la manopola una tensione di circa 100 Volt, (misurare tale tensione alternata con un voltmetro).

Collegare ai terminali del secondario una lampada da 6 volt oppure una resistenza da 10ohm, e leggere con un voltmetro il valore della tensione alternata ai capi dell'avvolgimento secondario prima a vuoto (senza resistenza), poi a carico (con resistenza).

Eseguire la media delle due letture effettuate sull' avvolgimento secondario (da vuoto a carico); il rapporto risultante fra la tensione primaria e la tensione secondaria media ci indicherà il rapporto di trasformazione K.

Metodo per determinare l'impedenza secondaria Z_c , fissando l'impedenza primaria Z_a :

Tensione primaria $V_1 = 100 \text{ Volt}$

Tensione secondaria a vuoto $V_{2_0} = 3,2 \text{ Volt}$

Tensione secondaria a carico $V_{2_c} = 2,8 \text{ Volt}$

Calcolo della tensione secondaria media V_2 :

$$V_2 = \frac{(V_{2_0} + V_{2_c})}{2} = \frac{(3,2 + 2,8)}{2} = 3 \text{ V}$$

Il rapporto di trasformazione K sarà dato dal rapporto fra la tensione primaria V_1 diviso tensione secondaria V_2

$$K = \frac{V_1}{V_2} = \frac{100}{3} = 33,3$$

Ipotizziamo un valore di impedenza primaria Z_a , ad esempio 5000 ohm, sarà semplice individuare il valore della impedenza secondaria Z_c , che ci indicherà la possibilità d'impiego di tale trasformatore da identificare, si ha così:

$$Z_c = \frac{Z_a}{K^2} \quad (\Omega) \quad \frac{5000}{33,3^2} = 4,5 \Omega$$

Avendo a disposizione più avvolgimenti secondari, bisogna ripetere le misure e i calcoli dall'inizio tante volte quanti sono gli avvolgimenti secondari.

Avremo così che il trasformatore in esame e del quale non eravamo a conoscenza delle caratteristiche, potrà adattare un amplificatore con stadi asimmetrici (single-ended) ad una valvola finale che richiede un carico anodico Z_a di circa 5000ohm, oppure se munito di presa centrale con stadi simmetrici (push-pull) a due valvole finali che richiedano una impedenza di carico anodo-anodo Z_{aa} di circa 5000ohm con un altoparlante di impedenza Z_c di 4 o 4,5 ohm.

Metodo per determinare l'impedenza primaria Z_a , fissando l'impedenza secondaria Z_c :

Tensione primaria $V_1 = 100 \text{ Volt}$

Tensione secondaria a vuoto $V_{2_0} = 3,2 \text{ Volt}$

Tensione secondaria a carico $V_{2_c} = 2,8 \text{ Volt}$

Calcolo della tensione secondaria media V_2 :

$$V_2 = \frac{(V_{2_0} + V_{2_C})}{2} = \frac{(3,2 + 2,8)}{2} = 3V$$

Eseguendo il quadrato del valore di tensione primaria e secondaria saremo in possesso dei valori orientativi paragonabili a valori di impedenza primaria Z_1 e secondaria Z_2 , che ci indicheranno la possibilità d' impiego di tale trasformatore da identificare, si ha così:

$$Z_1 = V_1^2 (\Omega) \quad 100^2 = 10000 (\Omega)$$

$$Z_2 = V_2^2 (\Omega) \quad 3^2 = 9 (\Omega)$$

Considerando che altoparlanti con bobine a 9 ohm non esistono, ammettiamo ipoteticamente che sia un altoparlante da 4 o 4,5 ohm, quindi supponiamo che si tratti di un avvolgimento secondario Z_c a 4,5 ohm per cui dividiamo:

$$n = \frac{Z_2}{Z_c} = \frac{9}{4,5} = 2$$

$$Z_a = \frac{Z_1}{n} = \frac{10000}{2} = 5000 \Omega$$

Avendo a disposizione più avvolgimenti secondari, bisogna ripetere le misure e i calcoli dall'inizio tante volte quanti sono gli avvolgimenti secondari.

Avremo così che il trasformatore in esame e del quale non eravamo a conoscenza delle caratteristiche, potrà adattare un altoparlante con impedenza Z_c di 4 o 4,5 ohm con stadi asimmetrici (single-ended) ad una valvola finale che richiede un carico anodico Z_a di circa 5000ohm, oppure se munito di presa con stadi simmetrici (push-pull) a due valvole finali che richiedano una impedenza di carico anodo-anodo Z_{aa} di circa 5000ohm.

Metodo per determinare l'induzione B :

Dopo avere determinato i valori di impedenza del trasformatore di uscita Z_a e Z_c , specialmente nel trasformatore asimmetrico ad una valvola finale (single-ended) è necessario conoscere anche il valore di induzione B alla quale lavorerà il trasformatore in esame. Infatti se l' induzione risulta elevata si rischia di saturare il trasformatore, che causa un cattivo trasferimento di potenza fra primario e secondario provocando surriscaldamenti e distorsioni.

Infine diciamo che si può ritenere accettabile il funzionamento del trasformatore di uscita quando i valori di induzione B espressi in Wb / m^2 sono compresi :

per single-ended fra $0,2 Wb/m^2$ e $0,7 Wb/m^2$

per push-pull fra $0,6 Wb/m^2$ e $1,2 Wb/m^2$

Per determinare il numero di spire dell' avvolgimento primario è necessario determinare la f.e.m.i. generata da una spira. Bisogna avvolgere una decina di spire attorno al rocchetto sopra l'avvolgimento già esistente senza smontare i lamierini, questo è possibile utilizzando un filo da elettricista molto sottile (tipo doppino telefonico). Si alimenta il primario del trasformatore (per push-pull fra A1 e A2) ad una tensione alternata qualunque compresa fra 50V e 220V circa che misureremo con un tester. Ai capi dell'avvolgimento appena avvolto si misura con un tester il valore di tensione, che diviso per il numero delle spire avvolte ci dà il valore della f.e.m.i. in una spira. Facendo il rapporto fra la tensione che alimenta il primario V_1 e la f.e.m.i. trovata si ottiene immediatamente il valore approssimativo del numero delle spire dell'avvolgimento primario N_1 .

La misura della sezione del nucleo centrale S_{fe} si ottiene moltiplicando le due misure rilevate con il calibro misurando il valore della colonna "C" e dello spessore del pacco "Sp".

La minima frequenza riproducibile "fmin" è un parametro che ci sta ad indicare la frequenza più bassa che il trasformatore riesce a trasferire al secondario. Questo parametro è indispensabile nei calcoli e può essere scelto su larga scala, dipende dalle nostre esigenze. Tenere presente che le vecchie radio a valvole avevano trasformatori calcolati con fmin di circa 100...200Hz. Mentre gli amplificatori valvolari Hi-Fi dell'epoca avevano trasformatori calcolati con fmin di circa 30...100Hz.

Metodo pratico per determinare l'induzione B

Alimentando il primario alla tensione alternata di 100Vca si rileva sulle 10 spire avvolte una tensione di 0,621Vca quindi calcoliamo i volt per spira:

$$e = \frac{V_2}{N} (V_{\text{spira}}) \quad \frac{0,621}{10} = 0,0621 V_{\text{spira}}$$

$$N_1 = \frac{V_1}{e} (\text{spire}) \quad \frac{100}{0,0621} = 1610 (\text{spire})$$

Si misura una colonna centrale di 3,2 cm e un spessore del pacco di 3,2 cm, quindi:

$$S_{fe} = \frac{C \cdot Sp}{1,11} (cm^2) \quad \frac{3,2 \cdot 3,2}{1,11} = 9,22 (cm^2)$$

il valore di induzione alla quale lavora il trasformatore di uscita sarà dato dalla formula:

$$B = \frac{e}{4,44 \cdot f_{\min} \cdot S_{fe} \cdot 10^{-4}} (Wb/m^2) \quad \frac{0,0621}{4,44 \cdot 30 \cdot 9,22 \cdot 10^{-4}} = 0,5 Wb/m^2$$

Se il valore di induzione ottenuto non rientra nei limiti è possibile ripetere il calcolo aumentando o diminuendo la frequenza riproducibile "fmin" (essendo gli altri parametri fissi). Questo ci farà capire meglio quale sarà la minima frequenza riproducibile "fmin" ottimale per il trasformatore in esame.

Metodo per determinare la Corrente massima degli Avvolgimenti :

Dopo avere determinato il valore di induzione magnetica del trasformatore di uscita B, necessita analizzare ogni singolo avvolgimento per determinare quale sarà la massima corrente che può sopportare senza danneggiarsi.

Lo scopo è quello di individuare al sezione in mm² del filo di rame nudo per poi risalire alla densità di corrente. Per cui di ogni avvolgimento misurare con un calibro o meglio un micrometro il diametro del filo di rame smaltato. Controlliamo con una lente di ingrandimento lo spessore dello smalto isolante. Se è possibile bruciare con un accendino per un tratto di 2cm la parte terminale di un avvolgimento con lo scopo di eliminare lo strato smaltato dell'isolante facilitando così la misura.

Esempio pratico:

supponiamo di misurare un Diametro Filo Nudo di 0,22mm, calcoliamo la Sezione.

$$S_r = \frac{\phi_r^2 \cdot \pi}{4} (mm^2) \quad \frac{0,22^2 \cdot \pi}{4} = 0,038 (mm^2)$$

ipotizziamo una densità di corrente J = 3 A/mm² calcoliamo la corrente massima dell'avvolgimento.

$$I = S_r \cdot J (A) \quad 0,038 \cdot 3 = 0,114 (A)$$

Quindi possiamo dire che su questo avvolgimento può circolare una corrente massima di 114mA.

Dimensionamento di un Trasformatore di Uscita Single-Ended

In questa descrizione ci si limita a fornire qualche indicazione sul dimensionamento dei trasformatori di uscita per amplificatori valvolari single-ended, al fine di inquadrare il problema nei suoi termini generali. Il punto di partenza è quello di individuare il tipo di valvola finale da impiegare e la propria configurazione nel circuito di polarizzazione partendo dai parametri caratteristici da Data-Sheet.

Elementi da prefissare

Conoscendo i seguenti dati di partenza è possibile calcolare un trasformatore di uscita:

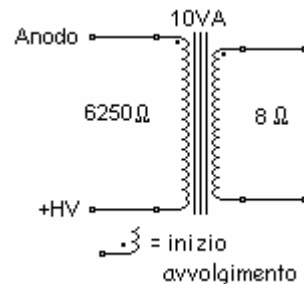
$Z_a = 6250$ impedenza di carico anodico richiesto della valvola in Ω .

$Z_c = 8$ impedenza di carico della cassa acustica in Ω .

$I_a = 0,04$ corrente continua di polarizzazione anodica della valvola in Ampere.

$f_{\min} = 50$ frequenza minima riproducibile a -3dB del trasformatore in Hz.

$B = 0,5$ Induzione Magnetica in Wb/m^2 alla quale si vuole far funzionare il trasformatore.



Se si utilizzano valvole in parallelo è opportuno che le valvole siano tutte uguali, e i parametri iniziali da prefissare subiscono queste variazioni:

L'impedenza Z_a sarà uguale a: all'impedenza di carico anodico richiesta da una singola valvola diviso il numero delle valvole utilizzate. (parallelo delle impedenze)

La corrente I_a sarà uguale a: alla corrente continua di polarizzazione anodica di una valvola moltiplicato per il numero delle valvole utilizzate. (somma delle correnti).

Calcolo dei Parametri di Base

Dai valori di Z_a Z_c I_a è possibile risalire a tutti gli altri dati di massima del trasformatore:

Potenza assorbita dall'avvolgimento primario.

$$P_1 = Z_a \cdot I_a^2 \quad (\text{Watt})$$

$$P_1 = 6250 \cdot 0,040^2 = 10 \text{ Watt}$$

Tensione avvolgimento primario, corrispondente alla tensione di alimentazione del circuito anodico.

$$V_1 = \sqrt{P_1 \cdot Z_a} \quad (\text{Volt})$$

$$V_1 = \sqrt{10 \cdot 6250} = 250 \text{ Volt}$$

Potenza disponibile sull'avvolgimento secondario, tenendo in considerazione il rendimento del trasformatore come si fa per i trasformatori di alimentazione.

$$\eta = 60 + \left(\frac{\log_e (P_1 + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (P_1 + 1000)} \right) \quad (\%)$$

$$60 + \left(\frac{\log_e (10 + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (10 + 1000)} \right) = 72,8 \quad (\%)$$

$$P_2 = P_1 \cdot \eta \quad (\text{Watt})$$

$$P_2 = 10 \cdot 0,728 = 7,28 \text{ Watt}$$

Tensione disponibile sull'avvolgimento secondario.

$$V_2 = \sqrt{P_2 \cdot Z_c} \quad (\text{Volt})$$

$$V_2 = \sqrt{7,28 \cdot 8} = 7,63 \text{ Volt}$$

Corrente disponibile sull'avvolgimento secondario.

$$I_2 = \sqrt{\frac{P_2}{Z_c}} \quad (\text{Ampere})$$

$$I_2 = \sqrt{\frac{7,28}{8}} = 0,95 \text{ Ampere}$$

Diametro dei Conduttori

Dalla corrente e dalla densità di corrente si trova il diametro del filo di rame nudo, poi dalla tabella filo rame si sceglie il valore più prossimo.

$$\phi r = 2 \cdot \sqrt{\frac{I}{J \cdot \pi}} \quad (mm) \quad \phi r_1 = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,04}{2,5 \cdot \pi}} = 0,14 \text{ mm} \quad \phi r_2 = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,95}{2,5 \cdot \pi}} = 0,69 \text{ mm}$$

Dalla tabella Filo Rame scelgo questi fili con le seguenti misure:

Diametro Filo Nudo ϕ_N (mm)	Diametro Filo Isolato ϕ_I (mm)	Sezione filo rame nudo S_f (mm ²)	n° di Spire in 1 cm di spazio N_{spcm}	Coefficien. di Riempimento K_f	Resistenza di 1m di filo R_f (Ω)	Peso di 1m di filo di rame P_f (gr/m)
0,14	0,167	0,0154	53,54	1,12	1,1433	0,1370
0,65	0,71	0,3318	12,64	1,11	0,0530	2,9533

Formato Lamierino

Tramite questa formula pratica si può trovare la superficie totale del Lamierino più adatto:

$$A \times B = 100 \cdot \sqrt{\frac{P_1}{B \cdot f}} \quad (cm^2) \quad A \times B = 100 \cdot \sqrt{\frac{10}{0,5 \cdot 50}} = 63,24 \text{ cm}^2$$

Dal valore di $A \times B$ ottenuto, utilizzando le formule specifiche del lamierino da noi scelto (vedi tabelle lamierini) si ricava la misura della colonna centrale C , di seguito tutte le altre quote del lamierino.

Dalla Tabella Lamierini scelgo questo lamierino con le seguenti misure:

$A \times B$ (cm ²)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)	F (mm)	G (mm)	Tipo	Gf (Kg/1cm)
58,8	70	84	28	14	42	14	14	EI84	0,360

Sezione del Nucleo

Il valore della Sezione Nucleo Ferromagnetico si calcola in funzione della misura C della colonna centrale del lamierino scelto. Se è possibile è sempre meglio utilizzare un rocchetto e quindi un pacco lamellare a sezione quadrata, perché geometricamente a parità di sezione ha il perimetro minore.

$$S_{fe} = \frac{C^2}{K_s} \quad (cm^2) \quad S_{fe} = \frac{2,8^2}{1,11} = 7,06 \text{ cm}^2$$

Dalla Sezione del Nucleo Ferromagnetico e dalla dimensione C del lamierino si ricava lo Spessore del pacco di lamierini, tenendo in considerazione anche il coefficiente di stipamento lamierini K_s .

$$S_p = \frac{S_{fe}}{C} \cdot K_s \quad (cm) \quad S_p = \frac{7,06}{2,8} \cdot 1,11 = 2,8 \text{ cm}$$

Conoscendo le misure del lamierino e dello spessore pacco è necessario trovare un rocchetto di idonee dimensioni. Da un catalogo scelgo un rocchetto in plastica con le seguenti misure:

Cr=29mm	Spr=29mm	M=12mm	H=39mm
---------	----------	--------	--------

Lo spazio disponibile che offre questo rocchetto per ospitare gli avvolgimenti è dato da:

$$S_{disp} = H \cdot M \quad (mm^2) \quad S_{disp} = 39 \cdot 12 = 468 \text{ mm}^2$$

Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro

Conoscendo lo spessore del singolo lamierino $sl=0,5mm$, e lo spessore del pacco lamellare S_p :

$$N_L = \frac{S_p}{K_s \cdot sl} \quad (\text{lamierini}) \quad N_L = \frac{2,8}{1,11 \cdot 0,05} = 50 \text{ lamierini}$$

Considerando il peso di un centimetro di spessore di pacco lamellare G_f calcolo il peso totale del pacco lamellare:

$$G_l = G_f \cdot S_p \quad (Kg) \quad G_l = 0,36 \cdot 2,8 = 1 \text{ Kg}$$

Conoscendo la cifra di perdita specifica del lamierino $ws=3W/Kg$ si possono valutare le perdite nel ferro pf del nucleo ferromagnetico:

$$pf = B^2 \cdot ws \cdot G_l \quad (\text{watt}) \quad pf = 0,5^2 \cdot 3 \cdot 1 = 0,75 \text{ watt}$$

Numero Spire

La valutazione del numero delle spire dell'avvolgimento primario e secondario si effettua in relazione ai volt per spira:

$$e = 4,44 \cdot f_{\min} \cdot Sfe \cdot B \cdot 10^{-4} \quad (V) \qquad e = 4,44 \cdot 50 \cdot 7,06 \cdot 0,5 \cdot 10^{-4} = 0,0784V$$

Al secondario si verifica una caduta di tensione % in relazione alla potenza del trasformatore:

$$v\% = \frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{P_1}{2} + 2,72 \right) \right)^{1,35}} \quad (\%) \qquad \frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{10}{2} + 2,72 \right) \right)^{1,35}} = 15,24 \quad (\%)$$

Si può pertanto scrivere la relazione relativa alla tensione secondaria a vuoto:

$$V_{20} = \left(1 + \frac{v\%}{100} \right) \cdot V_2 \quad (V) \qquad V_{20} = \left(1 + \frac{15,24}{100} \right) \cdot 7,6 = 8,79V$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento primario

$$N_1 = \frac{V_1}{e} \quad (\text{spire}) \qquad N_1 = \frac{250}{0,0784} = 3188 \text{ spire}$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento secondario, considerando la tensione secondaria a vuoto

$$N_2 = \frac{V_{20}}{e} \quad (\text{spire}) \qquad N_2 = \frac{8,79}{0,0784} = 112 \text{ spire}$$

Spessore del Traferro

Solo nei trasformatori di uscita single-ended è necessario realizzare un traferro per evitare la saturazione magnetica. Utilizzando un lamierino a mantello la misura del traferro va divisa per 2.:

$$Tr = \frac{1,256 \cdot 10^{-3} \cdot N_1 \cdot I_a}{B} \quad (mm) \qquad Tr = \frac{1,256 \cdot 10^{-3} \cdot 3188 \cdot 0,04}{0,5} = 0,32 \text{ mm}$$

$$\text{se Lamierino 2 Colonne } T_r = 0,32 \text{ (mm)} \qquad \text{se Lamierino a Mantello (tipo EI)} \quad T_r = \frac{T_r}{2} = 0,16 \text{ (mm)}$$

Induttanza del Primario

Questo valore non serve nel calcolo del trasformatore ma è indice del comportamento alle più basse frequenze insieme con la corrente continua di polarizzazione ed il traferro:

$$L_1 = \frac{Z_a}{2 \cdot \pi \cdot f_{\min}} \quad (\text{Henry}) \qquad L_1 = \frac{6250}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 19,9 \text{ Henry}$$

Lunghezza filo avvolgimento e peso del rame

La lunghezza della spira media attorno al rocchetto è:

$$l_{spm} = 2 \cdot (Cr + M) + 2 \cdot (Spr + M) \quad (mm) \qquad l_{spm} = 2 \cdot (29 + 12) + 2 \cdot (29 + 12) = 164 \text{ mm}$$

La lunghezza totale del filo dell'avvolgimento in relazione al numero di spire:

$$l_{avv} = l_{spm} \cdot N \cdot 10^{-3} \quad (m) \qquad l_{avv1} = 164 \cdot 3188 \cdot 10^{-3} = 523 \text{ m}$$

$$l_{avv2} = 164 \cdot 112 \cdot 10^{-3} = 18,4 \text{ m}$$

Considerando il peso di un metro di filo di rame Pf calcolo il peso rame totale degli avvolgimenti:

$$Gr = Pf \cdot l_{avv} \cdot 10^{-3} \quad (Kg) \qquad Gr_1 = 0,137 \cdot 523 \cdot 10^{-3} = 0,07164 \text{ Kg}$$

$$Gr_2 = 2,953 \cdot 18,4 \cdot 10^{-3} = 0,05431 \text{ Kg}$$

Resistenza degli avvolgimenti

Considerando la resistenza di un metro di filo di rame Rf calcolo la resistenza totale degli avvolgimenti:

$$R = Rf \cdot l_{avv} \quad (\Omega) \qquad R_1 = 1,1433 \cdot 523 = 597 \Omega \qquad R_2 = 0,0530 \cdot 18,4 = 0,975 \Omega$$

Perdite nel Rame

Determiniamo il nuovo valore di densità di corrente in relazione al filo utilizzato, poi conoscendo il peso del rame avvolgimento calcoliamo la potenza persa nel rame.

$$J = \frac{A}{S_f} \quad (A/mm^2) \quad J_1 = \frac{0,04}{0,0154} = 2,59 \text{ A/mm}^2 \quad J_2 = \frac{0,95}{0,3318} = 2,87 \text{ A/mm}^2$$

In relazione ai conduttori scelti la densità di corrente rientra nei limiti stabiliti, per cui si procede con il calcolo della potenza persa nel rame:

$$pr = 2,4 \cdot J^2 \cdot Gr \quad (\text{watt}) \quad pr_1 = 2,4 \cdot 2,59^2 \cdot 0,07164 = 1,16 \text{ watt} \\ pr_2 = 2,4 \cdot 2,87^2 \cdot 0,05431 = 1,07 \text{ watt}$$

Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento

La tabella filo rame fornisce anche il numero delle spire che possono essere contenute assialmente in un centimetro N_{spcm} .

In base all'altezza H della finestra del rocchetto si può stabilire quante spire stanno in uno strato:

$$S_{Str} = H \cdot N_{spcm} \quad (\text{spire} \cdot \text{strato}) \quad S_{Str1} = 3,9 \cdot 53,54 = 208,8 \text{ spire} \cdot \text{strato} \\ S_{Str2} = 3,9 \cdot 12,64 = 49,3 \text{ spire} \cdot \text{strato}$$

Considerando le spire totali si possono calcolare anche il numero degli strati necessari

$$N_{Str} = \frac{N}{S_{Str}} \quad (\text{strati}) \quad N_{Str1} = \frac{3188}{208,8} = 15,23 \text{ strati} \quad N_{Str2} = \frac{112}{49,3} = 2,27 \text{ strati}$$

Controllo Ingombri

Calcoliamo l'Ingombro Rame considerando il diametro filo rame isolato come se fosse di sezione quadrata in modo da tenere conto anche degli spazi d'aria fra spira e spira, che moltiplichiamo per il numero di spire e per il coefficiente di riempimento K_f che tiene conto di una certa tolleranza nell'esecuzione dell'avvolgimento.

$$Ing_R = \phi_1^2 \cdot N \cdot K_f \quad (mm^2) \quad Ing_{R1} = 0,167^2 \cdot 3188 \cdot 1,12 = 99,5 mm^2 \\ Ing_{R2} = 0,71^2 \cdot 112 \cdot 1,11 = 62,6 mm^2$$

Totale Ingombro Rame

$$Ing_{Rtot} = \Sigma Ing_{Rx} \quad (mm^2) \quad Ing_{Rtot} = 99,5 + 62,6 = 162,1 mm^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Strati. Supponendo di interporre fra ogni strato di spire un cartoncino isolante di spessore $I_{st}=0,2mm$,

$$Ing_{IST} = I_{ST} \cdot H \cdot \text{int}(N_{Str}) \quad (mm^2) \quad Ing_{IST1} = 0,2 \cdot 39 \cdot (15) = 117 mm^2 \\ Ing_{IST2} = 0,2 \cdot 39 \cdot (2) = 15,6 mm^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Strati:

$$Ing_{ISTot} = \Sigma Ing_{ISTx} \quad (mm^2) \quad Ing_{ISTot} = 117 + 15,6 = 132,6 mm^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti. Terminata la costruzione alla fine di tutti gli avvolgimenti e fra un avvolgimento e l'altro supponiamo di inserire un cartoncino isolante di spessore $I_{av}=0,5mm$.

$$Ing_{Iav} = I_{AV} \cdot H \quad (mm^2) \quad Ing_{Iav} = 0,5 \cdot 39 = 19,5 mm^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti:

Essendo $n^{\circ}Avv$ il numero di avvolgimenti primari e secondari che compongono il trasformatore.

$$Ing_{Iavtot} = Ing_{Iav} \cdot n^{\circ}Avv \quad (mm^2) \quad Ing_{Iavtot} = 19,5 \cdot 2 = 39 mm^2$$

Calcoliamo l'ingombro totale maggiorandolo di un coefficiente di ingombro percentuale $K_i=10\%$ che tiene conto delle imperfezioni nella realizzazione dell'avvolgimento e degli eventuali spazi d'aria.

$$Ing_{TOT} = Ing_{Rtot} + Ing_{ISTot} + Ing_{LAVtot} \cdot \left(1 + \frac{K_i\%}{100}\right) \quad (mm^2)$$

$$Ing_{TOT} = 162,1 + 132,6 + 39 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) = 367 \, mm^2$$

Il valore dell' ingombro totale è minore dello spazio offerto dal rocchetto, quindi gli avvolgimenti saranno contenuti nel rocchetto comodamente.

Dimensionamento di un Trasformatore di Uscita Push-Pull

In questa descrizione ci si limita a fornire qualche indicazione sul dimensionamento dei trasformatori di uscita per amplificatori valvolari push-pull, al fine di inquadrare il problema nei suoi termini generali. Il punto di partenza è quello di individuare il tipo di valvola finale da impiegare e la propria configurazione nel circuito di polarizzazione partendo dai parametri caratteristici da Data-Sheet.

Elementi da prefissare

Conoscendo i seguenti dati di partenza è possibile calcolare un trasformatore di uscita:

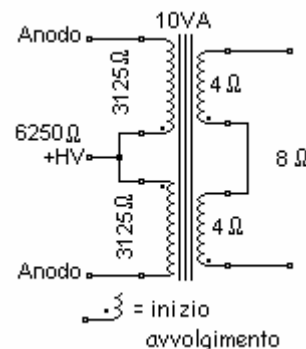
$Z_{aa} = 6250$ impedenza di carico anodo-anodo richiesto delle due valvole in Ω .

$Z_c = 8$ impedenza di carico della cassa acustica in Ω .

$I_a = 0,04$ corrente continua di polarizzazione anodica di una valvola in Ampere.

$f_{min} = 50$ frequenza minima riproducibile a -3dB del trasformatore in Hz.

$B = 0,8$ Induzione Magnetica in Wb/m^2 alla quale si vuole far funzionare il trasformatore.



Se si utilizzano valvole in parallelo è opportuno che le valvole siano tutte uguali, (stesso tipo e stessa marca). Per cui, e i parametri iniziali da prefissare subiscono queste variazioni:

L' impedenza Z_{aa} sarà uguale all'impedenza di carico anodo-anodo richiesta da una coppia di valvole, diviso il numero delle coppie di valvole utilizzate (parallelo delle impedenze).

La corrente I_a sarà uguale alla corrente continua di polarizzazione anodica di una coppia di valvole moltiplicato per il numero delle coppie di valvole utilizzate (somma delle correnti).

Calcolo dei Parametri di Base

Dai valori di Z_{aa} Z_c I_a è possibile risalire a tutti gli altri dati di massima del trasformatore:

Potenza assorbita dall'avvolgimento primario.

$$P_1 = Z_{aa} \cdot I_a^2 \quad (\text{Watt}) \qquad P_1 = 6250 \cdot 0,040^2 = 10 \text{ Watt}$$

Tensione avvolgimento primario, corrispondente alla tensione di alimentazione del circuito anodico.

$$V_1 = \sqrt{P_1 \cdot Z_{aa}} \quad (\text{Volt}) \qquad V_1 = \sqrt{10 \cdot 6250} = 250 \text{ Volt}$$

Potenza disponibile sull'avvolgimento secondario, tenendo in considerazione il rendimento del trasformatore come si fa per i trasformatori di alimentazione.

$$\eta = 60 + \left(\frac{\log_e (P_1 + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (P_1 + 1000)} \right) \quad (\%) \qquad 60 + \left(\frac{\log_e (10 + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (10 + 1000)} \right) = 72,8 \quad (\%)$$

$$P_2 = P_1 \cdot \eta \quad (\text{Watt}) \qquad P_2 = 10 \cdot 0,728 = 7,28 \text{ Watt}$$

Tensione disponibile sull'avvolgimento secondario.

$$V_2 = \sqrt{P_2 \cdot Z_c} \quad (\text{Volt}) \qquad V_2 = \sqrt{7,28 \cdot 8} = 7,63 \text{ Volt}$$

Corrente disponibile sull'avvolgimento secondario.

$$I_2 = \sqrt{\frac{P_2}{Z_c}} \quad (\text{Ampere}) \qquad I_2 = \sqrt{\frac{7,28}{8}} = 0,95 \text{ Ampere}$$

Diametro dei Conduttori

Dalla corrente e dalla densità di corrente si trova il diametro del filo di rame nudo, poi dalla tabella filo rame si sceglie il valore più prossimo.

$$\phi_r = 2 \cdot \sqrt{\frac{I}{J \cdot \pi}} \quad (mm) \quad \phi_{r_1} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,04}{2,5 \cdot \pi}} = 0,14 \text{ mm} \quad \phi_{r_2} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,95}{2,5 \cdot \pi}} = 0,69 \text{ mm}$$

Dalla tabella Filo Rame scelgo questi fili con le seguenti misure:

Diametro Filo Nudo ϕ_N (mm)	Diametro Filo Isolato ϕ_I (mm)	Sezione filo rame nudo S_f (mm ²)	n° di Spire in 1 cm di spazio N_{spcm}	Coefficien. di Riempimento K_f	Resistenza di 1m di filo R_f (Ω)	Peso di 1m di filo di rame P_f (gr/m)
0,14	0,167	0,0154	53,54	1,12	1,1433	0,1370
0,65	0,71	0,3318	12,64	1,11	0,0530	2,9533

Formato Lamierino

Tramite questa formula pratica si può trovare la superficie totale del Lamierino più adatto:

$$A \times B = 100 \cdot \sqrt{\frac{P_1}{B \cdot f}} \quad (cm^2) \quad A \times B = 100 \cdot \sqrt{\frac{10}{0,8 \cdot 50}} = 50 \text{ cm}^2$$

Dal valore di $A \times B$ ottenuto, utilizzando le formule specifiche del lamierino da noi scelto (vedi tabelle lamierini) si ricava la misura della colonna centrale C , di seguito tutte le altre quote del lamierino.

Dalla Tabella Lamierini scelgo questo lamierino con le seguenti misure:

$A \times B$ (cm ²)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)	F (mm)	G (mm)	Tipo	Gf (Kg/1cm)
4,875	62,5	75	25	12,5	37,5	12,5	12,5	EI75	0,287

Sezione del Nucleo

Il valore della Sezione Nucleo Ferromagnetico si calcola in funzione della misura C della colonna centrale del lamierino scelto. Se è possibile è sempre meglio utilizzare un rocchetto e quindi un pacco lamellare a sezione quadrata, perché geometricamente a parità di sezione ha il perimetro minore.

$$S_{fe} = \frac{C^2}{K_s} \quad (cm^2) \quad S_{fe} = \frac{2,5^2}{1,11} = 5,63 \text{ cm}^2$$

Dalla Sezione del Nucleo Ferromagnetico e dalla dimensione C del lamierino si ricava lo Spessore del pacco di lamierini, tenendo in considerazione anche il coefficiente di stipamento lamierini K_s .

$$S_p = \frac{S_{fe}}{C} \cdot K_s \quad (cm) \quad S_p = \frac{5,63}{2,5} \cdot 1,11 = 2,5 \text{ cm}$$

Conoscendo le misure del lamierino e dello spessore pacco è necessario trovare un rocchetto di idonee dimensioni. Da un catalogo scelgo un rocchetto in plastica a due gole con le seguenti misure:

Cr=26mm	Spr=26mm	M=10,5mm	I=16,75mm	L=16,75mm
---------	----------	----------	-----------	-----------

Lo spazio disponibile che offre questo rocchetto per ospitare gli avvolgimenti è dato da:

$$S_{disp} = I \cdot M \quad (mm^2) \quad S_{disp} = 16,75 \cdot 10,5 = 175,8 \text{ mm}^2$$

$$S_{disp} = L \cdot M \quad (mm^2) \quad S_{disp} = 16,75 \cdot 10,5 = 175,8 \text{ mm}^2$$

Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro

Conoscendo lo spessore del singolo lamierino $sl=0,5mm$, e lo spessore del pacco lamellare S_p :

$$N_L = \frac{S_p}{K_s \cdot sl} \quad (\text{lamierini}) \quad N_L = \frac{2,5}{1,11 \cdot 0,05} = 45 \text{ lamierini}$$

Considerando il peso di un centimetro di spessore di pacco lamellare G_f calcolo il peso totale del pacco lamellare:

$$G_l = G_f \cdot S_p \quad (Kg) \quad G_l = 0,287 \cdot 2,5 = 0,7175 \text{ Kg}$$

Conoscendo la cifra di perdita specifica del lamierino $ws = 3W/Kg$ si possono valutare le perdite nel ferro pf del nucleo ferromagnetico:

$$pf = B^2 \cdot ws \cdot Gl \quad (\text{watt}) \qquad pf = 0,8^2 \cdot 3 \cdot 0,7175 = 1,38 \text{ watt}$$

Numero Spire

La valutazione del numero delle spire dell'avvolgimento primario e secondario si effettua in relazione ai volt per spira:

$$e = 4,44 \cdot f_{\min} \cdot Sfe \cdot B \cdot 10^{-4} \quad (V) \qquad e = 4,44 \cdot 50 \cdot 5,63 \cdot 0,8 \cdot 10^{-4} = 0,1V$$

Al secondario si verifica una caduta di tensione % in relazione alla potenza del trasformatore:

$$v\% = \frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{P_1}{2} + 2,72 \right) \right)^{1,35}} \quad (\%) \qquad \frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{10}{2} + 2,72 \right) \right)^{1,35}} = 15,24 \quad (\%)$$

Si può pertanto scrivere la relazione relativa alla tensione secondaria a vuoto:

$$V_{20} = \left(1 + \frac{v\%}{100} \right) \cdot V_2 \quad (V) \qquad V_{20} = \left(1 + \frac{15,24}{100} \right) \cdot 7,6 = 8,79V$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento primario

$$N_1 = \frac{V_1}{e} \quad (\text{spire}) \qquad N_1 = \frac{250}{0,1} = 2500 \text{ spire}$$

L'avvolgimento primario Z_{aa} va diviso in due creando una presa centrale dove si collega il positivo della tensione anodica. Per ciò si devono realizzare due avvolgimenti identici per le due valvole che poi collegheremo in serie:

$$N_1^x = \frac{N_1}{2} \quad (\text{spire}) \qquad N_1^I = \frac{2500}{2} = 1250 \text{ spire} \qquad N_1^{II} = \frac{2500}{2} = 1250 \text{ spire}$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento secondario, considerando la tensione secondaria a vuoto

$$N_2 = \frac{V_{20}}{e} \quad (\text{spire}) \qquad N_2 = \frac{8,79}{0,1} = 88 \text{ spire}$$

Siccome per facilitare la costruzione si utilizza un rocchetto a due gole anche l'avvolgimento secondario va diviso in due avvolgimenti identici che poi collegheremo in serie:

$$N_2^x = \frac{N_2}{2} \quad (\text{spire}) \qquad N_2^I = \frac{88}{2} = 44 \text{ spire} \qquad N_2^{II} = \frac{88}{2} = 44 \text{ spire}$$

Induttanza del Primario

Questo valore non serve nel calcolo del trasformatore ma è indice del comportamento alle più basse frequenze insieme con la corrente continua di polarizzazione ed il traferro:

$$L_1 = \frac{Z_{aa}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\min}} \quad (\text{Henry}) \qquad L_1 = \frac{6250}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 19,9 \text{ Henry}$$

Lunghezza filo avvolgimento e peso del rame

La lunghezza della spira media attorno al rocchetto è:

$$l_{spm} = 2 \cdot (Cr + M) + 2 \cdot (Spr + M) \quad (mm) \qquad l_{spm} = 2 \cdot (26 + 10,5) + 2 \cdot (26 + 10,5) = 146 \text{ mm}$$

La lunghezza totale del filo dell'avvolgimento in relazione al numero di spire:

$$l_{avv} = l_{spm} \cdot N \cdot 10^{-3} \quad (m) \qquad l_{avv1} = 146 \cdot 2500 \cdot 10^{-3} = 365 \text{ m}$$

$$l_{avv2} = 146 \cdot 88 \cdot 10^{-3} = 12,8 \text{ m}$$

Considerando il peso di un metro di filo di rame Pf calcolo il peso rame totale degli avvolgimenti:

$$Gr = Pf \cdot l_{avv} \cdot 10^{-3} \quad (Kg) \qquad Gr_1 = 0,137 \cdot 365 \cdot 10^{-3} = 0,050 \text{ Kg}$$

$$Gr_2 = 2,953 \cdot 12,8 \cdot 10^{-3} = 0,038 \text{ Kg}$$

Resistenza degli avvolgimenti

Considerando la resistenza di un metro di filo di rame R_f calcolo la resistenza totale degli avvolgimenti:

$$R = R_f \cdot l_{avv} \quad (\Omega) \quad R_1 = 1,1433 \cdot 365 = 417 \Omega \quad R_2 = 0,0530 \cdot 12,8 = 0,68 \Omega$$

Perdite nel Rame

Determiniamo il nuovo valore di densità di corrente in relazione al filo utilizzato, poi conoscendo il peso del rame avvolgimento calcoliamo la potenza persa nel rame.

$$J = \frac{A}{S_f} \quad (A/mm^2) \quad J_1 = \frac{0,04}{0,0154} = 2,59 A/mm^2 \quad J_2 = \frac{0,95}{0,3318} = 2,87 A/mm^2$$

In relazione ai conduttori scelti la densità di corrente rientra nei limiti stabiliti, per cui si procede con il calcolo della potenza persa nel rame:

$$pr = 2,4 \cdot J^2 \cdot Gr \quad (\text{watt}) \quad pr_1 = 2,4 \cdot 2,59^2 \cdot 0,050 = 0,805 \text{ watt} \\ pr_2 = 2,4 \cdot 2,87^2 \cdot 0,038 = 0,751 \text{ watt}$$

Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento

La tabella filo rame fornisce anche il numero delle spire che possono essere contenute assialmente in un centimetro N_{spcm} .

In base all'altezza I e L della finestra del rocchetto si può stabilire quante spire stanno in uno strato. Il calcolo va eseguito per ogni tipo di filo usato e per l'altezza di ogni gola utilizzata per quel filo:

$$S_{Str} = I \cdot N_{spcm} \quad (\text{spire} \cdot \text{strato}) \quad S_{Str1} = 1,675 \cdot 53,54 = 89,68 \text{ spire} \cdot \text{strato} \\ S_{Str} = L \cdot N_{spcm} \quad (\text{spire} \cdot \text{strato}) \quad S_{Str2} = 1,675 \cdot 12,64 = 21,17 \text{ spire} \cdot \text{strato}$$

Considerando le spire totali si possono calcolare anche il numero degli strati necessari

$$N_{Str} = \frac{N}{S_{Str}} \quad (\text{strati}) \quad N_{Str1} = \frac{2500}{89,68} = 27,8 \text{ strati} \quad N_{Str2} = \frac{88}{21,17} = 4,15 \text{ strati}$$

Ovviamente gli strati vanno suddivisi nelle due gole.

Controllo Ingombri

Calcoliamo l'Ingombro Rame considerando il diametro filo rame isolato come se fosse di sezione quadrata in modo da tenere conto anche degli spazi d'aria fra spira e spira, che moltiplichiamo per il numero di spire e per il coefficiente di riempimento K_f che tiene conto di una certa tolleranza nell'esecuzione dell'avvolgimento.

$$Ing_R = \phi_i^2 \cdot N \cdot K_f \quad (mm^2) \quad Ing_{R1} = 0,167^2 \cdot 2500 \cdot 1,12 = 78 mm^2 \\ Ing_{R2} = 0,71^2 \cdot 88 \cdot 1,11 = 49,2 mm^2$$

Totale Ingombro Rame

$$Ing_{Rtot} = \Sigma Ing_{Rx} \quad (mm^2) \quad Ing_{Rtot} = 78 + 49,2 = 127,2 mm^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Strati. Supponendo di interporre fra ogni strato di spire un cartoncino isolante di spessore $I_{st}=0,2mm$,

$$Ing_{IST} = I_{ST} \cdot H \cdot \text{int}(N_{Str}) \quad (mm^2) \quad Ing_{IST1} = 0,2 \cdot 16,75 \cdot (27) = 90,45 mm^2 \\ Ing_{IST2} = 0,2 \cdot 16,75 \cdot (4) = 13,4 mm^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Strati:

$$Ing_{ISTtot} = \Sigma Ing_{ISTx} \quad (mm^2) \quad Ing_{ISTtot} = 90,45 + 13,4 = 103,85 mm^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti. Terminata la costruzione alla fine di tutti gli avvolgimenti e fra un avvolgimento e l'altro supponiamo di inserire un cartoncino isolante di spessore $I_{av}=0,5mm$.

$$Ing_{I_{AV}} = I_{AV} \cdot H \quad (mm^2) \qquad Ing_{I_{AV}} = 0,5 \cdot 16,75 = 8,375 mm^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti:

Essendo $n^{\circ}Avv$ il numero di avvolgimenti primari e secondari che compongono il trasformatore.

$$Ing_{I_{AVtot}} = Ing_{I_{AV}} \cdot n^{\circ}Avv \quad (mm^2) \qquad Ing_{I_{AVtot}} = 8,375 \cdot 4 = 33,5 mm^2$$

Calcoliamo l'ingombro totale maggiorandolo di un coefficiente di ingombro percentuale $K_i=10\%$ che tiene conto delle imperfezioni nella realizzazione dell'avvolgimento e degli eventuali spazi d'aria.

$$Ing_{TOT} = Ing_{R_{tot}} + Ing_{I_{STtot}} + Ing_{I_{AVtot}} \cdot \left(1 + \frac{K_i\%}{100}\right) \quad (mm^2)$$

$$Ing_{TOT} = 127,2 + 103,85 + 33,5 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) = 291 mm^2$$

Essendo gli avvolgimenti suddivisi in parti uguali nelle due gole si ha:

$$Ing_{Gx} = \frac{Ing_{TOT}}{2} \quad (mm^2) \qquad Ing_{G1} = \frac{291}{2} = 145 mm^2 \qquad Ing_{G2} = \frac{291}{2} = 145 mm^2$$

Il valore dell' ingombro totale è minore dello spazio offerto dal rocchetto, quindi gli avvolgimenti saranno contenuti nel rocchetto comodamente.

Dimensionamento di un Trasformatore di Uscita Push-Pull configurazione D

In questa descrizione ci si limita a fornire qualche indicazione sul dimensionamento dei trasformatori di uscita per amplificatori valvolari push-pull, al fine di inquadrare il problema nei suoi termini generali. Il punto di partenza è quello di individuare il tipo di valvola finale da impiegare e la propria configurazione nel circuito di polarizzazione partendo dai parametri caratteristici da Data-Sheet.

Elementi da prefissare

Conoscendo i seguenti dati di partenza è possibile calcolare un trasformatore di uscita:

$Z_{aa} = 6250$ impedenza di carico anodo-anodo richiesto delle due valvole in Ω .

$Z_c = 8$ impedenza di carico della cassa acustica in Ω .

$I_a = 0,040$ corrente continua di polarizzazione anodica di una valvola in Ampere.

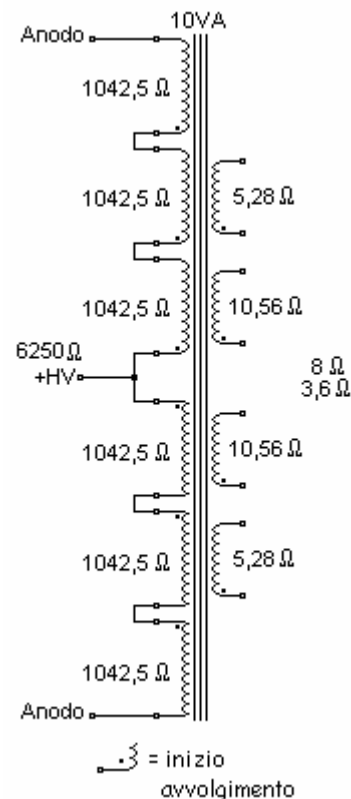
$f_{min} = 50$ frequenza minima riproducibile a -3dB del trasformatore in Hz.

$B = 0,8$ Induzione Magnetica in Wb/m^2 alla quale si vuole far funzionare il trasformatore.

Se si utilizzano valvole in parallelo è opportuno che le valvole siano tutte uguali, (stesso tipo e stessa marca). Per cui, e i parametri iniziali da prefissare subiscono queste variazioni:

L' impedenza Z_{aa} sarà uguale all'impedenza di carico anodo-anodo richiesta da una coppia di valvole, diviso il numero delle coppie di valvole utilizzate (parallelo delle impedenze).

La corrente I_a sarà uguale alla corrente continua di polarizzazione anodica di una coppia di valvole moltiplicato per il numero delle coppie di valvole utilizzate (somma delle correnti).



Calcolo dei Parametri di Base

Dai valori di Z_{aa} Z_c I_a è possibile risalire a tutti gli altri dati di massima del trasformatore:

Potenza assorbita dall'avvolgimento primario.

$$P_1 = Z_{aa} \cdot I_a^2 \quad (\text{Watt})$$

$$P_1 = 6250 \cdot 0,040^2 = 10 \text{ Watt}$$

Tensione avvolgimento primario, corrispondente alla tensione di alimentazione del circuito anodico.

$$V_1 = \sqrt{P_1 \cdot Z_{aa}} \quad (\text{Volt})$$

$$V_1 = \sqrt{10 \cdot 6250} = 250 \text{ Volt}$$

Potenza disponibile sull'avvolgimento secondario, tenendo in considerazione il rendimento del trasformatore come si fa per i trasformatori di alimentazione.

$$\eta = 60 + \left(\frac{\log_e (P_1 + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (P_1 + 1000)} \right) \quad (\%)$$

$$60 + \left(\frac{\log_e (10 + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (10 + 1000)} \right) = 72,8 \quad (\%)$$

$$P_2 = P_1 \cdot \eta \quad (\text{Watt})$$

$$P_2 = 10 \cdot 0,728 = 7,28 \text{ Watt}$$

Tensione disponibile sull'avvolgimento secondario.

$$V_2 = \sqrt{P_2 \cdot Z_c} \quad (\text{Volt})$$

$$V_2 = \sqrt{7,28 \cdot 8} = 7,63 \text{ Volt}$$

Corrente disponibile sull'avvolgimento secondario.

$$I_2 = \sqrt{\frac{P_2}{Z_c}} \quad (A)$$

$$I_2 = \sqrt{\frac{7,28}{8}} = 0,954 \text{ A}$$

Diametro dei Conduttori

Nella configurazione D l'impedenza secondaria più alta è ottenuta con due rami di avvolgimenti in parallelo. Per cui la corrente secondaria va suddivisa nei due rami. Quindi ogni avvolgimento secondario può essere avvolto con una sezione filo corrispondente alla metà di quella calcolata:

$$I_2 = \frac{I_2}{2} \quad (A)$$

$$I_2 = \frac{0,954}{2} = 0,477 \text{ A}$$

Dalla corrente e dalla densità di corrente si trova il diametro del filo di rame nudo, poi dalla tabella filo rame si sceglie il valore più prossimo.

$$\phi_r = 2 \cdot \sqrt{\frac{I}{J \cdot \pi}} \quad (mm)$$

$$\phi_{r1} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,040}{2,5 \cdot \pi}} = 0,14 \text{ mm}$$

$$\phi_{r2} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,477}{2,5 \cdot \pi}} = 0,49 \text{ mm}$$

Dalla tabella Filo Rame scelgo questi fili con le seguenti misure:

Diametro Filo Nudo ϕ_N (mm)	Diametro Filo Isolato ϕ_I (mm)	Sezione filo rame nudo S_f (mm ²)	n° di Spire in 1 cm di spazio N_{spcm}	Coefficien. di Riempimento K_f	Resistenza di 1m di filo R_f (Ω)	Peso di 1m di filo di rame P_f (gr/m)
0,14	0,167	0,0154	53,54	1,12	1,1433	0,1370
0,45	0,51	0,1590	17,58	1,12	0,1107	1,4155

Formato Lamierino

Tramite questa formula pratica si può trovare la superficie totale del Lamierino più adatto:

$$A \times B = 100 \cdot \sqrt{\frac{P_1}{B \cdot f}} \quad (cm^2)$$

$$A \times B = 100 \cdot \sqrt{\frac{10}{0,8 \cdot 50}} = 50 \text{ cm}^2$$

Dal valore di AxB ottenuto, utilizzando le formule specifiche del lamierino da noi scelto (vedi tabelle lamierini) si ricava la misura della colonna centrale C, di seguito tutte le altre quote del lamierino.

Dalla Tabella Lamierini scelgo questo lamierino con le seguenti misure:

AxB(cm ²)	A(mm)	B(mm)	C(mm)	D(mm)	E(mm)	F(mm)	G(mm)	Tipo	Gf(Kg/1cm)
4,875	62,5	75	25	12,5	37,5	12,5	12,5	EI75	0,287

Sezione del Nucleo

Il valore della Sezione Nucleo Ferromagnetico si calcola in funzione della misura C della colonna centrale del lamierino scelto. Se è possibile è sempre meglio utilizzare un rocchetto e quindi un pacco lamellare a sezione quadrata, perché geometricamente a parità di sezione ha il perimetro minore.

$$S_{fe} = \frac{C^2}{K_s} \quad (cm^2)$$

$$S_{fe} = \frac{2,5^2}{1,11} = 5,63 \text{ cm}^2$$

Dalla Sezione del Nucleo Ferromagnetico e dalla dimensione C del lamierino si ricava lo Spessore del pacco di lamierini, tenendo in considerazione anche il coefficiente di stipamento lamierini K_s .

$$S_p = \frac{S_{fe}}{C} \cdot K_s \quad (cm)$$

$$S_p = \frac{5,63}{2,5} \cdot 1,11 = 2,5 \text{ cm}$$

Conoscendo le misure del lamierino e dello spessore pacco è necessario trovare un rocchetto di idonee dimensioni. Da un catalogo scelgo un rocchetto in plastica a due gole con le seguenti misure:

Cr=26mm	Spr=26mm	M=10,5mm	I=16,75mm	L=16,75mm
---------	----------	----------	-----------	-----------

Lo spazio disponibile che offre questo rocchetto per ospitare gli avvolgimenti è dato da:

$$S_{disp} = I \cdot M \quad (mm^2)$$

$$S_{disp} = 16,75 \cdot 10,5 = 175,8 \text{ mm}^2$$

$$S_{disp} = L \cdot M \quad (mm^2)$$

$$S_{disp} = 16,75 \cdot 10,5 = 175,8 \text{ mm}^2$$

Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro

Conoscendo lo spessore del singolo lamierino $sl=0,5mm$, e lo spessore del pacco lamellare Sp :

$$N_L = \frac{Sp}{K_S \cdot sl} \quad (\text{lamierini}) \qquad N_L = \frac{2,5}{1,11 \cdot 0,05} = 45 \text{ lamierini}$$

Considerando il peso di un centimetro di spessore di pacco lamellare Gf calcolo il peso totale del pacco lamellare:

$$Gl = Gf \cdot Sp \quad (Kg) \qquad Gl = 0,287 \cdot 2,5 = 0,7175 \text{ Kg}$$

Conoscendo la cifra di perdita specifica del lamierino $ws = 3W/Kg$ si possono valutare le perdite nel ferro pf del nucleo ferromagnetico:

$$pf = B^2 \cdot ws \cdot Gl \quad (\text{watt}) \qquad pf = 0,8^2 \cdot 3 \cdot 0,7175 = 1,38 \text{ watt}$$

Numero Spire

La valutazione del numero delle spire dell'avvolgimento primario e secondario si effettua in relazione ai volt per spira:

$$e = 4,44 \cdot f_{\min} \cdot Sfe \cdot B \cdot 10^{-4} \quad (V) \qquad e = 4,44 \cdot 50 \cdot 5,63 \cdot 0,8 \cdot 10^{-4} = 0,1V$$

Al secondario si verifica una caduta di tensione % in relazione alla potenza del trasformatore:

$$v\% = \frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{P_1}{2} + 2,72 \right) \right)^{1,35}} \quad (\%) \qquad \frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{10}{2} + 2,72 \right) \right)^{1,35}} = 15,24 \quad (\%)$$

Si può pertanto scrivere la relazione relativa alla tensione secondaria a vuoto:

$$V_{20} = \left(1 + \frac{v\%}{100} \right) \cdot V_2 \quad (V) \qquad V_{20} = \left(1 + \frac{15,24}{100} \right) \cdot 7,6 = 8,79V$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento primario

$$N_1 = \frac{V_1}{e} \quad (\text{spire}) \qquad N_1 = \frac{250}{0,1} = 2500 \text{ spire}$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento secondario, considerando la tensione secondaria a vuoto

$$N_2 = \frac{V_{20}}{e} \quad (\text{spire}) \qquad N_2 = \frac{8,79}{0,1} = 88 \text{ spire}$$

Avvolgimenti Parziali

L'avvolgimento primario N_1 nella configurazione D va diviso in 6 parti creando una presa centrale (3+3 avvolgimenti) dove si collega il positivo della tensione anodica. Per ciò si devono realizzare 6 avvolgimenti identici da avvolgere nelle rispettive 2 gole del rocchetto dedicati alle due valvole, che poi collegheremo in serie:

$$N_1^x = \frac{N_1}{6} \quad (\text{spire}) \qquad N_1^{I-VI} = \frac{2500}{6} = 417 \text{ spire}$$

Nella configurazione D l'impedenza secondaria più alta è ottenuta con il collegamento 3n, per cui anche l'avvolgimento secondario N_2 va diviso in parti, il cui il numero spire dell'avvolgimento parziale Nn sarà:

$$Nn = \frac{N_2}{3} \quad (\text{spire}) \qquad Nn = \frac{88}{3} = 29 \text{ spire}$$

Nella configurazione D sono previsti anche 2 avvolgimenti parziali di 2n spire:

$$N2n = Nn \cdot 2 \quad (\text{spire}) \qquad N2n = 29 \cdot 2 = 58 \text{ spire}$$

Quindi il secondario sarà composto da 4 avvolgimenti rispettivamente di 58spire, 58spire, 29spire, 29spire, combinabili in serie e parallelo per ottenere le impedenze descritte in configurazione D.

Altri Parametri degli Avvolgimenti Parziali

Anche se non ci interessano alla fine della realizzazione pratica del trasformatore di uscita è utile sapere per meglio capire come calcolare anche gli altri parametri relativi agli avvolgimenti parziali.

Primario

La configurazione D prevede che l'avvolgimento primario venga suddiviso in 6 parti, la tensione di una parte di avvolgimento sarà:

$$V_1^I = N_1^I \cdot e \quad (V) \qquad V_1^I = 417 \cdot 0,1 = 41,7 \text{ V}$$

Tutte le 6 parti di avvolgimento primario sono collegate in serie, quindi percorsi dalla stessa corrente, da ciò la potenza dell'avvolgimento parziale sarà:

$$P_1^I = V_1^I \cdot I_1 \quad (\text{Watt}) \qquad P_1^I = 41,7 \cdot 0,040 = 1,668 \text{ Watt}$$

L'impedenza che il singolo avvolgimento parziale assume quando è alimentato con la sua tensione V_1^I e con la sua corrente I_1 :

$$Z_1^I = \frac{V_1^{I^2}}{P_1^I} \quad (\Omega) \qquad Z_1^I = \frac{41,7^2}{1,668} = 1042,5 \Omega$$

Come già detto collegando gli avvolgimenti in serie si ottiene l'impedenza risultante, per ciò ogni metà primario costituita da 3 avvolgimenti parziali collegati in serie presenta una impedenza di:

$$Z_{a1} = Z_1^I + Z_1^{II} + Z_1^{III} \quad (\Omega) \qquad Z_{a1} = 1042,5 + 1042,5 + 1042,5 = 3127,5 \Omega$$

Secondario

La tensione a vuoto del secondario parziale di n spire sarà:

$$V_{n0} = Nn \cdot e \quad (\text{spire}) \qquad V_{n0} = 29 \cdot 0,1 = 2,9 \text{ V}$$

La tensione disponibile del secondario parziale di n spire sarà

$$V_n = \frac{V_{n0}}{\left(1 + \frac{v\%}{100}\right)} \quad (V) \qquad V_n = \frac{2,9}{\left(1 + \frac{15,24}{100}\right)} = 2,52 \text{ V}$$

L'impedenza secondaria più alta è ottenuta con due rami di avvolgimenti in parallelo. Per cui la corrente secondaria va suddivisa nei due rami, da ciò la potenza dell'avvolgimento parziale sarà:

$$P_n = V_n \cdot I_n \quad (\text{Watt}) \qquad P_n = 2,52 \cdot 0,477 = 1,2 \text{ Watt}$$

L'impedenza che il singolo avvolgimento n è in grado di alimentare un carico correttamente con la sua tensione V_n e con la sua corrente I_n :

$$Z_n = \frac{V_n^2}{P_n} \quad (\Omega) \qquad Z_{2n} = \frac{2,52^2}{1,2} = 5,28 \Omega$$

Combinando fra loro gli avvolgimenti (in serie e in parallelo) si ottiene l'impedenza risultante. La configurazione D prevede che il collegamento 3n si ha un'impedenza di 8Ω ed è ottenuta con un collegamento di 2n e n in serie, di 2n e n in serie, ed entrambi collegati in parallelo.

$$Z_{2n} = Z_n + Z_n \quad (\Omega) \qquad Z_{2n} = 5,28 + 5,28 = 10,56 \Omega$$

$$Z_{3n} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{2n} + Z_n} + \frac{1}{Z_{2n} + Z_n}} \qquad Z_{3n} = \frac{1}{\frac{1}{10,56 + 5,28} + \frac{1}{10,56 + 5,28}} = 7,92 \Omega$$

Mentre con il collegamento 2n si ha un'impedenza di $3,5\Omega$ ed è ottenuta con un collegamento di n e n in serie, di 2n, di 2n, poi collegati in parallelo.

$$Z_{3n} = \frac{1}{\frac{1}{Z_n + Z_n} + \frac{1}{Z_{2n}} + \frac{1}{Z_{2n}}}$$

$$Z_{3n} = \frac{1}{\frac{1}{5,28 + 5,28} + \frac{1}{10,56} + \frac{1}{10,56}} = 3,52 \Omega$$

Induttanza del Primario

Questo valore non serve nel calcolo del trasformatore ma è indice del comportamento alle più basse frequenze insieme con la corrente continua di polarizzazione ed il traferro:

$$L_1 = \frac{Z_{aa}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\min}} \quad (\text{Henry})$$

$$L_1 = \frac{6250}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 19,9 \text{ Henry}$$

Lunghezza filo avvolgimento e peso del rame

La lunghezza della spira media attorno al rocchetto è:

$$l_{spm} = 2 \cdot (Cr + M) + 2 \cdot (Spr + M) \quad (\text{mm})$$

$$l_{spm} = 2 \cdot (26 + 10,5) + 2 \cdot (26 + 10,5) = 146 \text{ mm}$$

La lunghezza totale del filo dell'avvolgimento in relazione al numero di spire:

$$l_{avv} = l_{spm} \cdot N \cdot 10^{-3} \quad (\text{m})$$

$$l_{avv1} = 146 \cdot 417 \cdot 10^{-3} = 60,9 \text{ m}$$

$$l_{avv2} = 146 \cdot 29 \cdot 10^{-3} = 4,23 \text{ m}$$

$$l_{avv3} = 146 \cdot 58 \cdot 10^{-3} = 8,46 \text{ m}$$

Considerando il peso di un metro di filo di rame Pf calcolo il peso rame totale degli avvolgimenti:

$$Gr = Pf \cdot l_{avv} \cdot 10^{-3} \quad (\text{Kg})$$

$$Gr_1 = 0,137 \cdot 60,9 \cdot 10^{-3} = 0,0083 \text{ Kg}$$

$$Gr_2 = 1,4155 \cdot 4,23 \cdot 10^{-3} = 0,0059 \text{ Kg}$$

$$Gr_3 = 1,4155 \cdot 8,46 \cdot 10^{-3} = 0,0119 \text{ Kg}$$

Resistenza degli avvolgimenti

Considerando la resistenza di un metro di filo di rame Rf calcolo la resistenza totale degli avvolgimenti:

$$R = Rf \cdot l_{avv} \quad (\Omega)$$

$$R_1 = 1,1433 \cdot 60,9 = 69,61 \Omega$$

$$R_2 = 0,1107 \cdot 4,23 = 0,47 \Omega$$

$$R_3 = 0,1107 \cdot 8,46 = 0,94 \Omega$$

Perdite nel Rame

Determiniamo il nuovo valore di densità di corrente in relazione al filo utilizzato, poi conoscendo il peso del rame avvolgimento calcoliamo la potenza persa nel rame.

$$J = \frac{A}{Sf} \quad (\text{A/mm}^2)$$

$$J_1 = \frac{0,04}{0,0154} = 2,59 \text{ A/mm}^2$$

$$J_2 = \frac{0,477}{0,1590} = 3 \text{ A/mm}^2$$

$$J_3 = \frac{0,477}{0,1590} = 3 \text{ A/mm}^2$$

In relazione ai conduttori scelti la densità di corrente rientra nei limiti stabiliti, per cui si procede con il calcolo della potenza persa nel rame:

$$pr = 2,4 \cdot J^2 \cdot Gr \quad (\text{watt})$$

$$pr_1 = 2,4 \cdot 2,59^2 \cdot 0,0083 = 0,133 \text{ watt}$$

$$pr_2 = 2,4 \cdot 3^2 \cdot 0,0059 = 0,127 \text{ watt}$$

$$pr_3 = 2,4 \cdot 3^2 \cdot 0,0119 = 0,257 \text{ watt}$$

Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento

La tabella filo rame fornisce anche il numero delle spire che possono essere contenute assialmente in un centimetro N_{spcm} .

In base all'altezza I e L della finestra del rocchetto si può stabilire quante spire stanno in uno strato. Il calcolo va eseguito per ogni tipo di filo usato e per la larghezza di ogni gola utilizzata per quel filo:

$$S_{Str} = I \cdot N_{spcm} \quad (\text{spire} \cdot \text{strato})$$

$$S_{Str1} = 1,675 \cdot 53,54 = 89,68 \text{ spire} \cdot \text{strato}$$

$$S_{Str} = L \cdot N_{spcm} \quad (\text{spire} \cdot \text{strato})$$

$$S_{Str2} = 1,675 \cdot 17,58 = 29,44 \text{ spire} \cdot \text{strato}$$

Considerando le spire totali si possono calcolare anche il numero degli strati necessari

$$N_{Str} = \frac{N}{S_{Str}} \quad (\text{strati})$$

$$N_{Str1} = \frac{417}{89,68} = 4,64 \text{ strati}$$

$$N_{Str2} = \frac{29}{29,44} = 0,98 \text{ strati}$$

$$N_{Str3} = \frac{58}{29,44} = 1,97 \text{ strati}$$

Ovviamente gli strati vanno suddivisi nelle due gole.

Controllo Ingombri

Calcoliamo l'Ingombro Rame considerando il diametro filo rame isolato come se fosse di sezione quadrata in modo da tenere conto anche degli spazi d'aria fra spira e spira, che moltiplichiamo per il numero di spire e per il coefficiente di riempimento K_f che tiene conto di una certa tolleranza nell'esecuzione dell'avvolgimento.

$$Ing_R = \phi_1^2 \cdot N \cdot K_f \quad (mm^2)$$

$$Ing_{R1} = 0,167^2 \cdot 417 \cdot 1,12 = 13,02 \text{ mm}^2$$

$$Ing_{R2} = 0,51^2 \cdot 29 \cdot 1,12 = 8,44 \text{ mm}^2$$

$$Ing_{R3} = 0,51^2 \cdot 58 \cdot 1,12 = 16,89 \text{ mm}^2$$

Totale Ingombro Rame considerando che nella configurazione D sono presenti 6 avvolgimenti primari e 2 +2 avvolgimenti secondari:

$$Ing_{Rtot} = \Sigma Ing_{Rx} \quad (mm^2)$$

$$Ing_{Rtot} = (13,02 \cdot 6) + (8,44 \cdot 2) + (16,89 \cdot 2) = 128,78 \text{ mm}^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Strati. Supponendo di interporre fra ogni strato di spire un cartoncino isolante di spessore $I_{st}=0,2mm$,

$$Ing_{IST} = I_{ST} \cdot H \cdot \text{int}(N_{Str}) \quad (mm^2)$$

$$Ing_{IST1} = 0,2 \cdot 16,75 \cdot (4) = 13,4 \text{ mm}^2$$

$$Ing_{IST2} = 0,2 \cdot 16,75 \cdot (0) = 0 \text{ mm}^2$$

$$Ing_{IST3} = 0,2 \cdot 16,75 \cdot (1) = 3,35 \text{ mm}^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Strati considerando che nella configurazione D sono presenti 6 avvolgimenti primari e 2 +2 avvolgimenti secondari:

$$Ing_{ISTtot} = \Sigma Ing_{ISTx} \quad (mm^2)$$

$$Ing_{ISTtot} = (13,4 \cdot 6) + (0 \cdot 2) + (3,35 \cdot 2) = 87,1 \text{ mm}^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti. Terminata la costruzione alla fine di tutti gli avvolgimenti e fra un avvolgimento e l'altro supponiamo di inserire un cartoncino isolante di spessore $I_{av}=0,5mm$.

$$Ing_{IAV} = I_{AV} \cdot H \quad (mm^2)$$

$$Ing_{IAV} = 0,5 \cdot 16,75 = 8,375 \text{ mm}^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti:

Essendo $n^\circ Avv$ il numero di avvolgimenti primari e secondari che compongono il trasformatore.

$$Ing_{IAVtot} = Ing_{IAV} \cdot n^\circ Avv \quad (mm^2)$$

$$Ing_{IAVtot} = 8,375 \cdot 10 = 83,75 \text{ mm}^2$$

Calcoliamo l'ingombro totale maggiorandolo di un coefficiente di ingombro percentuale $K_i=10\%$ che tiene conto delle imperfezioni nella realizzazione dell'avvolgimento e degli eventuali spazi d'aria.

$$Ing_{TOT} = Ing_{Rtot} + Ing_{ISTot} + Ing_{LAVtot} \cdot \left(1 + \frac{K_i\%}{100}\right) \quad (mm^2)$$

$$Ing_{TOT} = 128,78 + 87,1 + 83,75 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) = 329,5 \, mm^2$$

Essendo gli avvolgimenti suddivisi in parti uguali nelle due gole si ha:

$$Ing_{Gx} = \frac{Ing_{TOT}}{2} \quad (mm^2) \qquad Ing_{G1} = \frac{329,5}{2} = 165 \, mm^2 \qquad Ing_{G2} = \frac{329,5}{2} = 165 \, mm^2$$

Il valore dell'ingombro totale è minore dello spazio offerto dal rocchetto, quindi gli avvolgimenti saranno contenuti nel rocchetto comodamente.