



W poprzednim odcinku poznałeś podstawowe zależności cieplne w tranzystorze. Zarówno te zależności, jak i wyrażające je wzory są bardzo proste. W sumie okazało się jednak, że sprawa jest w miarę łatwa tylko dla tranzystorów małej mocy. W przypadku tranzystorów większej mocy (już powyżej 1W) trzeba uwzględnić właściwości nie tylko tranzystora, ale co najważniejsze - radiatora.

Zacznijmy od podstaw. W poprzednim odcinku poznałeś katalogowy parametr R_{thja} – rezystancję termiczną między złączem a otoczeniem (mierzoną bez radiatora). Także w przypadku tranzystora mocy współpracującego z radiatorem mamy do czynienia z przepływem ciepła między złączem a otoczeniem. Nadal interesuje nas całkowita rezystancja cieplna R_{thja} (ale nie ta z katalogu dotycząca tranzystora bez radiatora). Problem w tym, że teraz rezystancja R_{thja} będzie zależać od uży-

tego radiatora. Musimy też uwzględnić niedoskonały styk obudowy tranzystora z radiatorem. W konsekwencji całkowita rezystancja R_{thja} między złączem a otoczeniem będzie składać się z trzech oddzielnych rezystancji cieplnych:

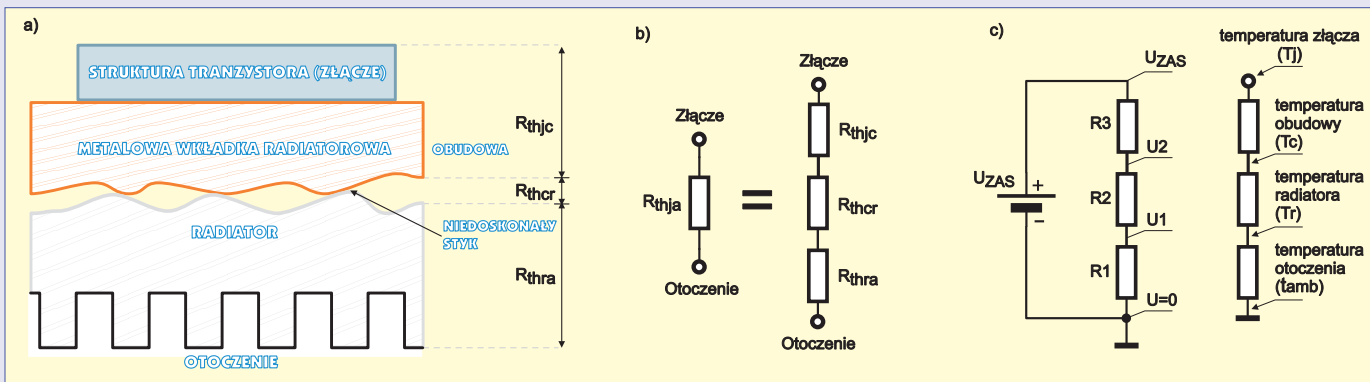
- R_{thjc} (złącze-obudowa)
- R_{thcr} (obudowa-radiator)
- R_{thra} (radiator-otoczenie)

Ciepło wytworzone w krzemowej strukturze półprzewodnika musi przejść najpierw do obudowy, potem do radiatora

ra i dalej do otoczenia. Po drodze musi pokonać miejsce styku obudowy z radiatorem. Stryk ten ze względu na mikroskopijne nierówności obu powierzchni nie jest doskonały i również tu występuje pewien opór cieplny.

Zgodnie z **rysunkiem 59a**, całkowitą rezystancję cieplną między złączem a otoczeniem możemy przedstawić jako szeregowe połączenie wymienionych trzech rezystancji składowych. Pokazane to jest na **rysunku 59b**. Podczas pracy tranzystora

rys. 59.



ciepło wydzielane w złączu przechodzi do otoczenia. Zgodnie z wcześniejszą analogią rozkład temperatur przypomina rozkład napięć na szeregowo połączonych rezystorach. Ilustruje to **rysunek 59c**.

Rezystancja cieplna między złączem a powierzchnią obudowy danego tranzystora (R_{thjc}) podana jest w katalogu. Dla najlepszych tranzystorów i układów scalonych wynosi ona 0,8...1K/W. Dla typowych tranzystorów w obudowach TO-220 wynosi zwykle 1...3K/W. Większą wartość ma tylko w przypadku tranzystorów starszego typu.

Rezystancja R_{thcr} wynosi od około 1K/W przy bezpośrednim przykręceniu tranzystora do radiatora, do około 0,1...0,2K/W przy dokręceniu z zastosowaniem pasty (silikonowej) dobrze przewodzącej ciepło albo cienkich silikonowych (podobnych do gumy) podkładek. Pasty i cienkie podkładki silikonowe zmniejszają rezystancję cieplną połączenia, bo wypełniają także mikroskopijne nierówności na powierzchniach radiatora i tranzystora (pokazane w wielkim powiększeniu na rysunku 59a). Ale uwaga! Nie należy tu mylić przekładki mikowej z przekładką silikonową. Najmłodszym Czytelnikom należy przypomnieć, że mika to minerał o bardzo dobrych właściwościach pod względem izolacji elektrycznej. Mikę łatwo podzielić na cienkie warstwy – plasterki. Daje się łatwo obrabiać – można ją ciąć nożem i delikatnie wiercić w niej otwory. Cieniutki, przezroczysty kawałek miki oddziela skutecznie tranzystor od radiatora pod względem elektrycznym (galwanicznie), a przy tym w miarę dobrze przewodzi ciepło. Ale niestety, w przypadku zastosowania izolacyjnej przekładki mikowej (nawet posmarowanej smarem silikonowym), rezystancja R_{thcr} znacznie zwiększa się, nawet o 1...2K/W.

Natomiast przekładki silikonowe, podobne do gumy, również mogą oddzielać galwanicznie tranzystor od radiatora i mają bardzo dobre właściwości cieplne, czyli małą rezystancję termiczną. Rezystancja ta, zależnie od grubości, może wynosić 0,1...1K/W. Silikonowe przekładki nie powinny być używane wielokrotnie – raz założona przekładka powinna być wymieniona przy ewentualnej wymianie tranzystora.

Natomiast rezystancja R_{thra} zależy od wielkości radiatora, jego kształtu, rodzaju powierzchni oraz koloru i może wynosić od około 50K/W (mała blaszka aluminiowa) do 0,5K/W (i mniej) dla potężnych radiatorów ze specjalnych kształtek aluminiowych. Rezystancja termiczna R_{thra} zależy silnie od warunków przepływu powietrza wokół radiatora. Na przykład zastosowanie wiatraczka (wentylatora) wymuszającego przepływ powietrza może

zmniejszyć rezystancję termiczną nawet kilkakrotnie. Jeszcze skuteczniejsze są radiatory chłodzone cieczą (wodą lub olejem), ale nie będziemy się nimi zajmować, bo hobbyści praktycznie ich nie stosują ze względu na koszty.

W praktyce zapewnienie pracy tranzystora mocy w bezpiecznym obszarze polega przede wszystkim na dobraniu odpowiedniego radiatora. Teoretycznie sprawa jest bardzo prosta. Mając dopuszczalną temperaturę złącza $+150^{\circ}\text{C}$, temperaturę otoczenia (zwykle przyjmuje się $+30...+50^{\circ}\text{C}$) i moc strat P , przy jakiej tranzystor będzie pracował, łatwo obliczyć maksymalną całkowitą rezystancję R_{thja} ze wzoru

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

Potem od tak obliczonej rezystancji wystarczy odjąć rezystancję R_{thjc} i R_{thcr} :

$$R_{thra} = R_{thja} - (R_{thjc} + R_{thcr})$$

Otrzymuje się wartość rezystancji termicznej radiatora R_{thra} . Oczywiście radiator może mieć mniejszą wartość rezystancji cieplnej niż tak obliczona wartość – wtedy temperatura złącza będzie mniejsza od dopuszczalnej ($+150^{\circ}\text{C}$).

Wykonaj kilka prostych ćwiczeń tego typu.

Ćwiczenie

Oblicz rezystancję termiczną radiatora potrzebnego do tranzystora wyjściowego we wzmacniaczu mocy. Maksymalna moc strat tego tranzystora w najgorszych warunkach wyniesie 30W. Tranzystor ma następujące parametry: $P_{tot}=125\text{W}$, $R_{thjc} = 1,1\text{K/W}$, $T_{jmax} = +150^{\circ}\text{C}$. Maksymalna temperatura otoczenia we wnętrzu obudowy niech wynosi $+50^{\circ}\text{C}$. Nie zastosowano smaru silikonowego i rezystancję R_{thcr} należy przyjąć równą 1K/W.

Jaki radiator wystarczy po zastosowaniu smaru silikonowego zmniejszającego R_{thcr} do 0,2K/W?

Obliczamy maksymalną dopuszczalną całkowitą rezystancję R_{thja}

$$R_{thja} = (150 - 50) / 30 = 3,3^{\circ}\text{C/W} = 3,3\text{K/W}$$

$$R_{thra} = 3,3 - (1 + 1) = 1,2\text{K/W}$$

Bez smaru silikonowego potrzebny będzie radiator o rezystancji 1,2K/W.

Natomiast ze smarem silikonowym:

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

Jest to znaczna różnica – ze smarem rezystancja radiatora może być aż o 75% większa, czyli... warto smarować. Jest to żelazna zasada: **przy dużych mocach traconych smar lub podkładki silikonowe są niezbędne**.

Ćwiczenie

Rezystancja R_{thjc} tranzystora BD135 (BD135...140) wynosi 10K/W. Moc tracona w tranzystorze wynosi 5W. Czy moż-

na nie stosować smaru silikonowego w sytuacji, gdy tranzystor będzie współpracował z radiatorem o rezystancji R_{thra} równej 7K/W?

W tym wypadku nie trzeba przeprowadzać szczegółowych obliczeń. Wystarczy oszacować, jak wpłynie brak pasty silikonowej na temperaturę złącza. Można przyjąć rezystancję R_{thcr} bez silikonu równą 1,5K/W, a z silikonem 0,3K/W. Inaczej mówiąc, bez silikonu całkowita rezystancja zwiększy się o 1,2K/W. Przy mocy 5W spowoduje to wzrost temperatury o dodatkowe 6 stopni. 6 stopni to niewiele, a więc w przypadku małych mocy traconych (do 5...10W) wpływ silikonu jest niewielki.

Ale przy dużych mocach wpływ ten jest duży, często wręcz krytyczny. Gdyby moc wynosiła nie 5 tylko 50W, brak smaru oznaczałby niepotrzebny, dodatkowy wzrost temperatury złącza aż o 60 stopni.

Ćwiczenie

Sprawdź, czy tranzystor BDV64 ($P_{tot}=125\text{W}$, $R_{thjc}=1\text{K/W}$, $T_{jmax}=+150^{\circ}\text{C}$) może rozproszyć do otoczenia moc 80W z radiatorem o $R_{thra}=1,5\text{K/W}$, w temperaturze otoczenia $+50^{\circ}\text{C}$ przy użyciu smaru silikonowego ($R_{thcr}=0,15\text{K/W}$).

Sprawdzamy. Najpierw liczymy

$$R_{thja} = 1\text{K/W} + 0,15\text{K/W} + 1,5\text{K/W} = 2,6\text{K/W}$$

Przy mocy 80W wzrost temperatury złącza wyniesie:

$$\Delta T = 80 \times 2,6 = 212^{\circ}\text{C}$$

Temperatura złącza wyniosłaby więc $+262^{\circ}\text{C}$ – tranzystor w żadnym wypadku nie może pracować w takich warunkach!

Ćwiczenie

Oblicz rezystancję termiczną radiatora, współpracującego z tranzystorem 2N3055 ($P_{tot}=117\text{W}$, $R_{thjc}=1,5\text{K/W}$, $T_{jmax}=+200^{\circ}\text{C}$) w układzie stabilizatora, gdzie maksymalna moc strat wyniesie 85W. Maksymalna temperatura otoczenia we wnętrzu obudowy $+50^{\circ}\text{C}$. Dzięki smarowi silikonowemu $R_{thcr} = 0,1\text{K/W}$.

Obliczamy wymaganą całkowitą rezystancję cieplną

$$R_{thja} = (200 - 50) / 85 = 1,765\text{K/W}$$

Stąd

$$R_{thra} = 1,765 - (1,5 + 0,1) = 0,165\text{K/W}$$

Radiatora o tak małej rezystancji cieplnej w warunkach amatorskich wykonać się nie da! Nie pomoże nawet silny wentylator!

Ćwiczenie

Tranzystor BD136 (obudowa TO-126, $P_{tot}=12,5\text{W}$, $R_{thjc}=10^{\circ}\text{C/W}$, $T_{jmax}=+150^{\circ}\text{C}$) współpracuje z radiatorem o $R_{thra} = 4\text{K/W}$. Bez silikonu $R_{thcr} = 1^{\circ}\text{C/W}$. Czy w tych warunkach tranzystor może pracować z mocą strat równą 10W w temperaturze otoczenia równej $+40^{\circ}\text{C}$?

Pierwsze kroki

Nie! Bo przy mocy 10W i dopuszczalnej różnicy temperatur równej 110°C, całkowita rezystancja musiałaby wynosić nie więcej niż 11K/W. Tymczasem już sam tranzystor i przekładka mają taką rezystancję termiczną. W tym wypadku nie pomoże żaden radiator. Podany tranzystor nie może pracować w takich warunkach. Co zrobić?

Zastosowanie smaru niewiele pomoże, bo nawet po zmniejszeniu R_{thcr} do 0,3°C/W należałoby zastosować wielki radiator o bardzo małej rezystancji R_{thra} równej 0,7K/W. Teoretycznie taki radiator można wykonać, ale jest to nieracjonalne.

Wystarczy bowiem zastosować większy tranzystor, na przykład BD244 o rezystancji R_{thjc} równej 1,92K/W

Oczywiście całkowita rezystancja R_{thja} nadal nie może być większa niż 11K/W, ale teraz wystarczyłoby zastosować radiator o rezystancji

$$R_{thra}=11-(1,92+0,2)=8,88K/W$$

Podany radiator ($R_{thra} = 4K/W$) zapewni więc spory zapas. W rzeczywistości wzrost temperatury złącza nie przekroczy

$$\Delta T=10W \times (1,92+0,2+4)=61,2^{\circ}C$$

czyli temperatura złącza niewiele przekroczy +100°C.

Przemysł wnioski wynikające z tych ćwiczeń. Przypuszczam, że niektóre podane przykłady cię zaniepokoiły. Okazało się, że w wielu przypadkach nie możesz pracować przy deklarowanej w katalogu mocy strat P_{tot} .

Co jest grane? Gdzie tkwi błąd?

Błędy nie ma. Obliczenia (choć nieco uproszczone) są w porządku. Za chwilę sam się przekonasz, o co tu chodzi. Oblicz więc, jaki radiator jest potrzebny przy pracy tranzystora mocy. Niech to będzie tranzystor BDW83B ($P_{tot}=130W$, $T_{jmax}=+150^{\circ}C$, $R_{thjc}=0,96K/W$). Niech temperatura otoczenia wynosi +40°C.

$$R_{thja}=(150-40)/130=0,846K/W$$

czyli mniej niż wynosi katalogowa wartość R_{thjc} ! Tranzystor nie może pracować w takich warunkach!

Czy nie masz wrażenia, że producenci tranzystorów wpuszczają cię w gęste maliny robiąc ci smak na te katalogowe 130W mocy strat, których, jak się okazuje, w żaden sposób nie można „wydusić” z tranzystora bez ryzyka przegrzania?

Czy to jest wpuszczanie w maliny, to inny problem, ale rzeczywiście, w praktyce żaden tranzystor mocy nie może pracować przy katalogowej mocy strat P_{tot} . To skąd się wzięła ta „katalogowa” moc?

Zapamiętaj raz na zawsze, że jest to moc, jaką teoretycznie można stracić w tranzystorze przy zastosowaniu idealnego radiatora. A ściślej – podawana w każdym katalogu maksymalna moc

strat P_{tot} dotyczy laboratoryjnych warunków testowych z wręcz idealnym chłodzeniem, (uwaga!) przy temperaturze obudowy wynoszącej (zwykle) tylko +25°C. Zauważ, że te +25°C to temperatura obudowy w czasie pracy, gdy dzieli się „katalogowa” moc strat. Taką temperaturę obudowy można uzyskać tylko przy wymuszonym chłodzeniu, i to nie powietrzem, lecz cieczą.

Sprawdź, czy te informacje są prawdziwe dla tranzystora BDW83. Jeśli utrzymasz temperaturę obudowy na poziomie +25°C, czyli różnica temperatur ma wynieść $(150-25)=125^{\circ}C$, to moc maksymalna wyniesie

$$P = \frac{125}{0,96} = 130W$$

I to jest właśnie moc, jaką odczytałeś z katalogu. Zgadza się!

Teraz uważaj! Mając podane w katalogu moc strat P_{tot} i maksymalną temperaturę złącza (najczęściej +150°C) potrafisz obliczyć rezystancję R_{thjc} . Zakładając, że temperatura obudowy ma wynosić +25°C, czyli przy różnicy temperatur $\Delta T=100^{\circ}C=100K$ obliczysz:

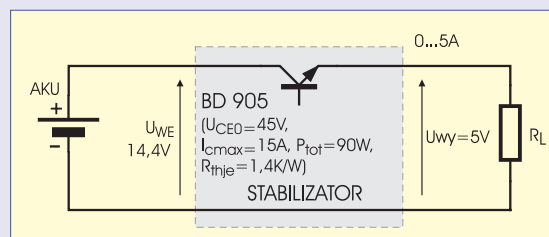
$$R_{thjc} = \frac{100K}{P_{tot}}$$

Proste? Tak! Choć w rzadkich przypadkach możesz natrafić na niespodziankę. Mianowicie w przypadku niektórych tranzystorów producenci podają moc maksymalną P_{tot} przy temperaturze obudowy nie +25°C, tylko +60°C. Ale wtedy ta nieścisłość niczym nie grozi, bo rzeczywista rezystancja R_{thjc} okaże się jeszcze mniejsza, niż obliczona za pomocą powyższego prostego sposobu.

Teraz wracamy do wcześniejszych ćwiczeń.

Okazało się też, że moc strat P_{tot} podawana w katalogach tranzystorów mocy, niewiele ma wspólnego z rzeczywistością, bo można ją uzyskać tylko przy idealnym chłodzeniu. Jeśli tak, to oblicz teraz, z jaką mocą tak naprawdę może pracować tranzystor BDW83 o „rewelacyjnej mocy” P_{tot} wynoszącej aż 130W. Do jego chłodzenia wykorzystasz duży żebrowany radiator o rezystancji termicznej wynoszącej 1,5K/W, a rezystancję R_{thcr} możesz przyjąć równą 0,1K/W (smar lub cieniutka podkładka silikonowa).

rys. 60.



wa). Maksymalną temperaturę otoczenia przyjmij realistycznie równą +40°C.

Całkowita rezystancja termiczna

$$R_{thjc} = 0,96 + 0,1 + 1,5 = 2,56 \frac{K}{W}$$

$$P = \frac{150 - 40}{2,56} = 43W$$

I co? Znów zaskoczenie? Tylko 43W? A miało być 130W?! Niestety tak! I wierz mi – radiator o rezystancji 1,5K/W to spory kawałek żebrowanego profilu aluminiowego.

Niestety, przy projektowaniu układów z tranzystorami mocy (i nie tylko) musisz zawsze brać pod uwagę wyniki naszych rozważań. Ponieważ ty nie masz szans zastosować idealnego radiatora, dlatego raz na zawsze porzuć nierealne marzenia – **nigdy nie wydusisz z tranzystora mocy katalogowej mocy strat P_{tot}** . W pierwszym, zgrubnym przybliżeniu możesz przyjąć, że z przyzwoitym radiatorem tranzystor mocy będzie u ciebie pracował co najwyżej z połową katalogowej mocy strat.

Ponadto jeśli do tej pory ci się wydawało, że wystarczająco duży radiator zawsze rozwiąże problem, to się myliłeś. Wcześniejsze przykłady pokazały, że choćbyś zastosował idealny radiator, nigdy nie zmniejszysz całkowitej rezystancji termicznej poniżej R_{thjc} . A do tego zawsze dochodzi jakaś wartość R_{thcr} – choćbyś nie wiem jak smarował, nie zmniejszysz jej do zera, tylko do 0,1...0,2K/W.

Tu wyjaśnia się całkowicie problem „wąskiego gardła”, o którym wspominałem przy okazji omawiania wzmacniacza o mocy 100W. Zajrzyj do tego artykułu w EdW 8/97 na stronie 18. Teraz ostatnie ćwiczenia pokazały, że wspomnianym „wąskim gardłem” jest właśnie rezystancja R_{thjc} . Wynika ona z konstrukcji tranzystora i nie masz na nią żadnego wpływu. A gdy nie zastosujesz smaru silikonowego, dodatkowo pogorszy sytuację rezystancja R_{thcr} dochodząca do 1...2K/W.

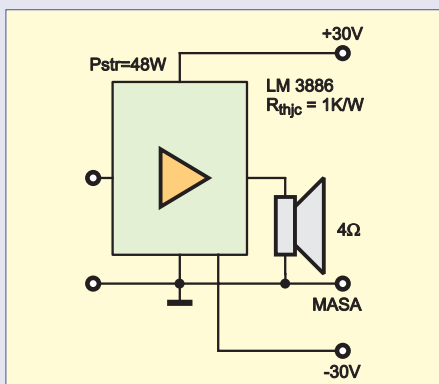
Czy teraz dokładnie rozumiesz problem mocy strat i radiatorów?

Wydaje ci się, że tak? W takim razie, w ramach ćwiczeń praktycznych oblicz rezystancję termiczną radiatorów wymaganą w układach z **rysunków 60 i 61**. Dla wzmacniacza z rysunku 61 przeprowadź obliczenia trzykrotnie:

a) dla radiatora połączonego galwanicznie z wkładką radiatorową (ujemnym biegunem zasilania) zaplanuj użycie smaru silikonowego i przyjmij $R_{thcr} = 0,1K/W$,

b) dla radiatora oddzielnego galwanicznie zaplanuj użycie izolacyjnej przekładki silikonowej i przyjmij $R_{thcr} = 0,5K/W$,

c) dla radiatora oddzielnego galwanicznie zaplanuj użycie izolacyjnej przekładki miko-



rys. 61.

wej posmarowanej obustronnie smarem silikonowym i przyjmij $R_{thcr} = 1,5K/W$.

Jakie przyjmiesz temperatury otoczenia? W przypadku zasilacza do samochodu z rysunku 60 trzeba liczyć się z temperaturą rzędu $+60...+80^{\circ}C$, prawda? W przypadku wzmacniacza wystarczy $+40...+50^{\circ}C$. Nie przejmuj się, że na ry-

sunku +61 masz układ scalony, a nie tranzystor. Zasady obliczeń wielkości cieplnych są takie same jak w tranzystorach. Podana moc strat układu scalonego LM3886 dotyczy najgorszego możliwego przypadku – zobacz EdW 2/98 str. 10 rys. 3 dla napięcia zasilania $\pm 30V$. Mając takie dane obliczysz radiator potrzebny dla tego najgorszego przypadku. W rzeczywistości, przy normalnej pracy wzmacniacza średnia wydzielana moc strat jest mniejsza i radiator taki na pewno będzie dobrany z pewnym zapasem. A teraz licz.

Poradziłeś sobie? To świetnie!

No, może nie do końca świetnie... Bo niby co teraz dalej zrobić z tą wiedzą? Co z tego, że obliczyłeś potrzebną rezystancję termiczną radiatora? A skąd będziesz wiedział, jaką rezystancję mają posiadane przez ciebie radiatory?

Pół biedy, jeśli w dobrej firmie zamówisz radiator o rezystancji termicznej po-

danej w firmowym katalogu. Jak cię znam, w większości przypadków nie skorzystasz z tej drogi, tylko będziesz próbował zastosować jakiś posiadany radiator czy kawałek blachy. Jak obliczysz czy zmierzysz rezystancję termiczną takiego radiatora?

To już historia z zupełnie innej bajki – z przyjemnością mogę ci przybliżyć ten temat, jeśli napiszesz do mnie na adres Redakcji. Wtedy poświęcę oddzielny artykuł sprawie doboru radiatorów i przedstawię dodatkowe informacje. Mogę też ci zaproponować budowę prostego przyrządu do pomiaru rezystancji termicznej radiatorów. Czekam na listy w tej sprawie.

A na razie podejźmy do tego tematu z zupełnie innej strony i podam ci kilka ogólnych wskazówek dotyczących praktycznego doboru radiatora.

Zajmiemy się tym za miesiąc.

Piotr Górecki

