

Artykuł o radiatorach, zaplanowany pierwotnie w trzech odcinkach, rozrósł się do czterech części. W trzecim odcinku przedstawiamy sposoby chłodzenia elementów półprzewodnikowych przy niewielkich mocach. Zasady doboru radiatorów do rozpraszania dużej mocy będą omówione w części czwartej (EP 6/94).



# Radiatory część 3

Na początku przypomnijmy: dla elementów dużej mocy całkowita rezystancja termiczna między złączem a otoczeniem  $R_{thja}$  jest sumą trzech rezystancji składowych. Są to omówione w poprzednich dwóch odcinkach:

$R_{thjc}$  (złącze-obudowa) - wartość tej rezystancji jest dla danego elementu ustalona przez producenta i podawana w katalogach, użytkownik nie ma na nią żadnego wpływu.

$R_{thcr}$  (obudowa-radiator) - wartość tej rezystancji zależy od sposobu montażu, zastosowanego smaru i ewentualnych przekładek.

$R_{thra}$  (radiator-otoczenie) - omówimy za chwilę.

Ściśle rzecz ujmując, należałoby jeszcze uwzględnić rezystancję wprost między obudową a otoczeniem - przecież tylko jedna strona obudowy styka się z radiatorem, druga strona ma bezpośredni kontakt z powietrzem, czyli otoczeniem. Przepływ ciepła tą drogą jest jednak stosunkowo niewielki (rezystancja termiczna duża) i przy obliczeniach tę składową się pomija.

Powiedzmy też jasno, że mówimy o dwóch różnych rezystancjach  $R_{thja}$ : - podawana w katalogach  $R_{thja}$  dotyczy samej obudowy bez radiatora, - w sytuacji z radiatorem  $R_{thja}$  jest sumą wspomnianych wcześniej rezystancji składowych.

$R_{thra}$   
Obliczanie tej rezystancji jest sprawą złożoną. Przepływ ciepła następuje bowiem na trzy sposoby:

- przewodzenie
- konwekcja (unoszenie)
- promieniowanie.

**Przewodzenie**

Właśnie dzięki przewodzeniu ciepło musi być rozprawiane z niewielkiego obszaru styku z obudową elementu

półprzewodnikowego na powierzchnię całego radiatora. Przewodzenie ma więc dominujące znaczenie dla równomiernego rozprawiania ciepła, aby wszystkie punkty powierzchni radiatora miały jednakową temperaturę. Radiator powinien być wykonany z materiału o dobrym przewodnictwie cieplnym - stąd stosowanie aluminium (jeszcze lepiej miedzi), a nie np. stali, która ma dużo gorszą konduktywność cieplną. Różnicę parametrów termicznych w zależności od materiału wyraźnie widać na rysunkach 10...12 pozwalających obliczyć rezystancję termiczną płaskiego radiatora wykonanego z kawałka blachy. Z analizy tych rysunków wynika wniosek, że radiator o dużej powierzchni wykonany z bardzo cienkiej blachy będzie mieć gorsze parametry niż mniejszy radiator, za to z grubszej blachy. Zauważmy też, co widać na następnych rysunkach, że zwiększanie długości radiatora wykonanego z odcinka aluminiowego kształtownika (szyny) niewiele zmniejsza rezystancję termiczną - powodem jest właśnie ograniczona możliwość przenoszenia ciepła drogą przewodzenia w kierunku końców radiatora oddalonych od elementu półprzewodnikowego. Zauważmy tu, iż z tego właśnie powodu aluminiowe kształtowniki przewidziane do pracy przy wymuszonej wentylacji, czyli stosowaniu wentylatora mają grubsze przekroje, niż kształtowniki przeznaczone do pracy w warunkach chłodzenia naturalnego. Z powyższego wynika też wniosek, iż elementy czynne powinny być montowane na środku radiatora.

**Konwekcja, czyli unoszenie ciepła**  
Tu przenoszenie ciepła odbywa się wskutek ruchu cząsteczek powietrza, które przejmują ciepło od radiatora. Przy konwekcji swobodnej ruch powo-

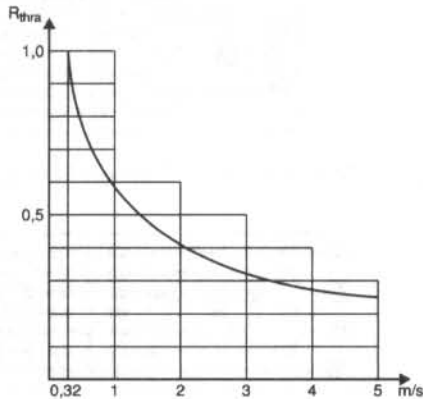
wietrza wywołany jest różnicą gęstości powietrza ciepłego i zimnego, prościej mówiąc lżejsze ciepłe powietrze unosi się do góry, a od dołu napływa chłodne. O konwekcji wymuszonej mówimy, gdy ruch powietrza (ogólnie czynnika chłodzącego) jest wymuszony za pomocą wentylatora (ew. pompy). Jasne jest, że szybszy przepływ powietrza to lepsze oddawanie ciepła. Szybszy przepływ powietrza możemy osiągnąć dwiema drogami:

- przez zastosowanie wentylatora
- przez podwyższenie temperatury radiatora.

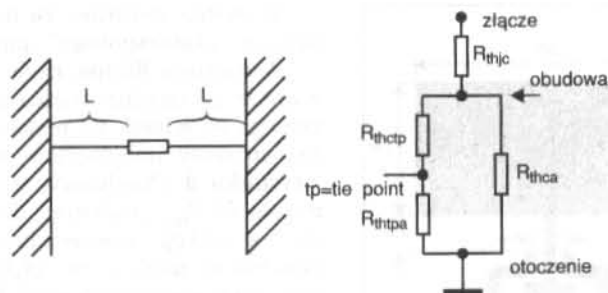
Podwyższenie temperatury radiatora spowoduje szybsze nagrzewanie się powietrza i jego szybszy naturalny obieg. Zapamiętajmy ważny wniosek: ponieważ unoszenie ciepła zależy od temperatury radiatora, zatem rezystancja termiczna radiatora nie jest wielkością stałą, zależy bowiem od jego temperatury.

W wielu katalogach (także na naszych rysunkach 10...12, 15) po prostu podaje się konkretną wartość rezystancji termicznej  $R_{thra}$ . Nie jest to do końca prawdą, i przy dokładniejszych opracowaniach należy uwzględnić wpływ temperatury - zajmujemy się tym w dalszej części artykułu.

**Rysunek 5** pokazuje przybliżoną zależność rezystancji radiatora w funkcji prędkości przepływu powietrza



Rys. 5.



Rys. 6.

chłodzącego. Przy zastosowaniu dobrego wentylatora rezystancja termiczna  $R_{thra}$  maleje kilkakrotnie! Wykres zaczyna się dla prędkości przepływu większej od zera - jest to oczywiste, bo gorący radiator sam spowoduje ruch powietrza. Tu notujemy kolejny prosty, a istotny wniosek: bardzo ważną sprawą jest wykonanie odpowiednich otworów wentylacyjnych w obudowie urządzenia, umożliwiających swobodny obieg powietrza.

Brak wentylacji radykalnie zwiększy rezystancję cieplną radiatora. Ważne jest też pionowe umieszczenie radiatora dla umożliwienia swobodnego przepływu powietrza między żebrowaniami. Wykresy i wzory do obliczeń dotyczą zwykle radiatora umieszczonego pionowo w wolnej przestrzeni. Radiator umieszczony poziomo będzie miał rezystancję o kilkadziesiąt procent większą. Gdy dana obudowa jest słabo wentylowana i wydziela się w niej znaczna ilość ciepła należy użyć radiatora o wielkości większej, niż wynika z obliczeń.

#### Promieniowanie

Każde ciało o temperaturze większej od zera bezwzględnej emituje energię promienistą. W niewielkim uproszczeniu możemy przyjąć, że ilość energii wypromieniowanej przez radiator zależy od jego temperatury oraz parametrów powierzchni zewnętrznej. Znowu potwierdza się zależność rezystancji  $R_{thra}$  od temperatury, a dodatkowo mamy tu zależność od parametrów powierzchni. Wiadomo, że największą emisję ma ciało doskonale czarne. W praktyce radiatory anodowane na czarno mają  $R_{thra}$  o 10...40% mniejszą od jasnych o tej samej wielkości. Według niektórych źródeł korzystne jest nawet pomalowanie radiatora czarną (najlepiej matową) farbą. Warstwa farby powinna być jak najcieńsza, bowiem gruba warstwa słabo przewodząca ciepło farby całkowicie zniwieczy ten pozytywny efekt.

**Bardzo ważną sprawą jest wykonanie odpowiednich otworów wentylacyjnych w obudowie urządzenia, umożliwiających swobodny obieg powietrza.**

Podsumujmy tę część rozważań. Ponieważ odprowadzanie ciepła jest zagadnieniem bardzo złożonym, w praktyce nigdy nie obliczymy idealnie rezystancji termicznej radiatora. Niestety, musimy mieć świadomość mniej lub bardziej przybliżonego charakteru wyniku. Bez krytyczne stosowanie wzorów i wykresów może wiązać się ze znacznymi błędami, gdy nie uwzględnimy wszystkich istotnych czynników. Najbezpieczniejszym rozwiązaniem jest użycie radiatora nieco większego niż to wynika z obliczeń. W innej sytuacji jest konstruktor-profesjonalista w fabryce sprzętu powszechnego użytku. Wtedy każdy centymetr kształtownika, pomnożony przez dziesiątki tysięcy egzemplarzy wiąże się z odczuwalnym zyskiem lub niepotrzebną stratą finansową.

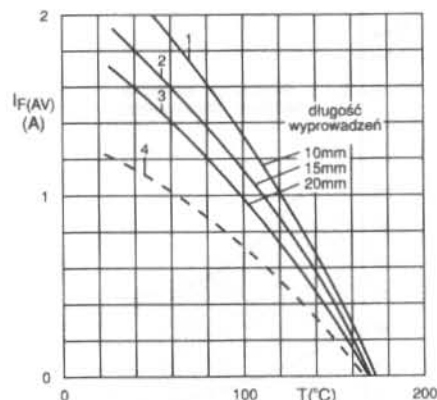
Podane w artykule dane oparte są na materiale ze źródeł krajowych i zagranicznych. Niestety, nie zawsze dane pochodzące z różnych (wszystkich bardzo solidnych i poważnych) źródeł są ze sobą dokładnie zgodne. W takich wypadkach podaliśmy występujące wartości skrajne, stąd niekiedy nieoczekiwane duży rozrzut niektórych parametrów. Niemniej jednak ogólna zgodność występuje i zamieszczone dane będą bardzo użyteczne.

Omówimy teraz praktyczne wskazówki dotyczące różnych radiatorów.

#### Płytki drukowane i ścieżki jako radiator

Ta część rozważań dotyczy szczególnie diod i elementów do montażu powierzchniowego (SMD). Straty mocy diod wynikają zarówno ze spadku napięcia w kierunku przewodzenia (w praktyce do 1V), jak też ze strat przełączania -

w pierwszym przybliżeniu można przyjąć, że na każdy 1 amper płynącego prądu przypada 1W mocy strat. Także dla miniatury elementów mocy SMD konieczne jest odpowiednie zaprojektowanie druku, aby skutecznie



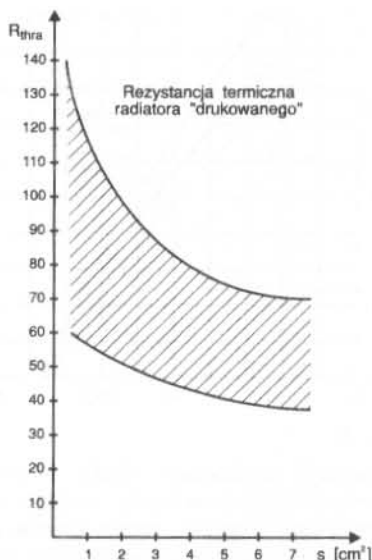
Rys. 7.

rozproszyć wydzielane ciepło. W urządzeniach profesjonalnych, między innymi z tego względu, często stosuje się montaż na podłożu ceramicznym, lub na płytkach z rdzeniem aluminiowym - odprowadzanie ciepła jest wtedy nawet kilkakrotnie lepsze. Amatorzy muszą się zadowolić typowymi płytkami z laminatu 1,5mm o grubości warstwy miedzi 35 $\mu$ m. Zamieszczone w artykule dane dotyczą właśnie takich płytek.

Dla diod o prądach powyżej 1A, przeznaczonych do wlotowania w płytkę, w katalogach podaje się często rezystancję termiczną od złącza do umownego punktu, a właściwie dwóch punktów równo oddalonych od korpusu diody. Jest to rezystancja termiczna  $R_{thjtp}$  (tp = tie point - umowny punkt na wyprowadzeniach diody) podobna nieco do omówionej wcześniej rezystancji  $R_{thjc}$  dla innych elementów mocy. Można sobie wyobrazić, że obie końcówki diody w odległości l od korpusu dołączono do radiatora o zerowej rezystancji. Pokazuje to rysunek 6.

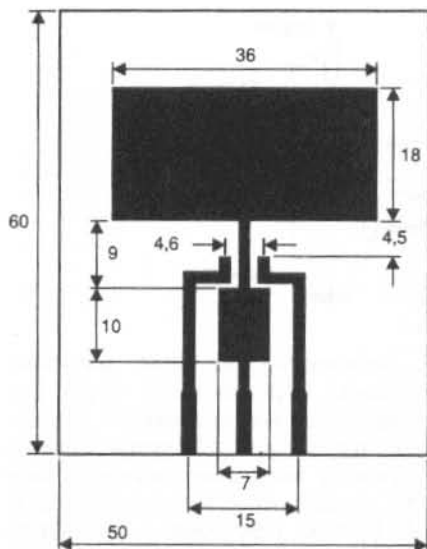
Popatrzmy na rysunek 7 przedstawiający zależność maksymalnego prądu wyprostowanego od temperatury dla przykładowej diody (BYD 14). Dioda ta ma według katalogu prąd przewodzenia równy 2A. Mijamy jednak świadomość, że trzy górne krzywe dotyczą sytuacji z rysunku 6 (dla trzech różnych długości l). Tylko dolna krzywa dotyczy realnej sytuacji diody wlotowanej w płytkę drukowaną przy długości wyprowadzeń 10mm. Z diody dwuamperowej w większości praktycznych zastosowań uzyskamy więc tylko nieco powyżej 1A prądu. Przy większym prądzie temperatura złącza przekroczy  $T_{jmax}$  i dioda szybko ulegnie uszkodzeniu. Na pocieszenie podajmy, iż wiele diod ma katalogową temperaturę  $T_{jmax} = 175^{\circ}\text{C}$ .

Przy obliczaniu warunków pracy diod trzeba uwzględnić kilka rezystancji składowych pokazanych na rysunku 6.



Rys. 8.

Tym razem rezystancję  $R_{thca}$  (przepływ ciepła wprost z obudowy i wyprowadzeń do powietrza) nie zawsze powinniśmy pomijać, bo może mieć ona wartość porównywalną z rezystancją drugiej gałęzi (przepływ ciepła przez wyprowadzenia i ścieżki). Dla obudowy SOD-81 (takiej jak popularna 1N4001)  $R_{thca}$  wynosi 400...600K/W w zależności od długości wyprowadzeń (dłuższe wyprowadzenia - mniejsza rezystancja). Dla większych 2...3 amperowych diod  $R_{thca}$  zawiera się w granicach 250...550K/W. Wartość rezystancji  $R_{thic}$  dla 1...1,5 amperowych diod w obudowie SOD-81 wynosi około 30...35K/W, dla 2...3 amperowych 10...20K/W. Dla diod wartość  $R_{thctp}$  nie jest stała i zmienia się wprost proporcjonalnie do długości wyprowadzeń  $l$ . Przy średnicy wyprowadzeń ok. 0,8mm można przyjąć 3K/



Rys. 9.

W na każdy milimetr długości  $l$  (tu oblicza się od razu  $R_{thctp}$  obu końcówek, choć  $l$  to długość jednej końcówki). Dla średnicy wyprowadzeń 1,3...1,4mm przyjmujemy 1,4K/W na każdy mm długości  $l$ .

Według katalogu rezystancja  $R_{thjtp}$  dla diod rodziny 1N4001 przy  $l = 10$ mm wynosi 60K/W, a całkowita  $R_{thja}$  diody wlutowanej w płytkę z oczkami lutowniczymi o średnicy 7mm oddalonymi od siebie o 25mm oraz ścieżkami o szerokości 2mm wynosi 120K/W. W takich warunkach w temperaturach pokojowych można dopuścić prąd 1A, bo  $T_{jmax} = 175^{\circ}C$ . Odpowiednie wartości dla dwaamperowej diody 1N5060 wynoszą  $R_{thjtp} = 46K/W$ ,  $R_{thja} = 100K/W$ . Zakładając maksymalną temperaturę otoczenia  $40^{\circ}C$  stracić możemy:

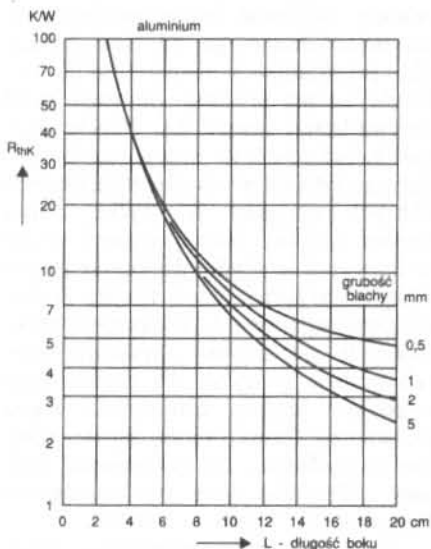
$$(175^{\circ}C - 40^{\circ}C) / 100K/W = 1,35W$$

Wszystko wskazuje, że nie uda się uzyskać „katalogowego” prądu 2A.

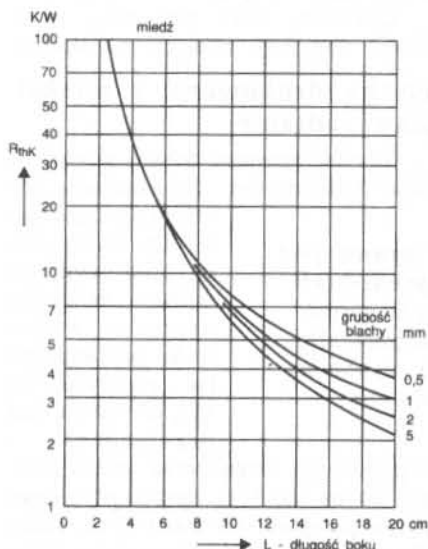
Rezystancję  $R_{thtpa}$ , czyli po prostu rezystancję cieplną „radiatora” utworzonego ze ścieżek na płytce drukowanej, możemy orientacyjnie wyznaczyć z rysunku 8. Przedstawia on zależność rezystancji  $R_{thra}$  „radiatora drukowanego” w funkcji powierzchni miedzi. Zasadniczo dotyczy on płytki z laminatu szklano-epoksydowego lub papierowo-fenolowego 1,5mm z warstwą miedzi 35 $\mu$ m, gdzie „radiator” to kwadratowy obszar miedzi z umieszczonym w centrum elementem. Przy grubości miedzi 70 $\mu$ m możemy odjąć 7...10K/W, przy ścieżkach cynowanych ok. 3K/W. Dla „radiatora drukowanego dwustronnego” wartość rezystancji jest mniejsza o ok. 15...20K/W.

Jak mówiliśmy wcześniej, rezystancja termiczna zależy od temperatury radiatora. Tak więc dla diod o  $T_{jmax} = 175^{\circ}C$  z krótkimi wyprowadzeniami można wartość  $R_{thtpa}$  znaleźć w pobliżu krzywej ograniczającej od dołu zakresowany obszar na rys. 8. Przy niższych temperaturach wartość  $R_{thra}$  będzie rosła.

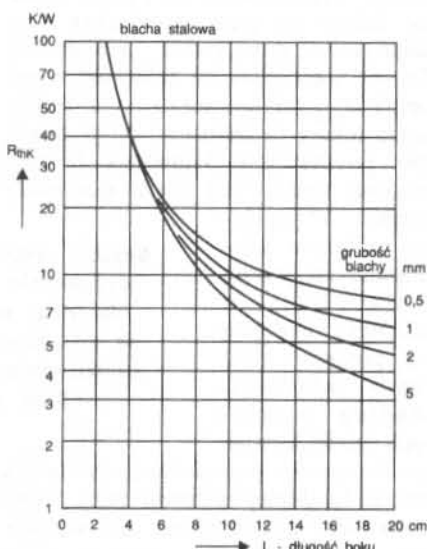
Wykres z rysunku 8 będzie też przydatny dla obliczania warunków pracy elementów SMD. Należy wtedy uwzględnić katalogową wartość rezystancji między złączem a płytką drukowaną (rezystancje termiczne elementów SMD są nieco inaczej określone i mają inne nazwy, co nie zmienia ogólnych podanych wcześniej zasad). Jako przykład na rysunku 9 znajdziemy zalecany „radiator drukowany” dla elementów SMD większej mocy w obudowie SOT-223. Całkowita rezystancja termiczna  $R_{thja}$  wynosi tu około 70K/W.



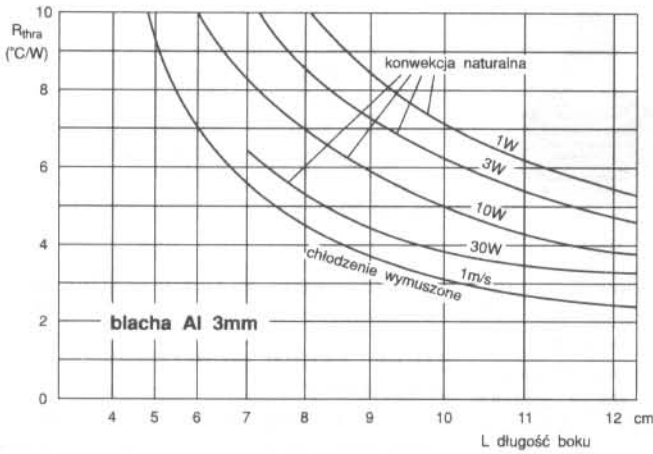
Rys. 10.



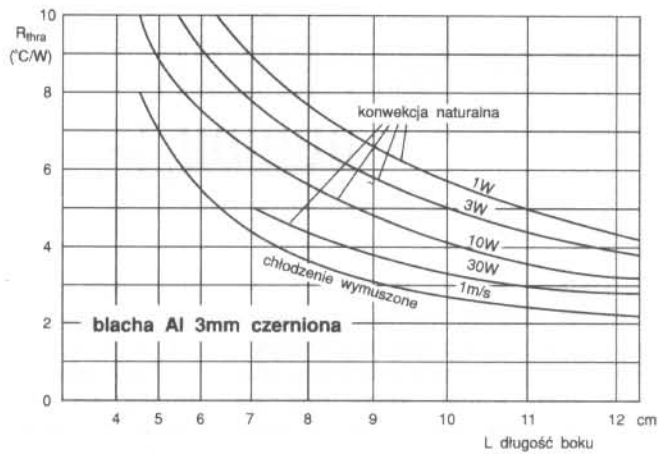
Rys. 11.



Rys. 12.



Rys. 13.



Rys. 14.

**Radiatory płaskie z blachy**

Bardzo często przy mniejszych mocach stosowane są płaskie radiatory wykonane z kawałka blachy. **Rysunki 10, 11 i 12** pozwalają w najprostszy sposób obliczyć przybliżoną rezystancję cieplną takich radiatorów w kształcie kwadratu, umieszczonych pionowo, z naturalną (nieczernioną) powierzchnią, gdy element mocowany jest na środku. Jest to wartość bezpieczna, z pewnym zapasem, osiągana przy niewielkiej różnicy temperatur radiatora i otoczenia. Gdy radiator miałby kształt prostokąta o stosunku długości boków 2:1 rezystancja będzie większa o ok. 10%. Gdyby powierzchnia radiatora miała być umieszczona poziomo wtedy rezystancja będzie większa o ok. 30%.

**Rysunki 13, 14** pozwalają nieco dokładniej obliczyć rezystancję cieplną takich płaskich radiatorów. Te krzywe dotyczą blachy aluminiowej o grubości 3mm, zwykłej białej (rys. 13) i anodowanej na czarno (rys. 14). Z porównania tych dwóch rysunków wynika, że czernienie radiatora zmniejsza rezystancję cieplną 20...30%.

Jak widać, rezystancja radiatora zależy od mocy rozpraszanej, czyli w sumie od temperatury. Rozwiążmy dwa przykładowe problemy.

**Przykład 5**

Mamy mostek z diod prostowniczych o prądzie  $I_{Fmax} = 10A$ . Obudowa metalowa ze śrubą M5. Każdą diodę umieścimy na oddzielnym płaskim radiatorze z blachy aluminiowej o grubości 2mm. Potrzebujemy z tego mostka uzyskać prąd powiedzmy 12A. Diody w mostku przewodzą parami, więc każda dioda przewodzić będzie prąd 6A. Przy prądzie 6A przyjmujemy moc strat 7W (spadek napięcia przewodzenia + straty przełączania). Przypuśćmy, że według katalogu  $R_{thjc}$  wynosi 2,5K/W, a  $T_{jmax} = 140°C$ . Przyjmu-

jemy  $R_{thcr}$  pesymistycznie 1K/W. Nasz mostek umieścimy w dobrze wentylowanej obudowie, przyjmujemy więc maksymalną temperaturę otoczenia 40°C.

Obliczamy dopuszczalną wartość całkowitej rezystancji cieplnej  $R_{thja}$ .  
 $R_{thja} = (140°C - 40°C) / 7W = 14,3K/W$   
 Obliczamy  $R_{thra} = R_{thja} - (R_{thjc} + R_{thcr})$ ;  
 $R_{thra} = 14,3K/W - (2,5K/W + 1K/W) = 10,8K/W$

Teraz mamy dwie możliwości. Najprościej skorzystać z rys. 10. Dla rezystancji 10,8K/W odczytujemy długość boku kwadratowego radiatora około 8,5cm. Jest to jak wspomnieliśmy wartość bezpieczna, z pewnym zapasem.

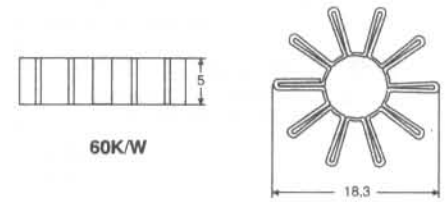
Można też obliczyć dokładniej według rysunku 13. Nie mamy krzywej dla mocy 7W, ale możemy ją wyznaczyć w przybliżeniu. Teraz dla rezystancji 10,8K/W i blachy o grubości 3mm znajdujemy długość boku ok. 6,5cm. Dla blachy o grubości 2mm dodajmy 0,5cm.

W naszej obudowie mamy dużo miejsca, ostatecznie decydujemy się więc na kwadraty o boku 8cm, które umieścimy możliwie daleko od siebie.

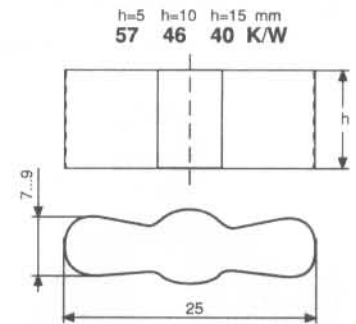
**Przykład 6**

W uniwersalnym zasilaczu z trzema stabilizatorami LM 317 zastosujemy dla każdego stabilizatora prostokątny radiator 5 x 10cm z blachy aluminiowej 1,5mm. Chcemy oszacować ile mocy możemy stracić na takim radiatorze. Umieszczamy trzy radiatory w niewielkiej przestrzeni uniwersalnej obudowy z tworzywa (z otworami wentylacyjnymi). Zakładamy „na wyczcicie” maksymalną temperaturę wewnątrz równą 60°C. Nasz radiator ma powierzchnię 50cm<sup>2</sup>, ale z uwagi na prostokątny kształt odejmujemy 10% - otrzymujemy 45cm<sup>2</sup>, co odpowiada kwadratowi o boku 6,7cm. I znów mamy dwie drogi.

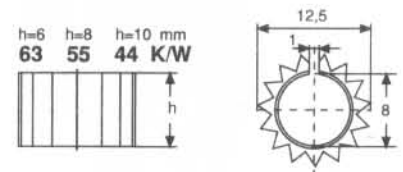
Z rysunku 10 odczytujemy rezystancję ok. 15K/W. Dodajmy  $R_{thja} + R_{thcr}$  około 2K/W.  $R_{thja}$  wyniesie ok. 17K/W. Obliczamy szacunkową moc strat:  $P = (T_j - T_a) / R_{thja}$ .



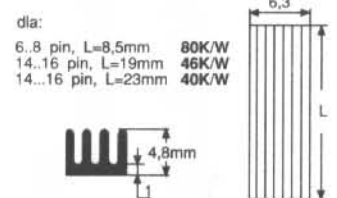
Rys. 15a.



Rys. 15b.

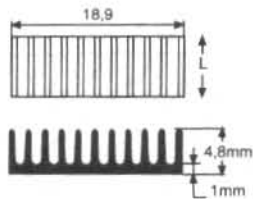


Rys. 15c.

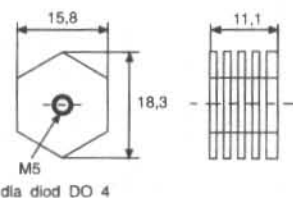


Rys. 15d.

dla:	
6..8 pin, L=6,3mm	50K/W
24 pin, L=33mm	13K/W
28 pin, L=37mm	11,5K/W
36 pin, L=47mm	9,5K/W
40 pin, L=51mm	8,5K/W



19K/W



dla diod DO 4

Rys. 15e.

$$P = (150^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}) / 17\text{K/W} = 5,3\text{W}.$$

Chcąc obliczyć moc nieco dokładniej, na rys. 13 prowadzimy pionową linię przez punkt odpowiadający długości boku 6,7cm. Może uda się stracić aż 10W mocy? Nasz radiator byłby wtedy gorący i miałby  $R_{\text{thra}}$  ok. 9K/W (my stosujemy cieńszą blachę - przyjmujemy więc  $R_{\text{thcr}} = 10\text{K/W}$ ). Całkowita  $R_{\text{thja}}$  wyniosłaby 12K/W, co

Rys. 15f.

przy takiej mocy spowodowałyby przyrost temperatury:

$$\Delta T = 10\text{W} \times 12\text{K/W} = 120\text{K}$$

Przy założonej maksymalnej temperaturze otoczenia 60°C, złącze miałoby wtedy temperaturę 180°C - delikatna struktura układu scalonego długo tego nie wytrzyma. Można na rysunku 13 nanieść aproksymowane krzywe dla innych mocy strat i kontynu-

ować obliczenia. W końcu wyjdzie nam maksymalna moc rozpraszana 6..7W.

### Inne często spotykane radiatory

Na rysunku 15 znajdziemy niektóre popularne fabrycznie czernione radiatorki i ich przybliżoną rezystancję cieplną.

**Piotr Górecki**