

Nomogrammi per il calcolo delle dimensioni di radiatori di calore piatti o estrusi

Un transistor funziona correttamente fintantochè la temperatura alla giunzione rimane al di sotto di quella massima fissata dal costruttore. Per ottenere questa condizione e sfruttare nello stesso tempo la massima potenza fornibile dal transistor occorre montare quest'ultimo su dissipatori di calore. Nota la resistenza termica radiatore/ambiente occorrente, i nomogrammi presentati in questo articolo servono a calcolare le dimensioni dei radiatori piatti o estrusi che devono essere impiegati.

1. - INTRODUZIONE

Il "nemico" principale di tutti i dispositivi a semiconduttore è *il calore*, per cui più si manterrà bassa la temperatura alla loro giunzione più saremo sicuri che essi funzioneranno correttamente nel tempo. E' per questo motivo che tutti i costruttori di dispositivi a semiconduttore fissano, per ciascun dispositivo, un valore massimo della temperatura alla giunzione (T_{jmax}) che non deve essere superato nelle peggiori condizioni in cui potrà trovarsi a lavorare il dispositivo.

La temperatura alla giunzione dipende, com'è noto, sia dalla potenza dissipata nel dispositivo, sia dalle resistenze termiche (o impedenze Z) associate al dispositivo stesso. Da ciò consegue che un'accurata considerazione della natura e del valore di queste resistenze permetterà di utilizzare quel *valore massimo di dissipazione di potenza* che nello stesso tempo non farà però superare alla giunzione *il massimo valore di temperatura consentito*.

Le formule e i diagrammi (o nomogrammi) riguar-

danti la scelta e il calcolo del dissipatore di calore che qui di seguito daremo, debbono essere considerati solo una *guida* dato che la resistenza termica di qualsiasi radiatore di calore dipende, di regola, da una serie di parametri che non è facile determinare con assoluta esattezza. Tra questi parametri citiamo per esempio:

- la posizione del dispositivo a semiconduttore montato nel radiatore;
- la facilità o meno con cui l'aria può circolare intorno al dispositivo stesso;
- il rapporto tra le dimensioni dei lati del radiatore;
- l'effetto schermante dei componenti vicini;
- il calore proveniente da questi componenti e così via.

Terminato un dato progetto, occorrerà controllare il valore particolare delle temperature più critiche, facendo funzionare l'apparecchiatura nelle peggiori condizioni di lavoro verificabili in pratica. Questo controllo è tanto più necessario quanto più complesso è il sistema di raffreddamento impiegato.

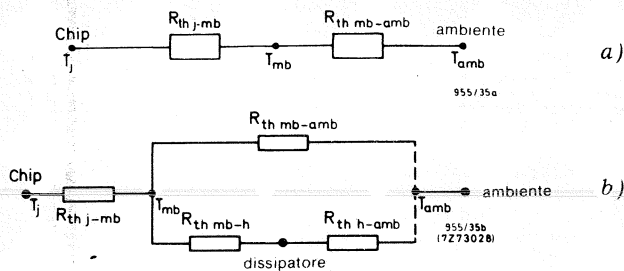


Fig. 1 - Resistenze termiche incontrate dal calore a partire dalla giunzione del dispositivo fino all'aria ambiente.

- a) dispositivo senza radiatore
b) dispositivo munito di radiatore

2. - La "STRADA" PERCORSA DAL CALORE

Il calore generato nel cristallo (chip) di un dispositivo a semiconduttore si disperde nell'ambiente esterno seguendo varie "strade". Un dispositivo di piccola potenza non richiede in genere alcun radiatore di calore: il calore, in questo caso, si trasferisce dal cristallo alla base di montaggio, e da questa al contenitore che si trova in stretto contatto con la base stessa. Il calore, raggiunto il contenitore, si disperde da questo nell'aria circostante per convezione e radiazione (figura 1a).

Un dispositivo di potenza deve invece essere montato su un radiatore di calore, in quanto il solo contenitore non sarebbe in grado in questo caso, di disperdere nell'ambiente circostante il calore prodotto dai valori elevati di dissipazione in gioco.

In questo caso, il calore "transita" dal contenitore al radiatore di calore fissato in stretto contatto con il contenitore; dal radiatore, il calore si disperde infine nell'aria circostante per convezione e radiazione oppure per conduzione se raffreddato ad acqua (figura 1b).

Nella maggior parte dei casi, il raffreddamento del radiatore è ad aria per cui il termine "ambiente" riferito in figura 1 sta ad indicare l'«aria circostante». Per inciso si fa presente che se l'aria circostante all'interno di una data apparecchiatura avesse una temperatura differente dall'aria dell'ambiente esterno, di ciò si dovrebbe tener conto nel progetto del radiatore di calore; in particolare, si dovrebbe calcolare la resistenza aggiuntiva che viene a crearsi tra interno ed esterno dell'apparecchiatura.

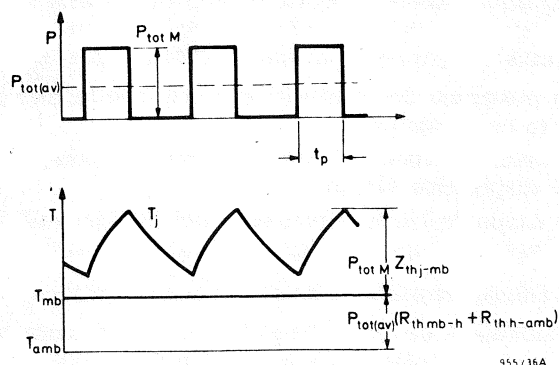


Fig. 2 - Variazione della temperatura alla giunzione e alla base di montaggio nel caso in cui la durata dell'impulso sia breve rispetto alla costante termica del radiatore.

3. - RESISTENZA TERMICA DI CONTATTO TRA BASE DI MONTAGGIO E DISSIPATORE ($R_{th\ mb-h}$)

La resistenza termica tra base di montaggio, supponiamo, di un transistor di potenza e il radiatore dipende essenzialmente:

- dalle dimensioni e dalla natura dell'area di contatto
- dal materiale (solitamente rondelle) interposto tra base di contatto e radiatore.
- dalla pressione con cui viene fissata la base di montaggio del transistor al radiatore di calore.

Tenendo presente quanto sopra occorrerà che in sede di realizzazione del radiatore non rimangano sbavature o (riccioli) e peggio ancora, ondulazioni dovute all'eccessiva pressione della punta del trapano: le due superfici che verranno a contatto dovranno essere pertanto piatte, lisce e ben pulite. L'anodizzazione a cui solitamente viene sottoposta la superficie del radiatore e che protegge la superficie da eventuali fenomeni corrosivi di natura elettrolitica, non supera in genere lo spessore di $50\mu\text{m}$, e pertanto non può influire minimamente sul valore della resistenza termica.

Nonostante le precauzioni suddette, in pratica, le superfici di contatto rispettivamente del transistor e del radiatore non sono mai completamente piatte, e pertanto anche dopo il fissaggio potranno sempre rimanere all'interno delle superfici a contatto delle "bolle d'aria". Per eliminare quest'ultime è prassi comune spalmare le superfici a contatto con paste o grassi al silicone che con la loro viscosità, "riempiono" le suddette bolle. Queste sostanze inoltre alla normale temperatura di funzionamento del transistor, posseggono un'elevata conduttività termica. Per migliorare ulteriormente quest'ultima proprietà, solitamente a queste paste viene aggiunta una polvere isolante, buona conduttrice di calore.

La resistenza termica tra base di montaggio del transistor e radiatore di calore (e cioè $R_{th\ mb-h}$) è in genere molto bassa rispetto a quelle esistenti tra giunzione e base di montaggio (e cioè $R_{th\ j-mb}$) e tra dissipatore e ambiente (e cioè $R_{th\ h-amb}$) solo nel caso in cui il raffreddamento del radiatore avvenga per *convezione naturale*. Se il raffreddamento avvenisse invece per aria forzata o ad acqua, allora sarebbe la resistenza termica radiatore/ambiente (e cioè $R_{th\ h-amb}$) ad assumere valori molto bassi, nel qual caso una perfetta aderenza tra base di montaggio del transistor e radiatore sarebbe assolutamente indispensabile.

4. - CALCOLO DELLA RESISTENZA TERMICA

Osservando la figura 1a si vede che quando non viene impiegato nessun radiatore di calore, la resistenza termica complessiva tra giunzione e ambiente è data da:

$$R_{th\ j-amb} = R_{th\ h-amb} + R_{th\ mb-amb} \quad (1)$$

I transistori di potenza vengono di regola montati su radiatore per il semplice fatto che la loro resistenza termica giunzione/ambiente (e cioè $R_{th\ j-amb}$) non è abbastanza bassa e tale quindi da "far uscire" dal cristallo tutto il calore in esso dissipato; la temperatura del cristallo assumerebbe in questo caso valori elevati tali da mettere fuori uso il dispositivo. Da qui la necessità

di montare il transistor su un opportuno radiatore di calore; nel qual caso la resistenza complessiva giunzione/ambiente diventa:

$$R_{th\ j-amb} = R_{th\ j-mb} + R_{th\ mb-h} + R_{th\ h-amb} \quad (2)$$

Per inciso è bene ricordare che, in questo caso, la "fuga diretta" di calore dal contenitore verso l'ambiente (e cioè $R_{th\ mb-amb}$) è di pochissima entità.

Il primo passo da fare per determinare le dimensioni e la natura del dissipatore da impiegare è quello di calcolare la massima resistenza termica radiatore/ambiente ($R_{th\ h-amb}$) capace di mantenere la temperatura alle giunzioni del dispositivo *al di sotto* del massimo valore ammissibile. Per questo calcolo occorrerà innanzitutto sapere se il dispositivo ha un funzionamento continuo (in c.c.) oppure intermittente (in c.a.).

a) Funzionamento continuo

Nel caso di funzionamento in corrente continua, la massima resistenza termica del dissipatore potrà essere calcolata direttamente partendo dalla massima temperatura della giunzione desiderata. Pertanto, tenendo presenti le equazioni:

$$R_{th\ j-amb} = \frac{T_j - T_{amb}}{P_{tot\ (media)}} \quad (3)$$

e

$$R_{th\ j-mb} = \frac{T_j - T_{mb}}{P_{tot\ (media)}} \quad (4)$$

combinando la (2) e la (3),

$$R_{th\ h-amb} = \frac{T_j - T_{amb}}{P_{tot\ (media)}} - R_{th\ j-mb} - R_{th\ mb-h} \quad (5)$$

e sostituendo la (4) nella (5) avremo:

$$R_{th\ h-amb} = \frac{T_{mb} - T_{amb}}{P_{tot\ (media)}} - R_{th\ mb-h} \quad (6)$$

I valori di $R_{th\ j-mb}$ e $R_{th\ mb-h}$ vengono pubblicati nei manuali dei dati tecnici dei transistori. Pertanto, per conoscere il massimo valore della resistenza termica che dovrà avere il radiatore si potrà ricorrere sia all'equazione (5) che alla (6).

b) Funzionamento intermittente

Nel caso di funzionamento ad impulsi, non possono essere usati i circuiti termici equivalenti riportati in fig. 1. In questo caso sarà più opportuno parlare di *impedenza termica* $Z_{th\ j-mb}$.

E' nota l'equazione:

$$P_{tot\ M} = \frac{T_j - T_{mb}}{Z_{th\ j-mb}} \quad (7)$$

per cui avremo:

$$T_{mb} = T_j - P_{tot\ M} \cdot Z_{th\ j-mb} \quad (8)$$

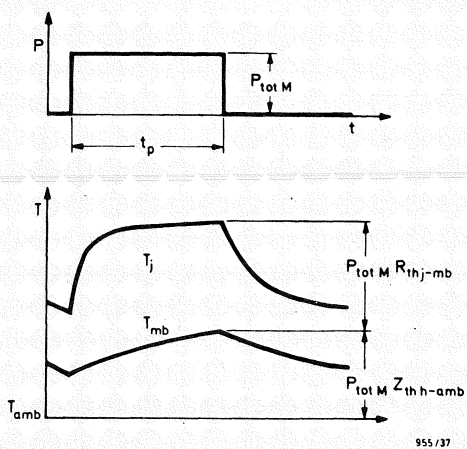


Fig. 3 - Variazione della temperatura alla giunzione e alla base di montaggio nel caso in cui la durata dell'impulso non sia piccola rispetto alla costante termica del radiatore.

Nelle condizioni di funzionamento intermittente si suppone sempre che la temperatura della base di montaggio del transistor rimanga costante. Questa supposizione in pratica è sempre valida purchè il tempo di durata dell'impulso risulti inferiore a circa un secondo.

In queste condizioni, come indicato in fig. 2, la temperatura della base di montaggio praticamente non cambia. Ciò è dovuto al fatto che i radiatori, di regola, posseggono un'elevata capacità termica, e di conseguenza, una *costante di tempo* termica molto elevata.

L'equazione (6) può quindi ritenersi valida anche in questo caso *solo però a condizione che la durata dell'impulso sia inferiore ad un secondo*. Il valore della temperatura della base di montaggio (T_{mb}) si può ricavare dalla (8) mentre la resistenza termica del radiatore ($R_{th\ h-amb}$) viene derivata dall'equazione (6).

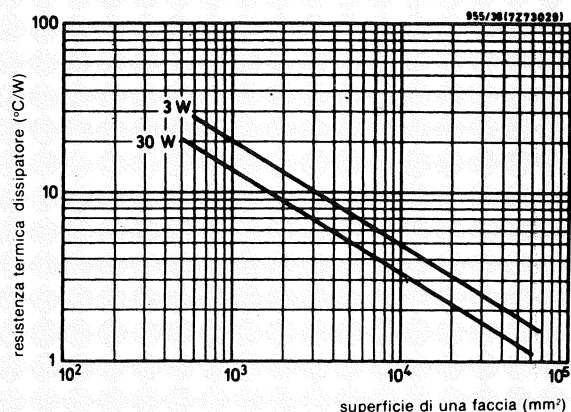


Fig. 4 - Andamento della resistenza termica in funzione dell'area (solo un lato) in un radiatore costituito da una piastra di alluminio liscia annerita con spessore di 3 mm e di forma pressochè quadrata.

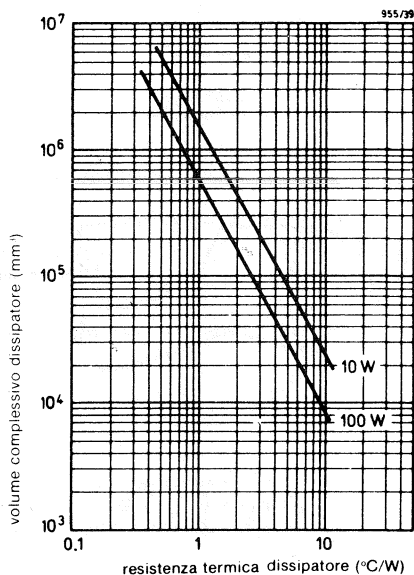


Fig. 5 - Volume in funzione della resistenza termica in un radiatore di alluminio annerito con alette.

5. - RADIATORI DI CALORE

Normalmente vengono usati tre tipi di radiatori:

- 1) radiatori piatti (compresi gli chassis delle apparecchiature)
- 2) radiatori presso-fusi con alette
- 3) radiatori estrusi con alette

Il materiale usato è generalmente *l'alluminio*; per i radiatori piatti in molti casi viene usato anche *il rame*. Nei transistori di piccola potenza vengono usate, per migliorare la dissipazione, piccole clips con alette.

1) Finitura della superficie del radiatore e suo potere irradiante

La resistenza termica di un dato radiatore dipende dalla finitura della sua superficie. Una superficie verniciata possiede di regola un grado di emissività (potere irradiante) superiore a quella di una superficie non verniciata (lucida). Questa proprietà è più marcata nei *radiatori piatti* nei quali un terzo del calore viene smaltito per irradiazione. Il colore della vernice non influisce sul grado di emissività; infatti, la resistenza termica di un radiatore piatto con superficie verniciata di bianco è appena superiore del 3% a quella di un uguale radiatore la cui superficie sia stata verniciata di nero.

Nei *radiatori con alette*, la verniciatura non ha grande efficacia agli effetti della diminuzione della resistenza termica, in quanto, in questo caso, il calore emesso da un'aletta può trasmettersi alle alette vicine; ciò nonostante, anche in questo caso, la verniciatura è sempre da preferire ad una superficie nuda. Anche *l'anodizzazione* e la *mordenzatura* delle superfici del radiatore tende a ridurre la resistenza termica.

Le *vernici metalliche* a base di alluminio hanno bassi valori di emissività; quest'ultima è però sempre dieci volte superiore a quella dei radiatori con superficie lucida e brillante.

2) Radiatori piatti

Sono i tipi di radiatori più semplici. Possono presentarsi come piastre metalliche separate oppure come parti o superfici dello chassis dell'apparecchiatura stessa. La resistenza termica di questi radiatori dipende dal loro spessore, dalla loro area, dal particolare orientamento, dalla natura della loro superficie, ed infine, dalla potenza dissipata dal transistore (o diodo) in essi montato. In particolare, riguardo all'orientamento, c'è da dire che se montato *orizzontalmente*, un radiatore piatto presenta una resistenza termica *due volte* più grande della resistenza termica dello stesso radiatore montato *verticalmente*. Questo comportamento sarà da tener presente quando per radiatore piatto si sfrutta lo chassis dell'apparecchiatura. In fig. 4 si può vedere l'andamento della resistenza termica di un radiatore piatto annerito in funzione della superficie (di un lato solo) con la dissipazione di potenza assunta come parametro. Il grafico ha una accuratezza compresa entro il 25% per radiatori piatti pressochè quadrati nei quali il rapporto lati, è inferiore a 1,25:1.

3) Radiatori con alette

In linea di principio questi tipi di radiatori potrebbero essere realizzati impiegando un certo numero di radiatori piatti. E' più semplice però acquistarli dato che in commercio esistono radiatori ad alette già fatti sia presso-fusi che estrusi. Questi radiatori ad alette esistenti in commercio hanno più o meno la stessa forma, e comunque tale da far avere al radiatore il minimo valore di resistenza termica. Il confronto quindi tra i vari tipi esistenti in commercio, più che sulla forma dovrà essere fatto sul volume da essi occupato. Un tale confronto è presentato graficamente in fig. 5 e vale per radiatori con alette disposte verticalmente. Anche in questo caso, il grafico è preciso entro il 25%.

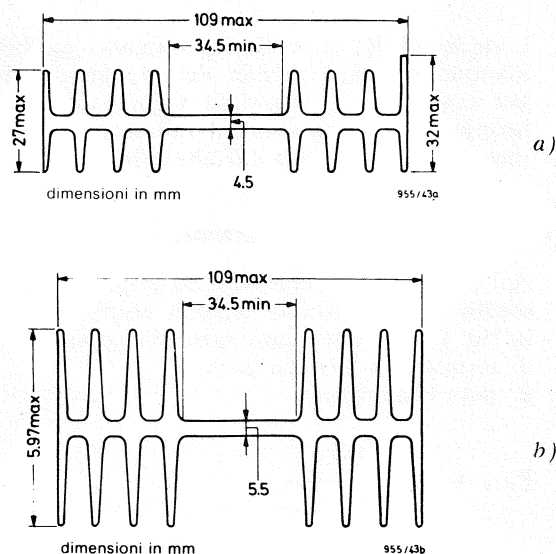


Fig. 6 - Sezioni dei tipi 30D e 40D di radiatori ad estrusione.

6. - CALCOLO DELLE DIMENSIONI DEL RADIATORE

Abbiamo visto come si calcola il *massimo* valore di resistenza termica ammissibile superato il quale il transistor può andare incontro alla sua distruzione. In questo capitolo vedremo invece il tipo e le dimensioni più adatte che deve avere un dato dissipatore di calore in modo da avere un valore di resistenza termica *più basso* possibile, e poter quindi dissipare la maggior quantità di calore possibile e mantenere quindi la temperatura delle giunzioni del dispositivo molto al di sotto della massima soglia ammissibile.

Innanzitutto occorrerà considerare le due condizioni classiche di raffreddamento possibili, e cioè; il raffreddamento ad aria naturale e quello ad aria forzata.

a) Raffreddamento ad aria naturale

Le dimensioni da assegnare al radiatore (piatto o estruso con alette non ha importanza) possono essere ricavate dai grafici riportati in fig. 10.

Premettiamo però che i valori di resistenza termica radiatore/ambiente (e cioè $R_{th\ h-amb}$) in funzione delle dimensioni del radiatore, forniti da questi grafici non sono *esatti* in modo assoluto (questa precisazione vale anche per gli analoghi grafici dati da altri costruttori di dispositivi a semiconduttori). Ciò per l'ovvio motivo che le condizioni reali in cui viene a lavorare il dispositivo, in genere, non sono l'esatta riproduzione di quelle che sono servite per tracciare i grafici in questione. E' per questo motivo che i valori *pratici* di resistenza termica possono differire da quelli dati dai grafici fino ad un massimo del 10%.

Da ciò consegue che la misura delle varie temperature dovrà essere effettuata ad apparecchiatura finita; e ciò vale in particolare per quei casi in cui le condizioni termiche reali sono particolarmente critiche.

Fatta questa premessa, elenchiamo qui di seguito le condizioni che bisogna realizzare per poter usare i grafici di fig. 10.

- 1) il raffreddamento deve avvenire a circolazione naturale dell'aria (e cioè a convezione naturale e assenza di "sacche" di aria calda)
- 2) la temperatura ambiente deve essere di circa 25°C, e dovrà essere misurata ad una distanza di 50 mm al di sotto del bordo del radiatore (vedi figura 7)
- 3) la pressione atmosferica dovrà essere di circa 10⁵N/m²
- 4) il radiatore non dovrà aver vicino altri radiatori
- 5) tra la faccia (o il bordo inferiore) del radiatore e la base dell'apparecchiatura dovrà esserci una distanza di circa 100 mm (vedi ancora fig. 7)
- 6) il transistor dovrà essere montato pressochè al centro del radiatore (ciò non vale per i radiatori ad alette a causa della loro ottima conducibilità di calore).

Realizzate queste condizioni, le dimensioni del dissipatore potranno essere calcolate nella seguente maniera (fig. 9), questa fig. schematica indica la maniera con cui si deve usare il grafico vero e proprio riportato in fig. 10.

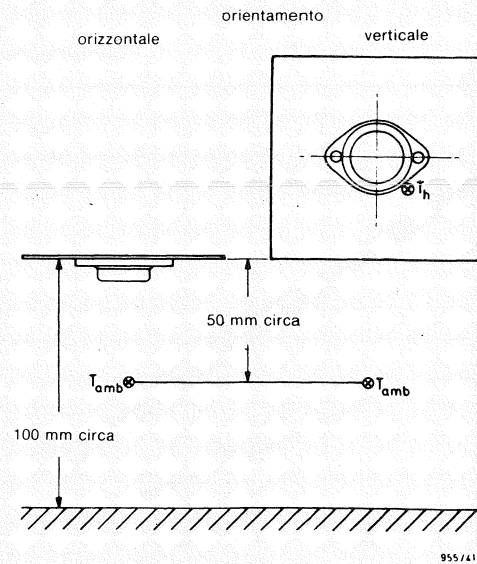


Fig. 7 - Condizioni da realizzare per poter servirsi del nomogramma di fig. 10.

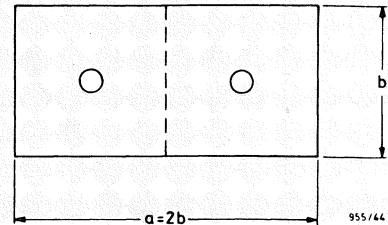


Fig. 8 - Ubicazione in un unico radiatore di due transistori che dissipano uguale potenza.

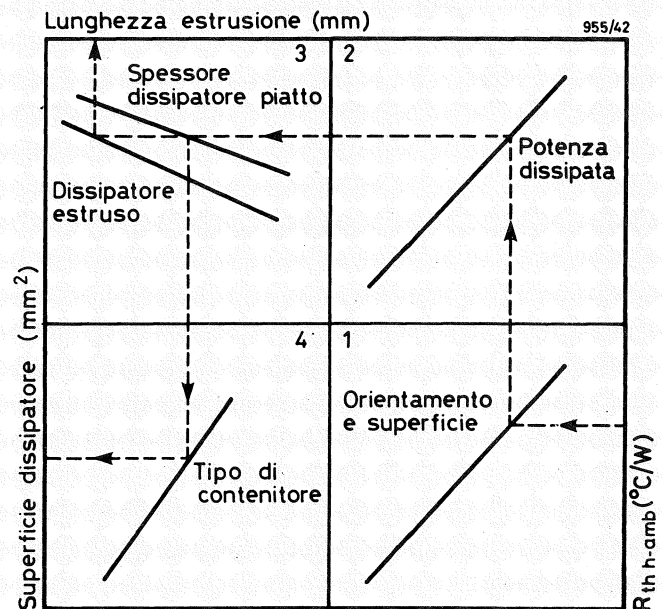


Fig. 9 - Guida per l'utilizzazione del nomogramma di fig. 10. Si parte dal valore di resistenza termica desiderato (quadrante 1) e seguendo le varie frecce si arriva a determinare l'area che dovrà avere il radiatore, nel caso questo sia piatto (quadrante 4), oppure la lunghezza del medesimo nel caso in cui questo sia ad estrusione (quadrante 3).

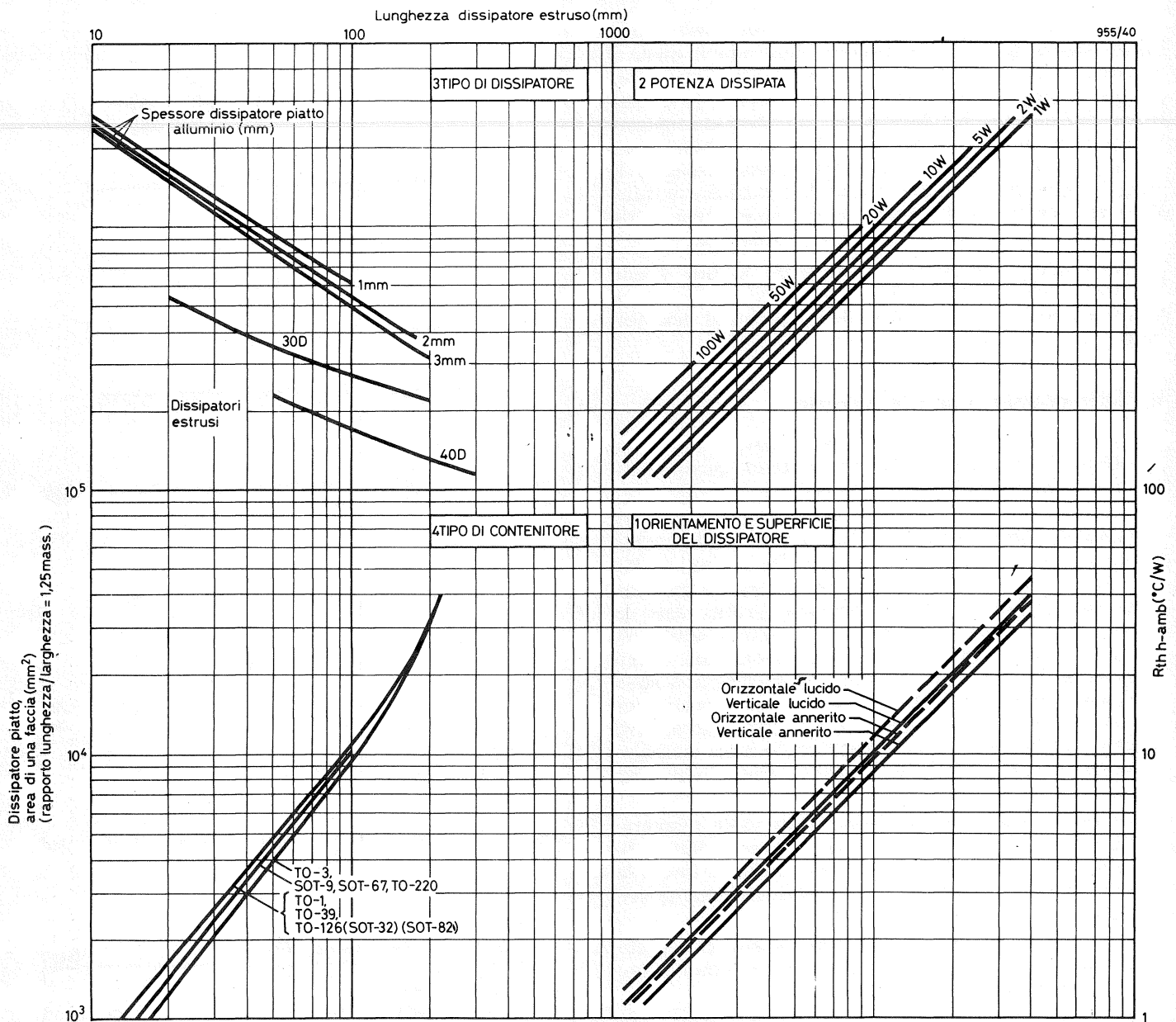


Fig. 10 - Nomogramma per il calcolo dell'area o della lunghezza di un radiatore rispettivamente piatto o estruso, quando si conosce il valore della resistenza termica desiderato.

- 1) Partire dal valore di resistenza termica radiatore/ambiente da ottenere ($R_{th\ h-amb}$) indicato a destra in basso nel quadrante 1. Dirigersi *orizzontalmente* fino ad incontrare il grafico riguardante l'orientamento e il tipo di superficie caratteristici del radiatore in questione.
- 2) Da questo punto di intersezione dirigersi *verticalmente* nel quadrante 2 fino ad intersecare il grafico che indica il valore di dissipazione che interessa.
- 3) Dal punto di intersezione con il grafico della dissipazione *dirigersi di nuovo orizzontalmente* verso il quadrante 3 fino ad incontrare il grafico che indica lo spessore desiderato (se il radiatore è piatto) oppure il tipo di estrusione usata.
- 4) Nel caso si sia scelto un radiatore estruso, rimanendo nel quadrante 3, si tracci una retta verso l'alto in modo da sapere la lunghezza del radiatore estruso scelto. (Le figure 6a e 6b riportano, in sezione, le dimensioni delle estrusioni 30D e 40D).
- 5) Nel caso invece sia stato scelto un radiatore piatto, (sempre partendo dal quadrante 3) si tracci una retta diretta verso il basso fino ad incontrare la curva relativa al tipo di contenitore del transistor (o diodo) impiegato.
- 6) Da questo punto di intersezione si tracci una retta orizzontale diretta verso sinistra così da poter leggere l'area che dovrà avere il radiatore piatto scelto.
- 7) Attenzione! Le dimensioni del radiatore piatto non dovranno superare il rapporto 1,25:1.

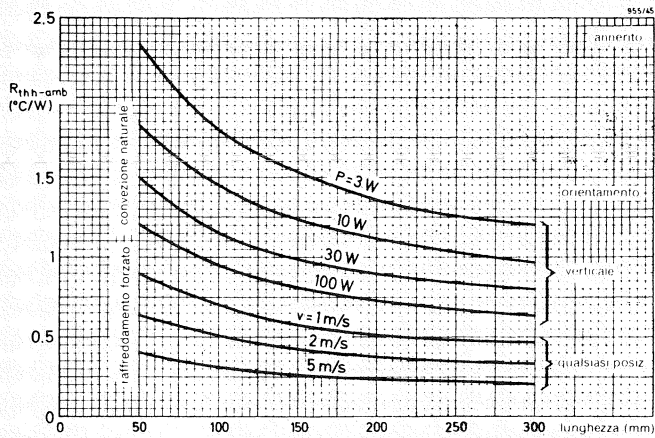


Fig. 11. - Resistenza termica in un radiatore estruso (40D) in funzione della lunghezza nel caso di raffreddamento naturale o ad aria forzata.

Le curve che nel grafico di fig. 10 si trovano nel quadrante 2 tengono conto della *non linearità* intercorrente tra la caduta di temperatura ai capi del radiatore e le perdite della potenza dissipata. Succede pertanto che rimanendo inalterato il valore della resistenza termica avremo che ad un aumento della potenza dissipata corrisponderà una diminuzione nelle dimensioni del radiatore.

Facciamo un esempio a dimostrazione di ciò. Un radiatore estruso verniciato, montato verticalmente deve avere una resistenza termica $R_{th\ h-amb}$ massima di $2,6\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ alle potenze rispettivamente di 5 W e 50 W.

Si parta da una $R_{th\ h-amb}$ di $2,6\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ riportata nel quadrante 1 del nomogramma e dopo aver intersecato prima la retta a 5 W e dopo quella a 50 W (quadrante 2), si vede che scegliendo un radiatore estruso tipo 30D, questi dovrà essere lungo 110 mm nel caso di una dissipazione di 5 W e 44 mm nel caso di dissipazione di 50 W.

Quest'ultimo caso (dissipazione 50 W) richiederà un dissipatore più corto in quanto la differenza di temperatura è 10 volte più grande del caso con dissipazione di 5 W.

b) Raffreddamento ad aria forzata

Nel caso in cui la resistenza termica dovesse essere inferiore ad $1\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ oppure se il radiatore non po-

tesse avere le dimensioni richieste, il raffreddamento del radiatore dovrebbe essere effettuato mediante aria forzata (ventilatore). In questo caso, a parte le dimensioni del radiatore, la resistenza termica verrebbe a dipendere *esclusivamente* dalla velocità del flusso d'aria. Se il getto d'aria è parallelo alle alette di raffreddamento ed ha una discreta velocità ($v > 0,5\text{ m/s}$), la resistenza termica non verrà più a dipendere dal valore di dissipazione e dall'orientamento del radiatore.

Fenomeni di turbolenza dell'aria potrebbero però influire sui valori di resistenza termica in precedenza calcolati.

La fig. 11 indica l'andamento della resistenza termica in funzione della lunghezza in un radiatore estruso ad alette; si noti la notevole riduzione di detta resistenza nel caso venisse impiegato un raffreddamento ad aria forzata; il grafico indica anche che in questo caso è possibile ridurre la lunghezza del radiatore medesimo.

In fig. 12 è dato l'andamento della resistenza termica in funzione dell'area di un radiatore piatto raffreddato con aria forzata. Anche in questo caso, l'orientamento e la potenza dissipata influiscono minimamente sul valore della resistenza termica. Si suppone, naturalmente, che il flusso d'aria sia abbastanza veloce.

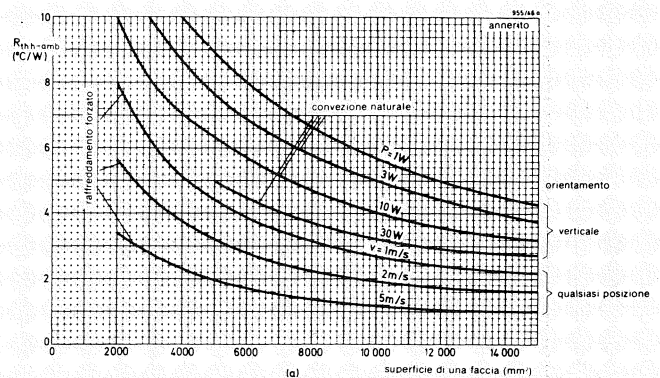
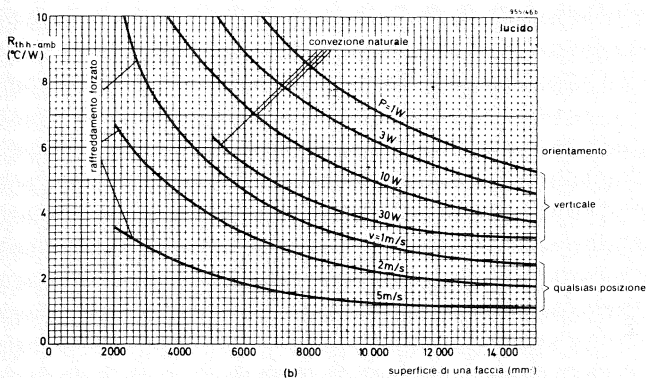


Fig. 12 - Resistenza termica di dissipatori di rame (spessore = 2 mm) oppure di alluminio (spessore = 3 mm) in condizioni di raffreddamento naturale (convezione) e di raffreddamento forzato. I grafici valgono per un contenitore TO-3. (a destra) radiatore con superficie annerita.

APPENDICE

A - Radiatori estrusi Philips in lega di alluminio maggiormente impiegati (dimens. in mm, forniti non verniciati).

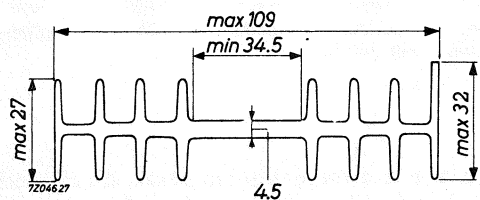


Fig. 1 - Estrusione 56290. Fornibile in lunghezze di 1,5 m. Peso 2,4 kg per 1,5 m.

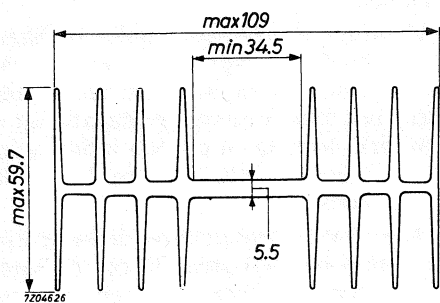


Fig. 2 - Estrusione 56230. Lunghezza 1,5 m. Peso 4 kg per 1,5 m.

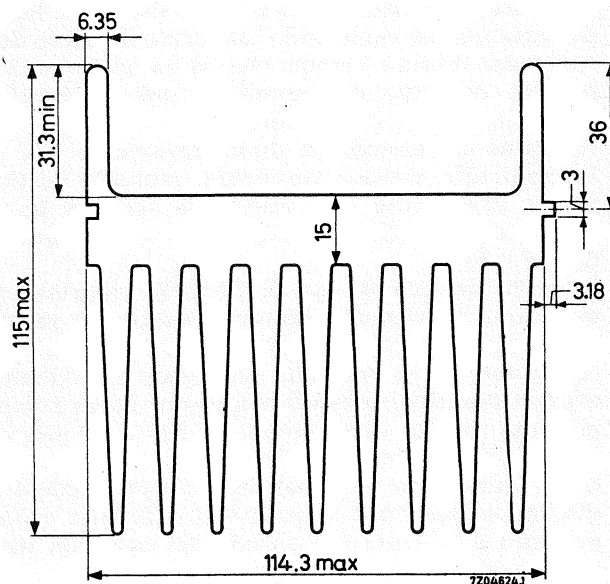


Fig. 4 - Estrusione 56293. Lunghezza 1,5 m. Peso 16,5 kg per 1,5 m.

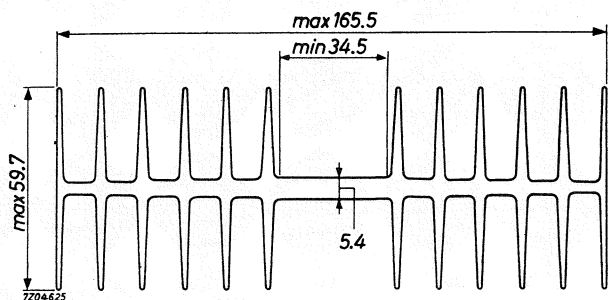


Fig. 3 - Estrusione 56231. Lunghezza 1,5 m. Peso 6 kg per 1,5 m.

B - Radiatori pressofusi Philips in lega di alluminio (dimensioni in mm, verniciati in nero, con foro M8 in testa).

Fig. 6 - Radiatore pressofuso 56280. Peso 690 gr. Foro in testa da M 12, per diodi raddrizzatori di potenza.

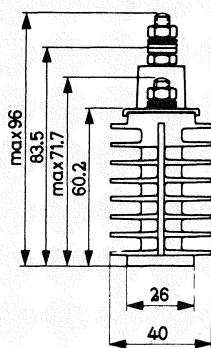
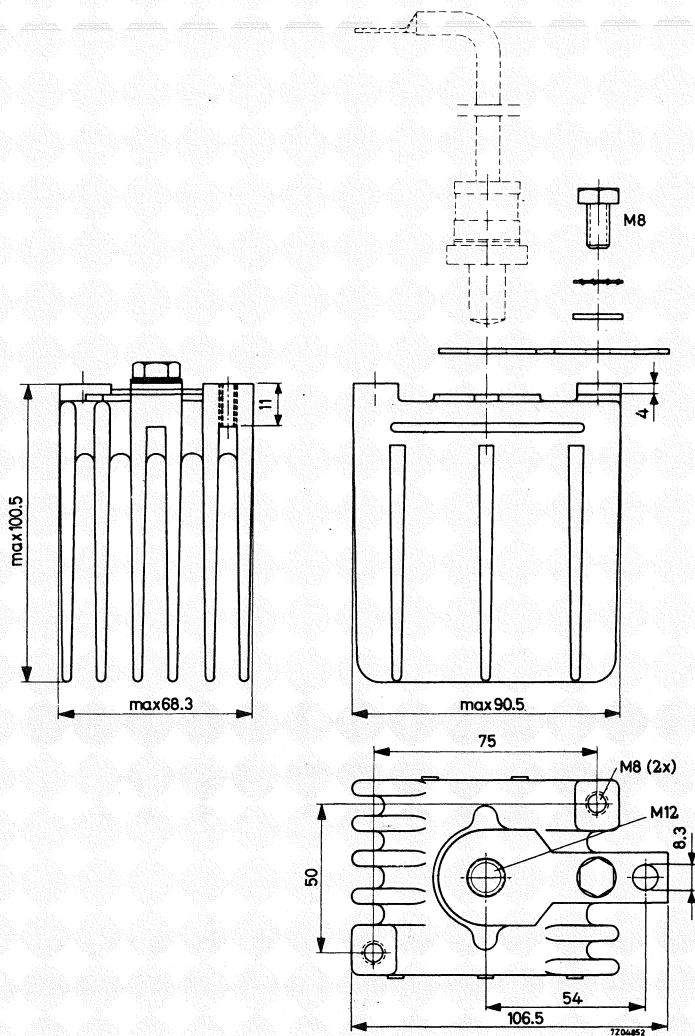


Fig. 5 - Radiatore pressofuso 56271. Peso 270 g. Per diodi di potenza.

