

Material characteristics	alta perm.										basse perdite
	Cofelec T6		T4		3E5		3E3				B42
	Philips 3E1		3E2		3E5		3E3				3H2
	Siemens N30		T35		T38						T26
Material	TDK	H5A	H58	H5B2	H5C2	H5D	H5E	HP3000	HP4000	HP5000	H5A
Practical frequency range	MHz	< 0.2	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.05	< 0.01	< 0.2	< 0.2	< 0.1	0.2 to 2.0
Initial permeability	μ	3300 ± 2%	5000 ± 2%	7500 ± 25%	10000 ± 30%	15000 ± 30%	18000 ± 30%	3000 ± 20%	4000 ± 20%	5000 ± 20%	2000 ± 20%
Relative loss factor	$\tan \delta / \mu$	$\times 10^{-4}$	< 2.5 (10kHz) < 10 (100kHz)	< 6.5 (10kHz) < 40 (100kHz)	< 6.5 (10kHz)	< 7.0 (10kHz)	< 15 (10kHz)	< 3.5 (10kHz)	< 3.5 (10kHz)	< 3.5 (10kHz)	< 3.5 (10kHz)
Temperature factor of permeability	αF	$\times 10^{-4}$	-0.5 to 2.0	-0.5 to 2.0	0 to 1.8	-0.5 to 1.5	-1.5 to 1.5	0 to 2.0	± 7.5%	± 10%	± 12.5%
Curie point	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	> 130	> 130	> 130	> 120	> 120	> 115	> 140	> 140	> 130
* Saturation flux density H = 1194A/m (150e)	B_{sat}	mT	410	420	420	400	320	440	370	400	400
		(A/m)	4100	4200	4200	4000	3200	4400	3700	4000	4000
		gauss (oersted)	4100	4200	4200	4000	3200	4400	3700	4000	4000
* Remanence	B_r	mT	100	135	40	90	100	120	70	65	65
		gauss	1000	1350	400	900	1000	1200	700	650	650
* Coercivity	H_{CB}	A/m	8.0	8.0	5.5	7.2	2.7	2.8	12	7.2	7.2
		oersted	0.1	0.1	0.07	0.09	0.034	0.035	0.15	0.09	0.09
Hysteresis material constant	ηB	10^{-4} mT	< 0.8	< 0.8	< 0.3	< 0.6	< 0.52	< 1.0	< 0.4	< 0.4	< 0.4
			< 40 (50kHz)	< 40 (10kHz)	< 40 (10kHz)	< 30 (10kHz)	< 26 (10kHz)	< 30 (10kHz)	< 20 (10kHz)	< 20 (10kHz)	< 20 (10kHz)
Disaccommodation factor (1 to 10 minutes)	DF	$\times 10^{-4}$	< 3	< 3	< 3	< 2	< 1	< 1	< 3	< 3	< 3
* Resistivity	ρ	Ωm	1	1	0.1	0.15	0.02	0.05	0.2	0.2	0.15
* Specific gravity	δ	kg/m ³	4.8 x 10 ³	4.8 x 10 ³	4.9 x 10 ³	4.9 x 10 ³	4.9 x 10 ³	5.0 x 10 ³	4.8 x 10 ³	4.8 x 10 ³	4.5 x 10 ³
Color code			White & Red	White & Yellow	Yellow & Yellow	Orange & Orange					White & Orange
Remarks					Only Toroidal cores from T1, T7 to T7		Only Toroidal cores from T1, T7 to T5	New material	New material		

Material characteristics	basse perdite. basse perd. basse perd.										basse perd.				alta potenza		alta freq.		alta freq.		
	Cofelec T22		T14		T31				T10				H20		H32		H52		H80		
	Philips 3H1		303		3H3		3B7		3B8		3C8		4B1		4D2		4E1		4E1		
	Siemens N22		N28		N33		N58		N48		N29		N27		N41		M11		K1		K12
Material	TDK	H5A3	H58	H5F	H5H3	H5K	H5Z	H7A	H7B	H7C1	H7C2	K5	K5A	K7A	K8	H9					
Practical frequency range	MHz	0.01 to 0.3	0.01 to 0.3	0.2 to 2.0	0.01 to 0.8	0.01 to 0.3	0.01 to 0.3	< 0.1	< 0.2	< 0.3	< 0.2	< 8	< 20	1 to 50	< 200						
Initial permeability	μ	1500 ± 20%	2000 ± 20%	800 ± 20%	1300 ± 15%	2200 ± 20%	2200 ± 20%	4500 ± 2%	2700 ± 25%	2500 ± 25%	2600 ± 25%	2600 ± 2%	70 ± 2%	25 ± 20%	16	9000 ± 40%					
Relative loss factor	$\tan \delta / \mu$	$\times 10^{-4}$	< 9 (10kHz)	< 2.5 (10kHz)	< 13 (0.5MHz) < 17 (1MHz)	< 1.2 (10kHz)	< 3.5 (10kHz)	< 3.0 (10kHz)	< 4 (10kHz) < 20 (100kHz)	< 12 (10kHz)	< 4 (10kHz)	< 28 (1MHz) < 105 (5MHz)	< 40 (1MHz) < 80 (10MHz)	< 190 (100kHz) < 300 (30MHz)	< 190 (10kHz) < 250 (100kHz)	< 190 (10kHz)	10TYP (10kHz)				
Temperature factor of permeability	αF	$\times 10^{-4}$	0.8 to 2.0	0.5 to 2.0	0 to 2.5	0.3 to 2.0	0.4 to 1.2	0 to 2.5				-4.0 to 2.0	2.5 to 7.5	5 to 15	5 to 15					2TYP. + 20 to - 60°C	
Curie point	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	> 130	> 130	> 200	> 200	> 130	> 190	> 200	> 230	> 200	> 280	> 350	> 450	> 550	> 120					
* Saturation flux density H = 1194A/m (150e)	B_{sat}	mT	360	350	400	465	390	360	485	460	Note See Table 2 T10	330	300	260	270	400					
		(A/m)	3600	3500	4000	4650	3900	3600	4850	4600		3300	3000	2600	2700	4000					
		gauss (oersted)	3600	3500	4000	4650	3900	3600	4850	4600		3300	3000	2600	2700	4000					
* Remanence	B_r	mT	95	80	180	100	45	80	170	150		250	300	150	165						
		gauss	950	800	1800	1000	450	800	1700	1500		2500	3000	1500	1650						
* Coercivity	H_{CB}	A/m	32	30	90	36	13	24	15.9	15.9		80	477	1110	1190	0.1					
		oersted	0.4	0.25	1.0	0.45	0.15	0.3	0.2	0.2		1.0	6.0	14	15						
Hysteresis material constant	ηB	10^{-4} mT	< 0.8	< 0.3	< 1.0	< 0.12	< 0.5	< 0.4	< 0.6												
			< 40 (0.1MHz)	< 15 (0.1MHz)	< 30 (0.1MHz)	< 5 (0.1MHz)	< 25 (0.1MHz)	< 20 (0.1MHz)	< 30 (50kHz)												
Disaccommodation factor (1 to 10 minutes)	DF	$\times 10^{-4}$	< 3	< 3	< 12	< 5	< 2	< 3	< 3			< 30	< 15	< 20							
* Resistivity	ρ	Ωm	50	45	4	25	8	8	1	2	10	2	20 x 10 ³	2.5 x 10 ³	10 x 10 ³	1.0 x 10 ³	0.15				
* Specific gravity	δ	kg/m ³	4.8 x 10 ³	4.5 x 10 ³	4.6 x 10 ³	4.8 x 10 ³	4.5 x 10 ³	4.6 x 10 ³	4.8 x 10 ³	4.8 x 10 ³	4.8 x 10 ³	4.8 x 10 ³	4.8 x 10 ³	4.8 x 10 ³	4.1 x 10 ³	4.4 x 10 ³	4.8 x 10 ³				
Color code			Green & Green	White & Blue				White & Green				White & Light Brown	Azure & Azure	Azure & Azure							
Remarks					New material	New material			New material	New material	New material									New material	

Per questo progetto è opportuno scegliere la geometria RM core con materiale N30 della Siemens (detto anche T6, 3E1 o H5A), perché facilmente reperibile sul catalogo RS Components.

Secondo passo.

Dal foglio riassuntivo delle ferriti ricaviamo il valore dell'induzione massima consentita per il materiale scelto a 25°C, $B_{sat} = 4100$ G (410 mT, l'induzione si misura in Gauss o in Tesla 1mT

= 10G). Siccome il convertitore non deve raggiungere la saturazione mentre lavora, è opportuno avere un buon margine sull'induzione massima scelta, quindi adottiamo come induzione massima $B_{MAX} = B_{sat}/2 \cong 2000$ G (circa la metà di quella massima a 25°C).

Terzo passo.

Ora calcoliamo la corrente massima nell'avvolgimento primario (I_p), ipotizzando un rendimento del 50%. Per cui essendo la tensione DC dopo il rettificatore di circa:

$$V_{CCMAX} = \sqrt{2} \cdot V_{AC} - 2 \cdot V_d = (1,41 \cdot 12) - 3 = 13,9V$$

e tenendo conto dell'ondulazione del filtro (che volutamente è di pessima qualità) si ha $V_{CCmin} \cong 10$ V, per cui:

$$I_p = \frac{2 P_{OUT}}{V_{in}} = \frac{2 \cdot 8}{10} = 1,6 A$$

Quarto passo.

Per determinare la sezione del nucleo occorre scegliere una densità di corrente D. La densità di corrente si misura in circular mils/Ampere ed è tipicamente compresa tra i 200 e i 1000 c.m./A (più alto è il valore più grande è la ferrite e d il filo e minori sono le predite) noi, in prima battuta, scegliamo $D = 400$ c.m./A. La formula che ora useremo è molto significativa per il dimensionamento del trasformatore, infatti ne determina le dimensioni fisiche.

$$A_e A_c = \frac{(0,68 \cdot P_{OUT} \cdot D) \cdot 10^3}{f \cdot B_{MAX}} = \frac{0,68 \cdot 8 \cdot 400 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3 \cdot 2000} = 0,054 \text{ cm}^4$$

Dove:

A_e è l'area effettiva del nucleo ferromagnetico in mm^2

A_c è l'area della finestra utile per l'avvolgimento sul rocchetto in mm^2

P_{OUT} è la potenza resa al secondario in W

D è la densità di corrente in circular mils per Ampere

B_{MAX} è l'induzione magnetica massima in Gauss

Dato che il valore trovato di $A_e A_c$ è indicativo della potenza massima in gioco, bisogna cercare una ferrite con prodotto $A_e A_c$ superiore a quello calcolato. Dal catalogo delle ferriti [2] si trova:

	Area effettiva del nucleo con foro.	Area utile del rocchetto	Prodotto dei due precedenti
	A_e in cm^2	A_c in cm^2	$A_e A_c$ in cm^4
RM6	0,32	0,155	0,049
RM7	0,40	0,21	0,084
RM8	0,52	0,30	0,156
RM10	0,83	0,41	0,340

L'RM7 ha un valore sufficiente, ma non tiene conto degli spazi morti tra gli avvolgimenti, che sono avvolti a mano, che richiedono una maggiorazione di almeno il 50%. Quindi è opportuno scegliere l'RM8 o l'RM10. In prima approssimazione scegliamo l'RM8.

**Table 11
Copper-Wire Table**

Wire Size A. W. G. (B&S)	Diam. in Mils ¹	Circular Mil Area	Turns per Linear Inch (25.4 mm) ²			Cont.-duty current ³ single wire in open air	Cont.-duty current ³ wires or cables in conduits or bundles	Feet per Pound (0.45 kg) Bare	Ohms per 1000 ft. 25° C.	Current Carrying Capacity at 700 C.M. per Amp.	Diam. in mm.	Nearest British S.W.G. No.
			Enamel	S.C.E.	D.C.C.							
1	289.3	83690	—	—	—	—	3.947	.1264	119.6	7.348	1	
2	257.6	66370	—	—	—	—	4.977	.1593	94.8	6.544	3	
3	229.4	52640	—	—	—	—	6.276	.2009	75.2	5.827	4	
4	204.3	41740	—	—	—	—	7.914	.2533	59.6	5.189	5	
5	181.9	33100	—	—	—	—	9.980	.3195	47.3	4.621	7	
6	162.0	26250	—	—	—	—	12.58	.4028	37.5	4.115	8	
7	144.3	20820	—	—	—	—	15.67	.5080	29.7	3.665	9	
8	128.5	16510	7.6	—	7.1	73	20.01	.6405	23.6	3.264	10	
9	114.4	13090	8.6	—	7.8	—	25.23	.8077	18.7	2.906	11	
10	101.9	10380	9.6	9.1	8.9	55	31.82	1.018	14.8	2.588	12	
11	90.7	8234	10.7	—	9.8	—	40.12	1.284	11.8	2.305	13	
12	80.8	6530	12.0	11.3	10.9	41	50.59	1.619	9.33	2.053	14	
13	72.0	5178	13.5	—	12.8	—	63.80	2.042	7.40	1.828	15	
14	64.1	4107	15.0	14.0	13.8	32	80.44	2.575	5.87	1.628	16	
15	57.1	3257	16.8	—	14.7	—	101.4	3.247	4.65	1.450	17	
16	50.8	2583	18.9	17.3	16.4	22	127.9	4.094	3.69	1.291	18	
17	45.3	2048	21.2	—	18.1	—	161.3	5.163	2.93	1.150	18	
18	40.3	1624	23.6	21.2	19.8	16	203.4	6.510	2.32	1.024	19	
19	35.9	1288	26.4	—	21.8	—	256.5	8.210	1.84	.912	20	
20	32.0	1022	29.4	25.8	23.8	11	323.4	10.35	1.46	.812	21	
21	28.5	810	33.1	—	26.0	—	407.8	13.05	1.16	.723	22	
22	25.3	642	37.0	31.3	30.0	—	514.2	16.46	.918	.644	23	
23	22.6	510	41.3	—	37.8	—	648.4	20.76	.728	.573	24	
24	20.1	404	46.3	37.6	35.6	—	817.7	26.17	.577	.511	25	
25	17.9	320	51.7	—	38.6	—	1031	33.00	.458	.455	26	
26	15.9	254	58.0	46.1	41.8	—	1300	41.62	.363	.405	27	
27	14.2	202	64.9	—	45.0	—	1639	52.48	.288	.361	29	
28	12.6	160	72.7	54.6	48.5	—	2067	66.17	.228	.321	30	
29	11.3	127	81.6	—	51.8	—	2607	83.44	.181	.286	31	
30	10.0	101	90.5	64.1	55.5	—	3287	105.2	.144	.255	33	
31	8.9	80	101	—	59.2	—	4145	132.7	.114	.227	34	
32	8.0	63	113	74.1	61.6	—	5227	167.3	.090	.202	36	
33	7.1	50	127	—	66.3	—	6591	211.0	.072	.180	37	
34	6.3	40	143	86.2	70.0	—	8310	266.0	.057	.160	38	
35	5.6	32	158	—	73.5	—	10480	335	.045	.143	38-39	
36	5.0	25	175	103.1	77.0	—	13210	423	.036	.127	39-40	
37	4.5	20	198	—	80.3	—	16660	533	.028	.113	41	
38	4.0	16	224	116.3	83.6	—	21010	673	.022	.101	42	
39	3.5	12	248	—	86.6	—	26500	848	.018	.090	43	
40	3.1	10	282	131.6	89.7	—	33410	1070	.014	.080	44	

¹A mil is 0.001 inch. A circular mil is a square mil × π/4. The circular mil (c.m.) area of a wire is the square of the mil diameter.
²Figures given are approximate only; insulation thickness varies with manufacturer.
³Max. wire temp. of 212° F (100° C) and max. ambient temp. of 135° F (57° C).
⁴700 circular mils per ampere is a satisfactory design figure for small transformers, but values from 500 to 1000 c.m. are commonly used.

si trova il filo che più si avvicina ai c.m. richiesti. Nella fattispecie è l'AWG 22, con 642 c.m., e diametro pari a d = 0,64mm.

Per l'avvolgimento primario destiniamo il 30% dello spazio disponibile sul rocchetto e quindi calcoliamo il numero massimo di spire avvolgibili in tale spazio con la seguente formula:

$$S_{pMAX} = \frac{A_c \cdot 10^2 \cdot 30\%}{(d)^2} = \frac{0,30 \cdot 10^2 \cdot 0,3}{(0,64)^2} = 21$$

Calcoliamo ora con la legge di Faraday il numero effettivo delle spire primarie per ottenere la tensione minima $V_{CCmin}=10$ V, rammentando che tale numero non scenda mai sotto le tre spire.

$$N_p = \frac{V_{CCmin} \cdot 10^8}{K \cdot f \cdot B_{MAX} \cdot A_e} = \frac{10 \cdot 10^8}{4 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 2000 \cdot 0,52} = 12,01$$

Dove:

- V_{CCmin} è la tensione continua minima in Volt
- K è il fattore di forma (vale 4 per gli half-bridge, 2 per i forward e 4,44 per le sinusoidi)
- f è la frequenza di lavoro in Hz
- B_{MAX} è l'induzione magnetica massima scelta in Gauss
- A_e è l'area effettiva del nucleo ferromagnetico in cm^2

Dal valore ricavato si vede che siamo ampiamente sotto il numero massimo di spire avvolgibili, quindi la ferrite RM8 è stata una buona scelta.

Se così non fosse occorrerebbe riprendere i calcoli dal quarto passo, con una ferrite più grande.

Sesto passo.

Dal numero di spire primarie appena calcolate si può risalire all'induzione massima effettiva nel nucleo ferromagnetico alla tensione massima $V_{CCMAX} = 13,9$ V.

$$B_{MAX} = \frac{V_{CCMAX} \cdot 10^8}{K \cdot f \cdot N_p \cdot A_e} = \frac{13,9 \cdot 10^8}{4 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 11,5 \cdot 0,64} = 2361 \text{ G}$$

Il valore è inferiore a quello di saturazione del materiale N28 scelto in precedenza (4100G). Se fosse necessario un margine superiore occorrerebbe riprendere il calcolo dal quinto passo scegliendo un B_{MAX} inferiore.

Settimo passo.

Dato che l'avvolgimento secondario non ha la presa centrale, si ha che la tensione:

$$V_s = V_{OUT}$$

E quindi volendo mantenere la tensione secondaria $V_s=600$ V di picco, anche quando la tensione d'ingresso è a V_{CCmin} , per la regola del trasformatore si ha:

$$N_s = N_p \cdot \frac{V_s}{V_{CCmin}} = 12,0 \cdot \frac{600}{10} = 720 \text{ spire}$$

I valori di picco si rapportano con i valori di picco perché rapportare i valori efficaci risulta difficile visto che le forme d'onda non sono propriamente sinusoidali!

Ottavo passo.

In questo caso, le spire secondarie sono composte da un solo avvolgimento percorso dall'intera corrente efficace di carico I_s .

$$V_{seff} = \frac{V_s}{\sqrt{2}} = 424 \text{ V} \quad I_s = \frac{P_{OUT}}{V_{seff}} = \frac{8}{424} = 18,8 \text{ mA}$$

Con la stessa formula usata per il primario calcoliamo il diametro del filo secondario.

$$\Phi_s = I_s \cdot D = 18,8 \cdot 10^{-3} \cdot 400 = 7,52 \text{ c.m.}$$

Che corrisponde al valore minimo cioè all'AWG40 di soli 0,08 mm di diametro. Poiché il filo è molto piccolo se ne può scegliere uno più grande, come l'AWG38 di 0,1 mm di diametro (16 c.m.).

Anche per il secondario verifichiamo che il numero massimo di spire alloggiabili nel 30% dello spazio disponibile nella finestra del rocchetto sia superiore a quello richiesto (720 spire).

$$S_{SMAX} = \frac{A_c \cdot 10^2 \cdot 30\%}{(d)^2} = \frac{0,30 \cdot 10^2 \cdot 0,3}{(0,1)^2} = 900 \text{ spire}$$

Da cui deduciamo che lo spazio è sufficiente.

Nono passo.

A questo punto il trasformatore è dimensionato, anche se, per i più pignoli, potremmo calcolare il rendimento effettivo da mettere nel terzo passo al posto del 50% ipotizzato. Per chi volesse cimentarsi in tale impresa consiglio il testo [3], gli preannuncio però che i calcoli si basano su formule empiriche ed il risultato pratico non si discosta molto dal 50% se la temperatura della ferrite rimane nel limite dei 70°C.

La costruzione.

La costruzione del trasformatore richiede perizia e qualche accorgimento. Avvolgete per primo il filo più sottile e ricordate, nel caso di alte tensioni, di non far lavorare il secondario a vuoto. Pena la perforazione del dielettrico del filo ed il conseguente cortocircuito permanente. Se i fili risultano troppo grossi occorre fare un trefolo con due, tre o più conduttori appaiati. Per il dimensionamento si ricorre alla formula già vista in precedenza, usando una densità di corrente $D/2$, $D/3$, ecc..

Conclusioni.

Con queste mie righe spero di aver dato una traccia ed alcune formule per il dimensionamento dei trasformatori in ferrite. Le formule sono sostenute da una solida base teorica che potete trovare in [1], mentre i calcoli preliminari dell'ondulazione sono sensati ma squisitamente "spannometrici".

La costruzione pratica si è poi dimostrata abbastanza vicina alla teoria ed il tubo al neon si è acceso regolarmente.

In un prossimo futuro mi dedicherò al dimensionamento dei trasformatori per radiofrequenza.

IW2FND Attolini Lucio
attolucio@tin.it

Bibliografia.

- [1] G. C. Chrysis, High-Frequency Switching Power Supplies
McGraw-Hill 1989
- [2] Siemens, Ferrites Data Book 1982/83
- [3] Irving Gottlieb, Alimentatori Jackson
- [4] The ARRL Handbook for the Radio Amateur 1990
- [5] RS Components, Scheda K5796 May 1990