

Temat obliczania radiatorów i warunków chłodzenia elementów półprzewodnikowych dla wielu hobbistów nadal pozostaje „czarną magią”.

W popularnej literaturze technicznej temat jest przedstawiany zwykle w sposób częściowy - podaje się zależności i wzory teoretyczne dotyczące samych tylko elementów półprzewodnikowych, a przemilcza stronę praktyczną związaną z wyborem konkretnego radiatora.

Tymczasem najbardziej potrzebne są dane dotyczące aluminiowych kształtowników osiągalnych przez polskiego elektronika na naszym rynku. Ten trzyczęściowy artykuł nie wyczerpuje w pełni tak szerokiego tematu, staramy się jednak w jak najbardziej przystępny sposób przybliżyć od podstaw całość zagadnienia.

Praktycznym uzupełnieniem Notatnika będzie też artykuł, w którym zaproponujemy budowę układu do pomiaru kluczowego parametru - rzeczywistej temperatury złącza półprzewodnikowego w czasie pracy. Artykuł ten zostanie opublikowany w jednym z najbliższych numerów EP.



Radiatory część 1

Rozważmy oba warianty np. dla tranzystora BDV 64, dla którego katalog podaje moc maksymalną 125W i rezystancję $R_{thjc} = 1K/W$. Maksymalna dopuszczalna temperatura złącza wynosi $+150^{\circ}C$.

Na początek przedstawiamy przykłady obliczeń rachunkowych, a praktyczne wskazówki i dane dotyczące poszczególnych rezystancji składowych omówimy w dalszej części artykułu. Gdy w tym artykule napotykamy słowo rezystancja, to jeśli nie podano inaczej, odnosi się ono do rezystancji cieplnej, nie elektrycznej.

Przykład 1

Chcemy zastosować tranzystor w zasilaczu w układzie liniowego stabilizatora. Przewidujemy, że w skrajnych warunkach na tranzystorze wydzieli się 40W mocy strat. Musimy obliczyć parametry radiatora, zakładając, że będzie on umieszczony z tyłu, na zewnątrz obudowy.

Przyjmujemy wobec tego maksymalną temperaturę otoczenia równą $+30^{\circ}C$. Na radiatorze umieścimy tylko ten jeden tranzystor, nie ma więc potrzeby stosowania przekładki izolacyjnej.

Znając różnicę temperatur i moc obliczamy całkowitą rezystancję tranzystora z radiatorem:

$$R_{thja} = \Delta T : P$$

$$R_{thja} = (150^{\circ}C - 30^{\circ}C) : 40W = 3K/W.$$

Jak wiemy, rezystancja ta to suma trzech rezystancji składowych. W naszym przypadku $R_{thjc} = 1K/W$, a R_{thcr} przyjmujemy nie więcej niż $0,2K/W$ (zastosowanie smaru, duża obudowa SOT-93 podobna do TOP-3). Zastosowany radiator powinien mieć więc rezystancję:

$$R_{thra} = 3K/W - (1K/W + 0,2K/W) = 1,8K/W.$$

Obliczmy jeszcze spodziewane maksymalne temperatury:

złącze - oczywiście $+150^{\circ}C$, obudowa: $+150^{\circ}C - (40W \times 1K/W) = +110^{\circ}C$, radiator: $+102^{\circ}C$!

I tu spotkała nas niemiła niespodzianka - czy możemy wystawić tak gorący radiator na zewnątrz obudowy? Pytanie to powróci niedługo, gdy w jednym z kolejnych numerów EP zaproponujemy budowę solidnego zasilacza laboratoryjnego.

Sposób doboru konkretnego radiatora podamy w dalszej części artykułu.

Prąd płynący przez czynne elementy elektroniczne wywołuje na nich spadek napięcia. Wartość napięcia pomnożona przez wartość prądu daje moc strat, jaka wydziela się na danym elemencie. Następuje zamiana energii elektrycznej na ciepło. Całe ciepło wydziela się w strukturze półprzewodnika, czyli na płatku krzemu o powierzchni kilku milimetrów kwadratowych. Ciepło to trzeba skutecznie odprowadzić, aby przy wzroście temperatury nie nastąpiło uszkodzenie delikatnej struktury półprzewodnikowej. Odprowadzanie ciepła polepszy się przy zwiększeniu różnicy temperatur między złączem a otoczeniem, zależne będzie też od przeszkód na drodze przepływu, czyli od oporu cieplnego.

Zauważmy tu podobieństwo obrotu cieplnego i elektrycznego. Napięciu elektrycznemu odpowiada różnica temperatur (delta T), prądowi - przepływająca ilość ciepła (czyli praktycznie moc strat). Możemy więc podać Prawo Ohma dla obrotu cieplnego: $\Delta T = P \times R_{th}$, gdzie R_{th} oznacza rezystancję cieplną (termiczną). Całkowitą rezystancję termiczną od złącza do otoczenia oznaczaną R_{thja} możemy potraktować jako szeregowe połączenie rezystancji składowych (rysunek 1). Są to:

1 - rezystancja złącze - obudowa R_{thjc} (junction - case),

2 - rezystancja obudowa - radiator R_{thcr} (case - radiator),

3 - rezystancja radiator - otoczenie R_{thra} (radiator - ambient).

W niektórych źródłach radiator jest nazywany z ang. heatsink, lub po prostu sink.

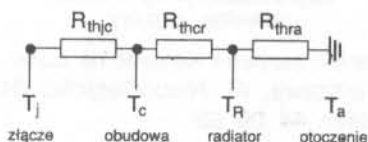
Dla półprzewodników podaje się w katalogach dopuszczalną maksymalną temperaturę złącza T_{jmax} , rezystancję R_{thja} dotyczącą sytuacji bez radiatora, a dla elementów większej mocy zawsze także R_{thjc} .

Zadaniem konstruktora jest takie dobranie radiatora, aby nie przekroczyć dopuszczalnej podanej przez producenta temperatury złącza - najczęściej jest to $+150^{\circ}C$.

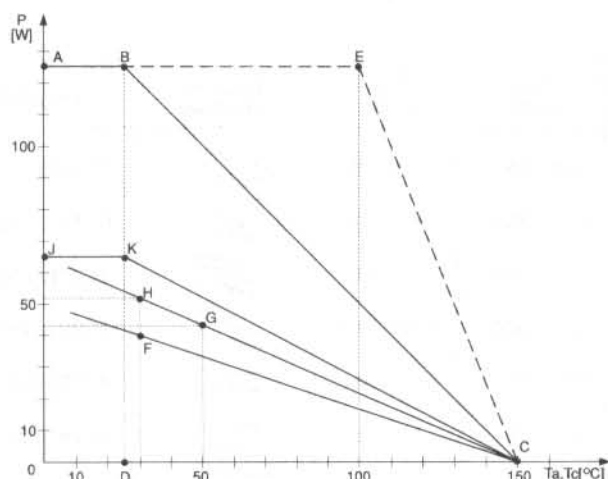
Korzystanie z danych katalogowych

Najczęściej zachodzi potrzeba:

- 1 - doboru radiatora przy znanej mocy strat lub
- 2 - określenia maksymalnej mocy strat dla danego radiatora.



Rys. 1.



Rys. 2.

Przykład 2

Załóżmy, że posiadamy fabryczny radiator o znanej rezystancji $R_{thra} = 2,2K/W$ (zakładamy w uproszczeniu, że R_{thra} jest dla danego radiatora wartością stałą). Rezystancja złącze - otoczenie wyniesie więc:

$$R_{thja} = 1K/W + 0,2K/W + 2,2K/W = 3,4K/W.$$

Tym razem planujemy umieścić radiator wewnątrz niezbyt dobrze wentylowanej obudowy i musimy przyjąć maksymalną temperaturę otoczenia (wewnątrz obudowy) równą $+50^{\circ}C$. Będziemy mogli rozproszyć tylko:

$$P = (150^{\circ}C - 50^{\circ}C) : 3,4K/W = 29,4W.$$

Spodziewane temperatury: obudowy ok. $+120^{\circ}C$, radiatora ok. $+115^{\circ}C$.

Wyniki wykonanych obliczeń można też przedstawić graficznie.

Popatrzmy na **rysunek 2**, na którym łamana ABC przedstawia zależność dopuszczalnej mocy strat od temperatury obudowy dla tranzystora mocy BDV 64.

Zanim przejdziemy do szczegółów podajmy trochę informacji ogólnych.

Z takiej katalogowej charakterystyki możemy odczytać moc maksymalną (odcinek AB), maksymalną temperaturę złącza (punkt C), oraz wartość rezystancji termicznej (nachylenie odcinka BC).

Niekiedy jednak powstają niejasności w rozumieniu sensu takiej charakterystyki. Powiedzmy jeszcze raz, że jest to wykres pokazujący ile mocy element może rozproszyć w zależności od temperatury obudowy. Z rysunku wynika wyraźnie, że ze wzrostem temperatury obudowy maleje dopuszczalna moc, jaką bez ryzyka uszkodzenia można wydzielić w strukturze (odcinek BC). Pełną katalogową moc 125W można wydzielić gdy temperatura obudowy nie przekracza $+25^{\circ}C$.

Oznacza to konieczność umieszczenia tranzystora z dobrym radiatorem w bieżącej lodowatej wodzie lub zastosowanie radiatora o bliskiej zeru rezystancji termicznej. Notujemy więc ważny wniosek: **w realnych warunkach nie uda się osiągnąć maksymalnej mocy strat podawanej w katalogach**. Charakterystyka ta na razie nie ma nic wspólnego z zastosowanym radiatorem i dotyczy samego elementu półprzewodnikowego. Wartość rezystancji R_{thjc} w razie potrzeby obliczamy z takiego rysunku prowadząc przez punkt B pionową linię - odnajdujemy punkt D określający maksymalną temperaturę obudowy, przy której można uzyskać pełną moc strat. Podzielenie wartości różnicy temperatur (TC - TD) przez moc maksymalną, daje R_{thjc} .

Gdyby na przykład charakterystyka wyglądała tak jak pokazuje linia przerywana (punkty A, E, C) oznaczałoby to tylko, że rezystancja termiczna R_{thjc} wynosi $(150^{\circ}C - 100^{\circ}C) : 125W = 0,4K/W$.

Czym mniejsza rezystancja R_{thjc} , tym opadająca część charakterystyki na rysunku jest bardziej stroma.

Tu nasuwa się rozsądne pytanie, czy na takim rysunku nie można zaznaczyć sumarycznej rezystancji termicznej R_{thja} ? Można, tylko należy jasno sobie uświadomić, że na osi poziomej będziemy mieć wtedy temperaturę otoczenia, a nie jak poprzednio temperaturę obudowy. Właśnie tu często popełniane są błędy, gdy nie czuje się sensu przedstawionej charakterystyki. Przy założeniu, że na osi poziomej mamy temperaturę otoczenia, łamana ABC pokazuje teoretyczną sytuację elementu z radiatorem o zerowej rezystancji cieplnej i doskonałym styku. Wykres sumarycznej rezystancji R_{thja} tranzystora z rzeczywistym radiatorem będzie na takim rysunku odcinkiem

mającym początek w punkcie C i łączącym poniżej odcinka BC. Charakterystyka ta nie ma tu nic wspólnego ze zmianami temperatury złącza; dla całego wykresu temperatura złącza jest stała i wynosi T_{jmax} , czyli w tym przypadku $+150^{\circ}C$.

Dla „Przykładu 1” zaznaczmy punkt F, odpowiadający założeniom maksymalnej temperatury otoczenia $+30^{\circ}C$ i wymaganej mocy strat 40W (pamiętamy, że na osi poziomej mamy teraz temperaturę otoczenia). Nachylenie odcinka FC jest miarą niezbędnej rezystancji termicznej R_{thja} - jak wcześniej obliczyliśmy jest to $3K/W$. Przyjmując rezystancję $R_{thcr} = 0,2K/W$ oraz $R_{thjc} = 1K/W$ (parametr katalogowy tranzystora BDV64) wiemy, że powinniśmy użyć radiatora o $R_{thra} = 1,8K/W$.

Załóżmy teraz, że posiadamy tranzystor mocy o rezystancji R_{thjc} równej $0,4K/W$ i charakterystyce ograniczonej na rysunku 2 punktami A, B, E, C. - są takie tranzystory, tylko w obudowie jeszcze większej niż popularne TO-3. Przypuścimy, że też stosujemy radiator o $R_{thra} = 1,8K/W$, a rezystancja R_{thcr} z uwagi na większą powierzchnię styku nie przekroczy $0,1K/W$. Po zsumowaniu otrzymamy $R_{thja} = 2,3K/W$. Wykreślmy teraz odpowiedni odcinek. Zaczyna się on w punkcie C. Znajdźmy jeszcze jeden dowolny punkt tego odcinka, na przykład dla różnicy temperatur $100^{\circ}C$: $P = 100^{\circ}C : 2,3K/W = 43,5W$. Na rysunku 2 jest to punkt G. Widzimy, iż teraz w temperaturze otoczenia $+30^{\circ}C$ możemy rozproszyć moc ponad 50W (punkt H)!

Rozważmy trzecią możliwość - spróbujemy w projektowanym zasilaczu zastosować „darlingtona” TIP 126 o mocy 65W, $R_{thjc} = 1,92K/W$ i $T_{jmax} = +150^{\circ}C$. Jego charakterystykę na rysunku 2 wyznaczają punkty J, K, C. Już „na oko” widać, że teraz trudno będzie przy temperaturze otoczenia $+30^{\circ}C$ stracić 40W mocy, czyli uzyskać $R_{thja} = 3K/W$ (nadal pokazuje to punkt F). Policzmy wymaganą rezystancję radiatora zakładając $R_{thcr} = 0,2K/W$:

$$R_{thra} = 3K/W - (0,2K/W + 1,92K/W) = 0,58K/W.$$

Radiator taki musi być dużo, dużo większy i znacznie droższy niż obliczony wcześniej z $R_{thra} = 1,8K/W$.

Z obliczeń tych płynie praktyczny wniosek, że przy obecnych relacjach cen **opłaca się kupić droższy i o lepszych parametrach przyrząd półprzewodnikowy, a zaoszczędzić na radiatorze**.

Przy dotychczasowych obliczeniach przyjmowaliśmy maksymalną temperaturę złącza $+150^{\circ}C$.

W praktyce półprzewodniki wytzymają często wyższe temperatury, spada natomiast radykalnie ich niezawodność. Autor zna osoby, które na pracujących tranzystorach 2N3055 topiły cynę i po takich eksperymentach tranzystory utrzymywały jeszcze podstawowe parametry. Niezawodność powinna być jednak najważniejszym celem we wszelkich konstrukcjach i nie ma żadnego powodu uzasadniającego przekraczanie T_{jmax} .

Przy wzroście temperatury pogarsza się jednak szereg parametrów i wykładniczo rośnie współczynnik uszkodzeń. Praca złącza w temperaturze $+150^{\circ}C$ i przy granicznych wartościach napięcia, prądu czy mocy wcale nie oznacza wiecznej trwałości, oznacza tylko określoną, przy obecnie stosowanych zaawansowanych technologiach stosunkowo niewielką wartość współczynnika uszkodzeń. W profesjonalnych laboratoriach kontroluje się rozkład temperatur wykonanego urządzenia za pomocą kamery termicznej (pracującej w zakresie promieniowania podczerwonego), aby w ten sposób ustalić potencjalne źródła uszkodzeń. Niektóre przodujące firmy szczytą się osiągnięta w ten sposób trwałością swoich wyrobów, bo zależy ona w dużym stopniu od termicznych warunków pracy elementów. Konstrukcje amatorskie wcale nie muszą być bardziej zawodne od profesjonalnych, a zależy to będzie w dużym stopniu od temperatury pracujących złącz.

Jeśli chcemy dobrać taki radiator, aby temperatura złącza była niższa niż T_{jmax} z podanych wzorów łatwo obliczyć niezbędne rezystancje. Rysunek 2 nie będzie już przydatny, bo dotyczy T_{jmax} . **Dobranie termicznych warunków pracy z zapasem jest więc ze wszech miar pożądane.**

Przejdźmy teraz do szczegółowego omówienia podanych rezystancji termicznych.

R_{thja}








Z wartości tej rezystancji odczytanej z katalogu obliczyć można maksymalną moc jaką można obciążyć dany element bez stosowania radiatora. Połączając elektronikom przypomnijmy, że obliczamy moc strat, czyli moc zamieniającą się na ciepło; nie jest to natomiast moc użyteczna, jaką można uzyskać w układzie (np. moc wyjściowa wzmacniacza). Moc użyteczna zależy od wielu różnych czynników i tego tematu teraz nie omawiamy.

Weźmy dwa praktyczne przykłady.

Przykład 3

Stabilizator 7805, obudowa TO-220. W tabeli 1 lub w katalogu

Tab. 1.

Obudowa	R_{thja} [K/W]	R_{thjc} [K/W]	Rysunek obudowy	Przykłady
TO-3	typ. 35	0.5 - 5		2N3055
TO-18	300 - 500	84 - 200		BC107, 2N2222
TO-39	150 - 200	15 - 60		BC211, 2N2219A
TO-92	200 - 500	150 - 200		BC237, BC557
TO-126	83 - 100	3 - 10		BD135-140
TO-220	62 - 75	1.3 - 5		BD281-286
TOP-3(SOT-93)	35 - 70	0.8 - 3		BDV64

firmowym znajdujemy wartość R_{thja} obudowy równą 70K/W. Przyjmujemy maksymalną temperaturę otoczenia we wnętrzu obudowy urządzenia $+40^{\circ}C$. Maksymalna temperatura pracy złącza wynosi tu podobnie jak dla większości krzemowych półprzewodników $+150^{\circ}C$. Różnica temperatur w tym najgorszym przypadku wynosi więc $110^{\circ}C$. Z ciepłego prawa Ohma obliczamy moc $P = 110^{\circ}C : 70K/W = 1,57W$. Nie ma więc szansy poprawnej pracy bez radiatora przy prądach powyżej 300...400mA.

Przykład 4

Tranzystor BD 135. Dla obudowy TO-126 R_{thja} wynosi 100K/W. W tych samych jak poprzednio warunkach możemy więc bez radiatora rozproszyć moc 1,1W.

Zwróćmy jeszcze uwagę na dane dotyczące popularnej „plastikowej“ obudowy TO92, w jaką obecnie „pakowana“ jest większość elementów małej mocy. Z wartości R_{thja} (200...500K/W) można obliczyć maksymalną moc rozpraszana w temperaturze pokojowej - daje to odpowiednio około 500..200mW - moc ta to oczywiście katalogowa maksymalna moc rozpraszana Ptot. Gdyby element miał pracować w wyższej temperaturze otoczenia, to trzeba go obciążać mocą odpowiednio mniejszą, albo zastosować radiator w postaci obejmmy z blazki. Ewentualne zastosowanie takiego radiatora może być sensowne, ponieważ np. dla jednych z lepszych tranzystorów w tej obudowie, mianowicie BC 546-548 i BC 556-558, $R_{thja} = 250K/W$, a $R_{thjc} = 150K/W$.

Przy takich małych obudowach istotny wpływ na odprowadzanie ciepła ma długość wyprowadzeń oraz powierzchnia oczek lutowniczych i ścieżek. Sprawa ta będzie omówiona w następnej części artykułu.

R_{thjc}

Wartości tej rezystancji należy szukać w katalogu i użytkownik nie ma na nią żadnego wpływu. O ile omówiona wcześniej wartość R_{thja} dla danej obudowy, zależnie od typu zamontowanej wewnątrz struktury (dioda, tranzystor, układ scalony), może różnić się dwukrotnie, o tyle wartości R_{thjc} dla elementów w takiej samej obudowie mogą różnić się nawet dziesięciokrotnie. Wynika to z różnych technologii i sposobów montażu struktur na wkładce radiatorowej obudowy. Dane z tabeli 1 pokazują tylko orientacyjnie zakres R_{thjc} dla różnych obudów i mogą być użyteczne przy uwzględnieniu pewnego marginesu bezpieczeństwa. Przy większych mocach traconych różnice te są istotne i do obliczeń należy koniecznie używać konkretnych danych z katalogu.

Po przeprowadzonych poprzednio wyliczeniach dla wszystkich jest jasne, że w zależności od R_{thjc} dla różnych np. tranzystorów w takiej samej obudowie i z tym samym radiatorem różna będzie maksymalna moc tracona. Warto więc poszukać w katalogu typów tranzystorów mających mniejszą R_{thjc} , bo przy tej samej mocy traconej można będzie zastosować mniejszy radiator.

Ciąg dalszy artykułu w następnym numerze Elektroniki Praktycznej.

Piotr Górecki, AVT