



# Tranzystory dla początkujących

## Parametry termiczne

część 7

W poprzednim odcinku dowiedziałeś się, że tranzystor zawsze musi pracować w bezpiecznym obszarze. Znakomicie poradziłeś sobie z ćwiczeniami i wydaje ci się, że już dokładnie poznałeś problem mocy strat. Teraz już wiesz, że warunki pracy tranzystora są ograniczone czterema czynnikami:

- dopuszczalnym napięciem kolektor-emiter
- dopuszczalnym prądem kolektora
- zjawiskiem drugiego przebiecia
- maksymalną mocą strat

Dwa pierwsze rozumiesz doskonale: zbyt wysokie napięcie po prostu doprowadzi do przebiecia i nieodwracalnego uszkodzenia złącza, a za duży prąd kolektora stopi cieniutkie doprowadzenia. Problemu drugiego przebiecia nie musisz zgłębiać – jest ono uwzględnione w katalogu na rysunku pokazującym bezpieczny obszar pracy. Wystarczy, by twój tranzystor nie pracował w obszarze drugiego przebiecia, czyli przy napięciach bliskich  $U_{CE0}$  i znacznych prądach.

Poznałeś też kolejny ważny parametr – moc strat. Umiesz obliczyć maksymalną moc strat tranzystora dla danego napięcia zasilającego i rezystancji obciążenia. Potrafisz dobrać obciążenie, by przy danym napięciu zasilającym nie przekroczyć dopuszczalnej mocy strat.

I tu muszę cię trochę rozczarować: dotychczasowa wiedza od biedy wystarczy

jedynie do zrozumienia i wykorzystania tranzystorów małej mocy. W przypadku tranzystorów większej mocy nie wystarczy przeprowadzić proste obliczenia, jak to robiliśmy w poprzednim odcinku, polegające na sprawdzeniu, czy moc strat w danym układzie nie przekroczy odczytanej z katalogu dopuszczalnej mocy strat  $P_{tot}$ ! Kluczowe znaczenie ma tu bowiem temperatura złącza, czyli krzemowej struktury tranzystora.

Dziś zajmiemy się tą sprawą bliżej.

Wydzielające się w tranzystorze ciepło trzeba odprowadzić i rozproszyć do otoczenia. Jak myślisz, od czego zależy szybkość przepływu ciepła między złączem tranzystora a otoczeniem?

To ważne pytanie!

...

Szybkość przepływu ciepła na pewno zależy od różnicy temperatur, ale też od izolacji cieplnej. Jeśli elektryczny piecyk starannie owinięsz materiałem termoizolacyjnym, na przykład kocem, ciepło będzie przepływać wolniej, natomiast temperatura piecyka będzie szybko rosła i koc po kilku minutach się zapali.

W elektronice jest podobnie. Gdy w złączu tranzystora zaczyna się wydzieląć moc cieplna równa  $P=U_{CE} \times I_C$ , to temperatura tego złącza rośnie. Ze wzrostem różnicy temperatur złącze-otoczenie wzrasta też ilość ciepła przepływająca do

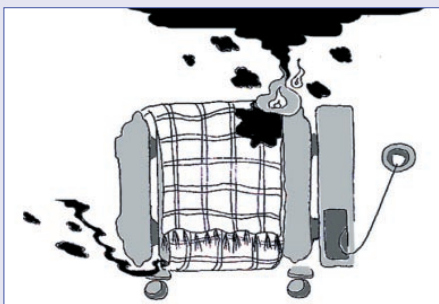
otoczenia. Czy temperatura złącza będzie rosła w nieskończoność? Ależ skąd! W pewnym momencie wytwarza się równowaga: różnica temperatur wzrosła na tyle, że cała ilość wytwarzanego ciepła przepływa do otoczenia. Dzięki temu temperatura już nie wzrasta. Zapamiętaj to – w normalnych warunkach pracy w tranzystorze wytwarza się stan równowagi cieplnej – temperatura wzrasta na tyle, by całe ciepło wydzielane w złączu było na bieżąco odprowadzane do otoczenia. **Jeśli nie zadbasz, by to ciepło skutecznie odprowadzić do otoczenia, doprowadzisz do nadmiernego wzrostu temperatury złącza i nieodwracalnie zniszczysz tranzystor.**

Niestety, muszę ci to szczegółowo wyjaśnić, ponieważ i tu funkcjonują błędne wyobrażenia. Okazuje się, że w ogromnej większości przypadków tranzystor mocy nie może pracować z katalogową mocą strat  $P_{tot}$ ! Trzeba bowiem uwzględnić dodatkowe czynniki.

### Maksymalna temperatura złącza

Zapamiętaj raz na zawsze: **wysoka temperatura jest śmiertelnym wrogiem półprzewodników.**

Początkujący wyobrażają sobie, że istnieje jakaś ściśle określona granica, po przekroczeniu której element półprze-



wodnikowy ulega uszkodzeniu, na podobieństwo cyny, która topi się w pewnej, dokładnie określonej temperaturze. Jest to wyobrażenie całkowicie błędne. Co prawda w katalogach półprzewodników podawana jest **maksymalna temperatura złącza**, oznaczana  $T_{jmax}$  ( $T_{jmax}$ ), zwykle  $+150^{\circ}\text{C}$ , ale wcale to nie znaczy, że na przykład w temperaturze  $+200^{\circ}\text{C}$  element stopi się, lub natychmiast ulegnie uszkodzeniu. Temperatura topnienia krzemu jest znacznie wyższa. Znam „eksperymentatorów”, którzy na pracujących tranzystorach mocy (typu 2N3055) topili cynę – temperatura obudowy przekraczała więc  $+200^{\circ}\text{C}$ , temperatura złącza była na pewno znacznie wyższa, i... tranzystory nie uległy uszkodzeniu.

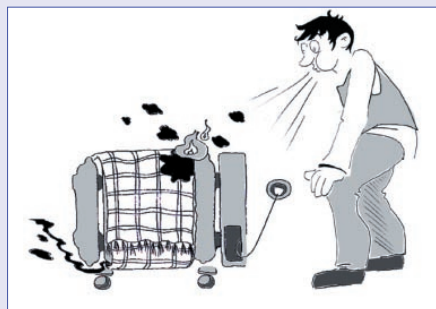
To skąd te katalogowe  $+150^{\circ}\text{C}$ ?

To proste. W tej temperaturze **ryzyko uszkodzenia** jest jeszcze stosunkowo małe. Element pracujący w tej temperaturze powinien (biorąc statystycznie) powinien bezawaryjnie pracować, powiedzmy przez 10000 godzin (to jest ponad rok ciągłej pracy). W grę wchodzi tu statystyka i rachunek prawdopodobieństwa, więc nie będę ci tłumaczył szczegółowo kwestii awaryjności i przewidywanych okresów pracy bezawaryjnej. Na pewno kiedyś spotkasz się ze skrótami MTTF, MTBF – właśnie one dotyczą kwestii i pracy bezawaryjnej i ryzyka uszkodzeń urządzeń i podzespołów.

A więc te  $+150^{\circ}\text{C}$  to nie jakaś ściśle określona nieprzekraczalna granica. Po podgrzaniu złącza do  $+200^{\circ}\text{C}$  tranzystor nadal będzie pracował. Zresztą w katalogach spotkasz elementy (diody i niektóre tranzystory), dla których określono dopuszczalną temperaturę złącza równą  $+175^{\circ}\text{C}$  lub nawet  $+200^{\circ}\text{C}$ .

Zapamiętaj podstawową zależność – ze wzrostem temperatury szybko rośnie **ryzyko** czyli **prawdopodobieństwo** uszkodzenia. W podawanej w katalogu maksymalnej temperaturze złącza  $T_{jmax}$  ryzyko uszkodzenia jest jeszcze stosunkowo małe. Ale ze wzrostem temperatury prawdopodobieństwo uszkodzenia rośnie wykładniczo, czyli bardzo gwałtownie. To oznacza, że powinieneś dołożyć wszelkich starań, by nie przekroczyć katalogowej maksymalnej temperatury złącza.

Patrząc na to z drugiej strony, masz następną ważny wniosek praktyczny – jeśli temperatura złącza pracującego tranzystora będzie znacznie niższa, niż te umowne  $+150^{\circ}\text{C}$ , na przykład będzie wynosić  $+30^{\circ}\text{C}$  czy  $+50^{\circ}\text{C}$ , prawdopodobieństwo uszkodzenia będzie bardzo, bardzo małe – śmiało można uważać, że w takich warunkach pracy **tranzystor będzie wieczny**. Tym zdaniem chciałbym rozproszyć



niepotrzebne obawy. Najprościej mówiąc, jeśli nie zostaną przekroczone: maksymalne napięcie kolektora, maksymalne prądy bazy i kolektora, oraz jeśli temperatura złącza będzie niższa od  $+150^{\circ}\text{C}$ , nie trzeba się martwić o trwałość tranzystora. A jeśli temperatura jest zbliżona do temperatury pokojowej, można śmiało uważać, iż tranzystor jest wieczny.

To budująca wiadomość, prawda? Tak, ale z praktyki wiem, że najczęstszą przyczyną uszkodzeń tranzystorów w układach amatorskich jest właśnie ich przegrzewanie wskutek niezajomości podstawowych zasad. Właśnie dlatego problemowi temu poświęciłem aż trzy odcinki cyklu o tranzystorach.

## Moc strat a temperatura

Żeby nie zgubić głównego wątku naszych rozważań muszę ci na zawsze wbić do głowy zależność, jak podana w katalogu maksymalna moc strat wiąże się z dopuszczalną temperaturą złącza ( $+150^{\circ}\text{C}$ ). Musimy teraz znaleźć jakieś wzory i zależności, żeby opisać zachodzące zjawiska.

Czy potrafiłbyś obliczyć, do ilu stopni wzrośnie temperatura złącza podczas pracy tranzystora?

To na pewno zależy nie tylko od mocy traconej (czym większa moc strat, tym wyższa będzie temperatura złącza), ale także od izolacji cieplnej między złączem a otoczeniem – czym skuteczniejsza izolacja termiczna, tym większa musi być temperatura, by „przepchnąć” przez tę izolację do otoczenia całą ilość ciepła wytworzoną w złączu tranzystora.

W fizyce często używa się pojęcia przewodności cieplnej (danego materiału). My w elektronice nie wdajemy się w szczegóły i używamy pojęcia **rezystancji cieplnej (termicznej)** oznaczanej  $R_{th}$

(lub  $R_{TH}$ ), która dotyczy nie ogólnie materiału, ale konkretnego elementu.

Początkujących może to przstraszyć, ale naprawdę nie ma tu nic trudnego. Rezystancja jak rezystancja – stawia opór, utrudnia przepływ (ciepła). Jest to parametr charakteryzujący jakiś konkretny obiekt pod względem przewodzenia ciepła – nie wchodząc w szczegóły przyjmijmy, że jest to właśnie rezystancja termiczna  $R_{th}$ . Na przykład kawałek aluminium czy miedzi ma małą rezystancję termiczną (bo te metale bardzo dobrze przewodzą ciepło), natomiast kawałek drewna, warstwa powietrza czy kawałek tworzywa sztucznego mają dużą rezystancję cieplną. Rzecz jasna, w przypadku tranzystorów zależy nam na tym, by rezystancja cieplna była jak najmniejsza, czyli by całe wydzielone ciepło bez szybko i sprawnie odprowadzić do otoczenia.



Sprawa obliczeń podstawowych zależności cieplnych jest naprawdę dziecinnie łatwa, bo występuje tu łatwa do zrozumienia analogia z obwodem

elektrycznym. W obwodzie elektrycznym prąd zależy od napięcia (czym większe napięcie tym większy prąd) i od oporności (czym większy opór, tym mniejszy prąd). Matematycznie wyraża to oczywiście prawo Ohma. Dokładnie tak samo jest w obwodzie cieplnym. Możemy mówić o prawie Ohma dla obwodu cieplnego.

Czy domyślasz się, co jest „napięciem cieplnym”, co „prądem cieplnym”, a co „oporem cieplnym”?

Pomyśl samodzielnie.

...

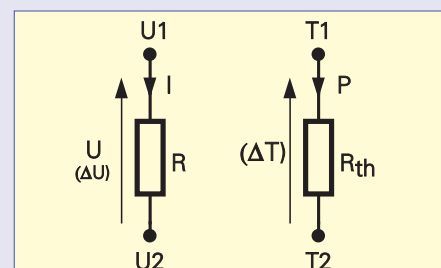
Tak jest!

„Napięciem cieplnym” jest różnica temperatur  $\Delta T$ , „prądem cieplnym” jest przenoszona czy przepływająca moc cieplna  $P$ , natomiast „opór cieplny” to wprowadzona przed chwilą rezystancja termiczna  $R_{th}$ .

Jeśli to jest odmiana prawa Ohma, to zapiszmy analogiczne wzory:

$$P = \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad I = \frac{U}{R}$$

rys. 55. Prawo Ohma





## Pierwsze kroki

W praktyce częściej używamy przekształconych wzorów:

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P} \quad R = \frac{U}{I}$$

$$\Delta T = P \times R_{th} \quad U = I \times R$$

Nie masz chyba wątpliwości, że ta rezystancja cieplna to rezystancja między złączem (ang. *junction* czytaj dżankszn) a otoczeniem, atmosferą (ang. *ambient, ambience*). Oznacza się ją  $R_{thja}$  (junction – ambience).

Rezystancja cieplna wyrażana jest w stopniach Celsjusza (lub kelwinach) na wat – °C/W lub K/W. Sens jest prosty: rezystancja cieplna pokazuje, jaka będzie różnica temperatur z obu stron danego elementu, przy przepływie prądu 1W mocy cieplnej. Jeśli powiemy przez rezystancję termiczną tranzystora (między złączem a otoczeniem) przepływa 5W mocy cieplnej, a rezystancja termiczna wynosi 20°C/W, to różnica temperatur wyniesie 100°C. Czyli złącze będzie cieplejsze od otoczenia o 100°C.

Wartość  $R_{thja}$  tranzystora jest obliczona przez producenta i można ją znaleźć w katalogu.

I nie bój się tych kelwinów na wat, to nic trudnego: 1°C/W = 1K/W. Przecież skala Kelvina to „przesunięta w dół skala Celsjusza” – zaczynająca się od zera absolutnego (0K=-273°C, 0°C=273K, +27°C=300K, +100°C=373K, +150°C=423K).

I nigdy nie zapomnij, iż w podanych wzorach mamy różnicę temperatur złącza i otoczenia!

A po co nam ta rezystancja termiczna i wzory? Właśnie te wzory pozwolą ci zapanować nad problemem mocy strat i temperatury złącza także w tranzystorach dużej mocy oraz w różnorodnych układach scalonych. Obliczymy na przykład, czy w danym układzie pracy tranzystora nie zostanie przekroczona dopuszczalna temperatura złącza.

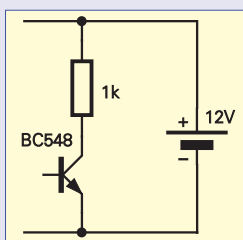
Proszę bardzo:

### Przykład 1

Tranzystor BC548 ( $U_{CE0}=25V$ ,  $I_C=100mA$ ,  $P_{tot}=500mW$ ,  $R_{thja}=250K/W$ ) pracuje przy napięciu 12V z rezystorem obciążenia (rysunek 55)  $R_L=1k\Omega$ . Maksymalna temperatura otoczenia wynosi +40°C.

Jaka będzie maksymalna temperatura złącza tranzystora w najgorszych warunkach, czyli przy napięciu na kolektorze równym połowie napięcia zasilania?

rys. 56



W poprzednim odcinku poznałeś wzór na moc wydzieloną w najgorszych warunkach:

Podstawiamy:

$$P_{max} = \frac{(12V)^2}{4 \times 1000\Omega} = \frac{144}{4000} = 0.036W = 36mW$$

$$\Delta T = 0.036W \times 250 \frac{K}{W} = 9K = 9^\circ C$$

$$T_j = 40^\circ C + 9^\circ C = 49^\circ C$$

Nawet przy napięciu zasilania równym 24V, maksymalna moc strat nie będzie większa niż 150mW, a przyrost temperatury wyniesie co najwyżej 36°C.

Wnioski? Jeśli w twoim układzie tranzystory małej mocy mające rezystancję termiczną nie większą niż 500K/W, pracują z mocami nie większymi niż 100mW (0,1W), nie musisz się obawiać ich przegrzania. Przykładowo, jeśli napięcie zasilające wynosi 12V, to w najgorszym przypadku moc 100mW wydzieli się w tranzystorze obciążonym rezystorem

$$R_L = \frac{(U_{zas})^2}{4P_{tot}}$$

$$R_L = \frac{12^2}{4} \times 0,1W = \frac{144}{0,4} = 360\Omega$$

W praktyce zwykle rezystory obciążenia (w obwodzie kolektora) mają rezystancję powyżej 1kΩ i wtedy przy napięciach zasilania do 24V wcale nie trzeba sobie zwracać głowy mocą strat i temperaturą złącza.

### Przykład 2

Mamy układ z tranzystorem BC107 ( $P_{tot}=300mW$ ) i obliczyliśmy, że w najgorszym przypadku w tranzystorze będzie się wydzielać 200mW (0,2W) mocy strat. W pierwszym przypadku tranzystor pracuje w dobrze wentylowanej obudowie, gdzie temperatura wynosi +30°C, w drugim przypadku temperatura wewnątrz małej, zamkniętej obudowy może sięgnąć +60°C. Wartość  $R_{thja}$  tranzystora BC107 wynosi 500K/W. Obliczamy:

$$\Delta T = 0.2W \times 500 \frac{K}{W} = 100^\circ C$$

W pierwszym przypadku temperatura złącza wyniesie:

$$T_j = +30^\circ C + 100^\circ C = +130^\circ C$$

W drugim  $T_j = +160^\circ C$

No i co? Znow jesteś zaskoczony?

To jest pułapka w którą wpadają początkujący – jeśli nie jest przekroczona katalogowa moc strat  $P_{tot}$ , nie obliczają temperatury złącza sądząc, że na pewno wszystko jest w porządku. Okazało się jednak, że w tranzystorze małej mocy przy zbyt dużej temperaturze otoczenia nie powinno się pracować przy katalogowej mocy strat tranzystora. Ale nie wpadaj w panikę. Jak ci mówiłem, gdy temperatura złącza jest

wyższa o 10 czy 20°C od katalogowych +150°C, rośnie wprawdzie ryzyko uszkodzenia, ale nie grozi to od razu uszkodzeniem tranzystora. To nie znaczy, że zachęcam cię do przekraczania dopuszczalnej temperatury złącza – wprost przeciwnie – namawiam cię, byś tak projektował swoje układy, by temperatury złącza były znacznie niższe niż katalogowe +150°C.

Ale idźmy dalej.

### Przykład 3

Obliczamy temperaturę złącza tranzystora polowego MOSFET typu BUZ74A, który według katalogu ma  $P_{tot}=40W$  i  $R_{thja}=75K/W$  (=75°C/W). Temperatura otoczenia wynosi powiedzmy +20°C. Nie chcemy przeciążyć tranzystora, więc tak dobierzemy rezystancję obciążenia (w obwodzie drenu) tranzystora, by maksymalna moc strat tranzystora wynosiła tylko 5W. Będziemy pracować przy mocy 8-krotnie mniejszej, niż dopuszczalna moc  $P_{tot}$ .

Niczego nie podejrzewając obliczamy temperaturę złącza ze wzoru  $\Delta T = P \times R_{TH}$

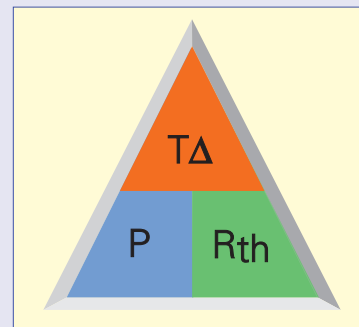
$$\Delta T = 5W \times 75 \frac{^\circ C}{W} = 375^\circ$$

Uwzględniając temperaturę otoczenia równą +20°C, temperatura złącza wyniosłaby +395°C.

Ciut za dużo, prawda?

Gdzie tkwi błąd? Przecież zastosowaliśmy tranzystor dużej mocy! A może obliczenia dotyczą tylko „zwykłych” tranzystorów, a nie jakichś tam MOSFETów? Nie! Podane zasady dotyczą nie tylko wszelkich tranzystorów, ale również układów scalonych, dla których też podaje się rezystancję termiczną  $R_{th}$ .

rys. 57.



W powyższych obliczeniach błędu nie ma! To my zrobiliśmy karygodny błąd, nie stosując radiatora i podstawiając bezmyślnie do wzoru katalogową rezystancję  $R_{thja}$  (która dotyczy sytuacji bez radiatora).

Zauważ, że w przypadku tranzystorów małej mocy (moc strat do 1W) w katalogu podana jest najczęściej jedynie całkowita rezystancja termiczna między złączem a otoczeniem, oznaczona  $R_{thja}$ .

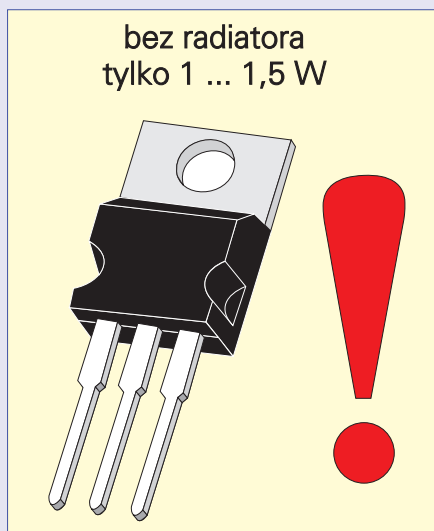
c.d. na str. 27

Natomiast w przypadku tranzystorów mocy, w katalogu podana jest zarówno rezystancja  $R_{thja}$ , dotycząca sytuacji bez radiatora, jak i druga, o znacznie mniejszej wartości –  $R_{thjc}$ . Ta druga to rezystancja termiczna między złączem (*junction*) i obudową (*case*), stąd literki *jc*. Dla wspomnianego tranzystora BUZ74A wynosi ona tylko 3,1K/W.

Przyznam ci się, że przed wielu laty jako początkujący elektronik-amator nie miałem zielonego pojęcia o powyższych zależnościach i „załatwiłem” w taki sposób dwa nowiusieńkie i bardzo na owe czasy drogie tranzystory mocy z serii BUYP. Może i ty masz coś takiego na sumieniu?

Od tej chwili nie popełniaj już takich błędów, choć dziś tranzystory są nieporównanie tańsze, niż dwadzieścia pięć lat temu.

Uważaj teraz! Rezystancja termiczna  $R_{thja}$  (bez radiatora) wszystkich tranzys-



rys. 58.

torów i innych elementów w popularnej obudowie TO-220 wynosi mniej więcej 60...80K/W. Poszczególne tranzystory w takiej obudowie mają różne wartości rezystancji  $R_{thjc}$  (w zakresie 0,9...4K/W), ale podawane wartości  $R_{thja}$  są zbliżone.

Dlaczego? Rezystancja  $R_{thja}$  dla danej obudowy wynika z jej wymiarów, a nie z właściwości krzemowej struktury tranzystora.

Oblicz więc, jaka moc może wydzielić się w tranzystorach w obudowie TO-220 bez radiatora ( $P = \Delta T / R_{th}$ ).

Przyjmij rezystancję  $R_{thja}$  równą 70K/W, oraz temperaturę otoczenia +45°C (np. we wnętrzu obudowy przyrządu).

$$P = \frac{+150^{\circ}\text{C} - 45^{\circ}\text{C}}{70^{\circ}\frac{\text{C}}{\text{W}}} = \frac{105}{70\text{W}} = 1,5\text{W}$$

Dobrze zapamiętaj tę wartość! Nigdy nie zapomnij, że najlepszy tranzystor mocy w obudowie TO-220 bez radiatora nie może pracować przy mocy strat większej niż 1,5W.

Teraz już jesteś przekonany, że o maksymalnej mocy strat tranzystora dużej mocy będzie decydował radiator. I tu dopiero zaczynają się strome schody. Tymi stromymi schodami przespacerujemy się wspólnie za miesiąc.

**Piotr Górecki**