



5. Projektowanie termiczne – właściwości termiczne przyrządów półprzewodnikowych

Mieczysław Nowak



Instytut Sterowania i
Elektroniki Przemysłowej

Czerwiec/lipiec 2009

Przyczyną nagrzewania się struktur są straty mocy wydzielające się w trakcie normalnej pracy elementów. Można uznać, że główny składnik tej mocy jest związany ze stanem przewodzenia, kiedy przy znacznych wartościach prądu na rzeczywistym łączniku półprzewodnikowym występuje spadek napięcia $1 \div 3V$. Moc tracona w stanie blokowania i zaworowym jest zwykle bardzo niewielka i często przy mniej dokładnych obliczeniach bywa pomijana. W urządzeniach pracujących z normalną częstotliwością sieciową 50Hz również średnia wartość łączeniowych strat mocy (złączania i wyłączenia), w jednym okresie, jest pomijalnie mała. Inaczej przedstawia się udział tych strat w całości traconej mocy w przypadku większych częstotliwości przełączania. Mogą one sięgać nawet 50% i oczywiście powinny być możliwie dokładnie określone, co nie jest zadaniem prostym. Tylko przy bardzo dokładnych obliczeniach powinny być uwzględnione straty mocy wywołane prądem w bramce lub bazie sterowanego elementu. Podstawą do takich obliczeń są oczywiście przebiegi czasowe napięcia i prądu w obwodzie sterującym.

Chłodzenie czyli odprowadzanie energii cieplnej odpowiadającej mocy strat dokonuje się poprzez zespolone lub dociśnięte metalowe podłoże obudowy przyrządu, a następnie dalej za pośrednictwem ściśle przylegającego do tej obudowy specjalnego elementu konstrukcyjnego - radiatora, do środowiska otaczającego - najczęściej powietrza. Ostatecznie przebieg temperatury w czasie, który przy określonych warunkach pracy danego elementu wystąpi w jego strukturze, jest zależny od obu czynników - strat mocy i efektywności odprowadzania ciepła (chłodzenia). Metody obliczeń zjawisk cieplnych i wyznaczania temperatury stanowiące podstawę do doboru klasy prądowej elementu i projektu systemu chłodzenia są takie same dla wszystkich elementów półprzewodnikowych. Dla wszystkich elementów półprzewodnikowych są podawane przez producentów wartości rezystancji cieplnych oraz wykres tzw. impedancji cieplnej, służące do obliczania przyrostów temperatury w ustalonych i przejściowych stanach temperatury struktury. .

Moc strat energii w przyrządzie półprzewodnikowym jest sumą składowych mocy wydzielanej w poszczególnych przedziałach czasowych pojedynczego cyklu odpowiadającego okresowi pracy. W typowych zastosowaniach dominują straty związane ze stanem przewodzenia łączników (P_{strP}) oraz straty wynikające z przełączania (P_{strS}).

Straty przewodzenia są zależne od parametrów opisujących aproksymację charakterystyki łącznika w stanie przewodzenia

$$P_{strP} = \frac{1}{T} \int_0^T u_F(t) i(t) dt = U_{TO} I_{F(AV)} + r_F I_{F(RMS)}^2$$

W układach tyrystorowo – diodowych o sieciowej częstotliwości łączeń ten rodzaj strat jest dominujący (powyżej 95%)

W układach na łącznikach w pełni sterowanych (GTO, IGBT...) pracujących na większych o sieciowej częstotliwości straty łączeniowe stanowią znaczącą część. Straty łączeniowe opisuje ogólna zależność:

$$P_{strS} = f_S (E_{on} + E_{off})$$

gdzie: f_S – częstotliwość łączeń, E_{on} , E_{off} – energia tracona przy załączaniu i wyłączaniu przyrządu półprzewodnikowego określona w katalogu lub wyznaczona na podstawie przebiegów napięcia i prądu w stanach dynamicznych. W szczególnych przypadkach może okazać się konieczne uwzględnienie strat związanych ze stanami blokowania i zaworowym (P_{strDR}) oraz strat sterowania (obwodu bramki) (P_{strG}).

Ostatecznie straty sumaryczne $P_{str\Sigma} = P_{strP} + P_{strS} + P_{strDR} + P_{strG}$

Stan ustalony

W stanie ustalonym (tzn w sytuacji gdy przy stałej wartości strat mocy wydzielanej w elemencie nastąpiło ustalenie temperatury w pastylce półprzewodnika) przy określaniu zależności między ilością odprowadzanego ze struktury ciepła a różnicą temperatury struktury i czynnika chłodzącego, jest stosowany model oparty na analogii obwodu cieplnego z obwodem elektrycznym. Sens takiej analogii wyjaśnia rys. 1 ab. Pełny schemat zastępczy układu cieplnego struktura złączowa-czynnik chłodzący przedstawiono na rys.2. Wartości oznaczonych na rysunku rezystancji cieplnych są określane w katalogach przez producentów. Korzystając z nich, można obliczyć przyrost temperatury struktury półprzewodnikowej T_j ponad temperaturę otoczenia

zgodnie ze wzorem

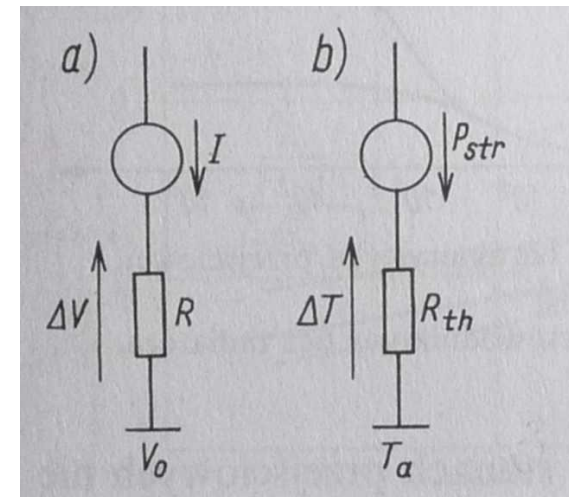
$$\Delta T_j = P_{str} (R_{thj-c} + R_{thc-r} + R_{thr-a})$$

w którym: P_{str} - ustalona wartość strat mocy wydzielanych w półprzewodniku; R_{thj-c} - rezystancja cieplna wewnętrzna między pastylką półprzewodnika a obudową elementu, $^{\circ}\text{C}/\text{W}$; R_{thc-r} - rezystancja cieplna przejścia (styku) między obudową a radiatorem, $^{\circ}\text{C}/\text{W}$; R_{thr-a} - rezystancja cieplna między radiatorem a czynnikiem chłodzącym, $^{\circ}\text{C}/\text{W}$.

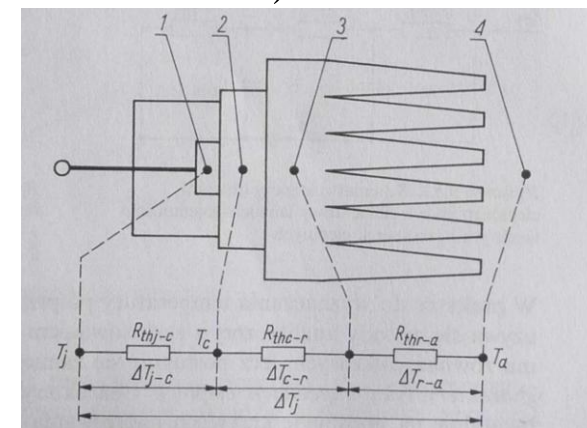
W celu zapewnienia poprawnej pracy elementu musi być spełniony warunek

$T_j = T_a + \Delta T_j < T_{jmax}$ przy czym: T_j - ustalona temperatura struktury półprzewodnikowej; T_a - temperatura czynnika chłodzącego; T_{jmax} - katalogowa wartość maksymalnej temperatury struktury.

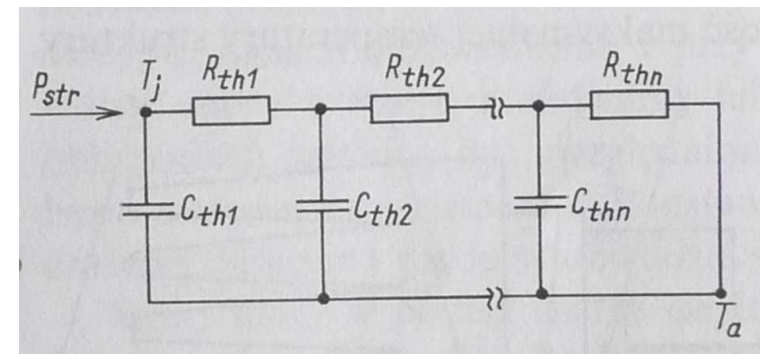
1)



2)



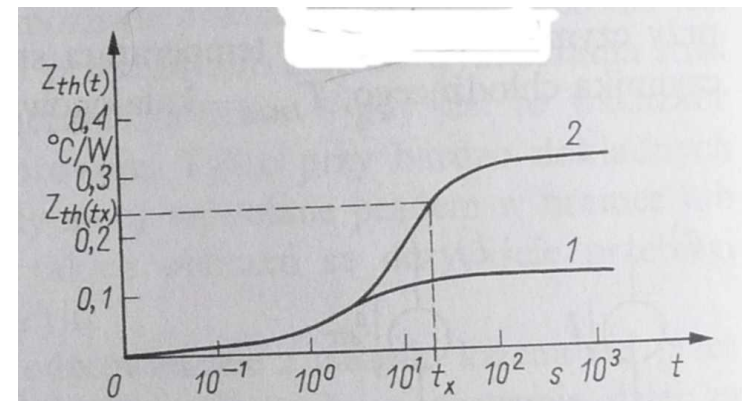
W większości przypadków elementy półprzewodnikowe pracują przy zmiennej wartości mocy strat wydzielanej w strukturze i związana z tym ciągłej zmianie temperatury półprzewodnika. Przy wyznaczaniu przebiegów temperatury w stanach nieustalonych lub tzw. quasi-ustalonych jest konieczne zastosowanie modelu cieplnego, w którym poza rezystancjami cieplnymi uwzględnia się także pojemność cieplną. Schemat zastępczy odpowiadający modelowi cieplnemu w stanach przejściowych przedstawiono na rysunku.



W praktyce do wyznaczania temperatury półprzewodnika w stanach przejściowych nie używa się metody analitycznej z zastosowaniem złożonego modelu i odpowiadających mu równań całkowych, lecz posługuje się zamieszczoną w firmowych katalogach tzw. charakterystyką impedancji cieplnej. Charakterystyka taka jest wyznaczona eksperymentalnie na podstawie krzywych nagrzewania się struktury. Zastosowanie krzywych nagrzewania do określenia charakterystyki impedancji cieplnej, konkretnego typu elementu i współpracującego z nim radiatora jest możliwe dzięki proporcjonalnej zależności temperatury od mocy wydzielanej w strukturze. Przejściowa impedancja cieplna jest zdefiniowana jako iloraz przyrostu temperatury $\Delta T_{j(tx)}$ i stałej mocy P_{strM} wydzielanej w półprzewodniku w przedziale czasu t_x

$$Z_{th(tx)} = \frac{\Delta T_{j(tx)}}{P_{str(AV)}}$$

Przykładowe charakterystyki przejściowej impedancji cieplnej, w funkcji czasu trwania impulsu strat mocy o stałej wartości przedstawiono na rysunku. Charakterystyka (1) uwzględnia impedancję samego elementu, charakterystyka (2) - elementu wraz z przytwierdzonym do niego typowym radiatorem. Takie określenie impedancji jest zgodne z praktyką, umożliwia bowiem kojarzenie ściśle zdefiniowanej przez producenta impedancji cieplnej elementu z impedancją cieplną potrzebnego radiatora, zwykle dostarczanego przez innego wytwórcę.



Zgodnie z podstawowym założeniem metody wykresu impedancji cieplnej wartość strat mocy w przedziale, dla którego jest obliczany przyrost temperatury, musi pozostawać stała. W warunkach rzeczywistych przebieg strat mocy ma postać ciągu impulsów o określonej częstotliwości powtarzania, odpowiadającej częstotliwości łączeń elementu (np. 50 Hz). Wynikające stąd cykliczne zmiany temperatury powinny być wzięte pod uwagę,

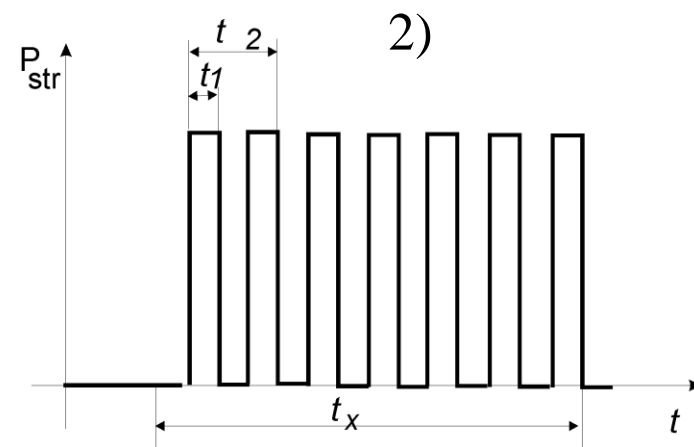
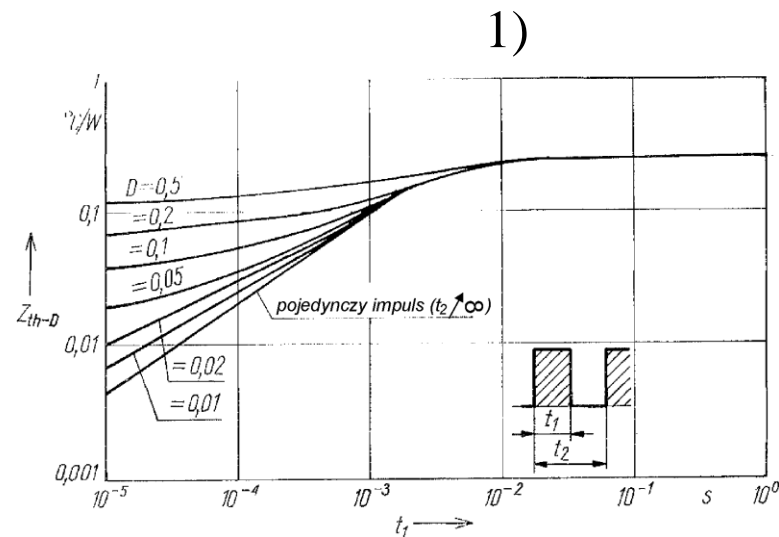
Na rysunku b przedstawiono przykład przebiegu temperatury struktury diody lub tyrystora pracującego w układzie prostownika przy obciążeniu chwilowym w przedziale czasu t_x . Maksymalna temperatura w każdym z okresów impulsowego przebiegu prądu jest większa niż temperatura średnia wyznaczona na podstawie impedancji cieplnej dla średniej wartości strat mocy $P_{str(AV)} = (t_I/T) P_{str} \text{ M}$. Pulsacje temperatury wynikające z impulsowego przebiegu strat mocy można uwzględnić stosując diagram impedancji cieplnej impulsowej wyznaczonej dla obwiedni maksymalnej temperatury struktury T_{jM} i strat mocy $P_{str(AV)}$, czyli

$$Z_{th-i}(t_x) = \frac{\Delta T_{jM}(t_x)}{P_{str(AV)}}$$

Stan nieustalony

Niekiedy wykres impedancji cieplnej elementu zamieszczony w danych katalogowych ma postać jak na rysunku 1). Jak widać, oprócz charakterystyki impedancji dla pojedyn-czego impulsu stł mocy o czasie trwania t_2 (Z_{th-C}) zawiera też charakterystyki wyzn czone dla impulsowego przebiegu strat mocy o określonym stosunku wypełnienia (Z_{th-D}). Dodatkową rezystancję cieplną ΔR_l przy określonej częstotliwości pracy $f_s=1/t_2$ można wyznaczyć z takiego wykresu na podstawie zależności $R_{th-i}=Z_{th-D}/D-R_{thj}$ - gdzie: Z_{th-D} - impedancja cieplna odczytana z krzywej dla określonego współczynnika wypełnienia $D = t_1/t_2$ (przy czym t_2 - okres występowania impulsów strat mocy); R_{thj-c} - rezystancja cieplna, równa Z_{thj-C} , dla czasu trwania strat dążącego do ∞ .

Ostatecznie przyrost maksymalnej temperatury po czasie t_x dla przebiegu strat mocy, jak na rys.2), oblicza się ze wzoru $\Delta T_{jM} = P_{str(AV)} [Z_{th-C}(t_x) + R_{th-j}]$ przy czym $P_{str(AV)} = DP_M$ (P_M - moc strat w impulsie)

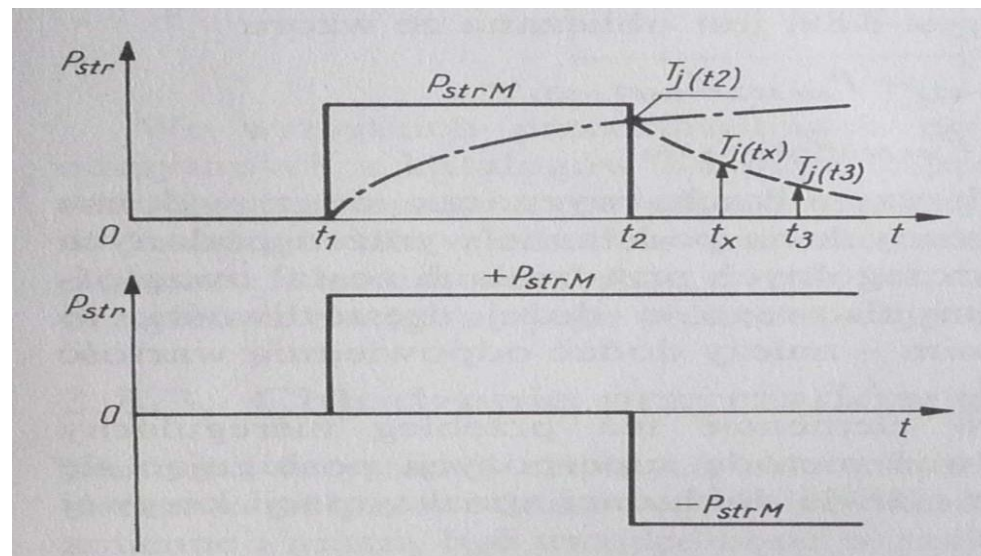


Stan nieustalony

W przypadku gdy średnie straty mocy w elemencie zmieniają się w funkcji czasu, np. wskutek zmian obciążenia przekształtnika, wówczas przy wyznaczaniu temperatury struktury półprzewodnika w dowolnej chwili t_x stosuje się zasadę superpozycji. Do wyjaśnienia tej zasady wygodnie będzie posłużyć się przykładem z rysunku.

Przedstawiono tu przypadek nagrzewania i chłodzenia struktury pod wpływem pojedynczego impulsu strat mocy. Przebieg temperatury w przedziale $t_1 \div t_2$ można wyznaczyć wprost z wykresu impedancji cieplnej $Z_{th}(t)$ na podstawie zależności

$T_{j(t_x)} = T_a + P_{strM} Z_{th}(t_x - t_1)$ Oznacza to, że temperaturę w chwili t_2 określa wzór $T_{j(t_2)} = T_a + P_{strM} Z_{th}(t_2 - t_1)$. Po skończeniu się impulsu P_{strM} (począwszy od chwili t_2) rozpoczyna się proces chłodzenia struktury półprzewodnikowej. Może być on przedstawiony jako superpozycja przebiegu temperatury wywołanego dalszym nagrzewaniem się pod wpływem dodatniej mocy P_{strM} począwszy od chwili t_1 oraz chłodzenia pod wpływem ujemnego impulsu mocy P_{strM} począwszy od chwili t_2 . Dla $t_x > t_2$ przebieg temperatury wyznacza się ze wzoru $T_{j(t_x)} = T_a + P_{strM} Z_{th}(t_x - t_1) - P_{strM} Z_{th}(t_x - t_2)$ a zatem $T_{j(t_3)} = T_a + P_{strM} Z_{th}(t_3 - t_1) - P_{strM} Z_{th}(t_3 - t_2)$



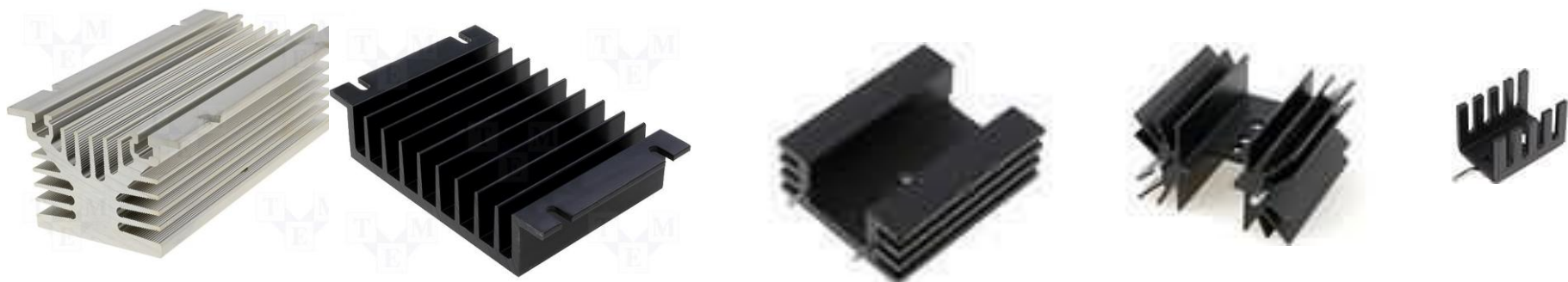
Wiadomości ogólne

Wartości rezystancji cieplnych oraz charakterystyki impedancji cieplnych są dla samego elementu półprzewodnikowego ściśle określone w katalogach jako stałe lub zależności niezmiennie i muszą być uwzględnione w praktyce bez możliwości jakiegokolwiek ingerencji ze strony użytkownika, Celem obliczeń cieplnych, uwzględniających powyższą zasadę, jest sprawdzenie doboru radiatora i warunków chłodzenia ze względu na maksymalną temperaturę struktury złączowej. Jeżeli temperatura przekracza dopuszczalną wartość, to w pierwszej kolejności należy poprawić warunki chłodzenia, co prowadzi do zmniejszenia rezystancji cieplnej radiatora, a gdy to jest niemożliwe lub nieekonomiczne - dobiera się element o większej obciążalności prądowej, a zatem droższy. W ogromnej większości przypadków stosuje się chłodzenie powietrzne. W urządzeniach na moce od kilowata do nawet wielu megawatów najbardziej rozpowszechnione jest chłodzenie z zastosowaniem radiatorów powietrznych nie wymagające specjalnych instalacji hydraulicznych, jakie są potrzebne przy chłodzeniu cieczą. Ten drugi rodzaj chłodzenia jest uzasadniony tylko w przypadku przekształtników wielkiej mocy, gdzie dzięki dużej efektywności i zwartej budowie małych radiatorów cieczowych jest możliwe znaczne zmniejszenie rozmiarów konstrukcji zgodnie z wymaganiami wynikającymi z warunków instalacji przekształtnika.

Oprócz wymienionych dwóch rodzajów chłodzenia można wskazać jeszcze na specyficzne chłodzenie dwustanowe, w którym wykorzystuje się dużą wartość właściwego ciepła parowania i skraplania cieczy do uzyskania bardzo małej rezystancji cieplnej skomplikowanego konstrukcyjnie radiatora, zawierającego tzw. rurę cieplną. Innym wysublimowanym sposobem efektywnego odprowadzania ciepła z przyrządów półprzewodnikowych jest rozwijany obecnie system tzw. chłodzenia mikrokanałowego.

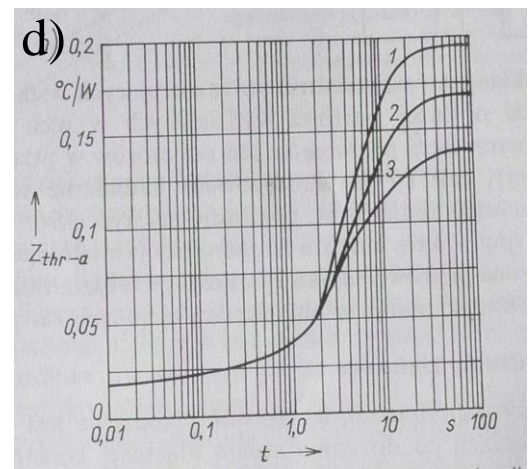
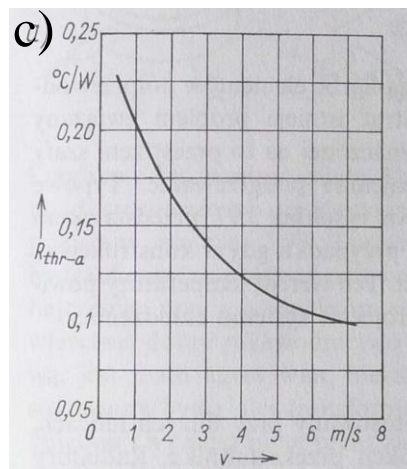
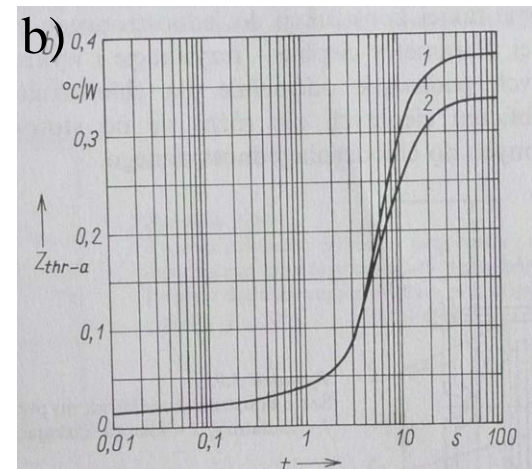
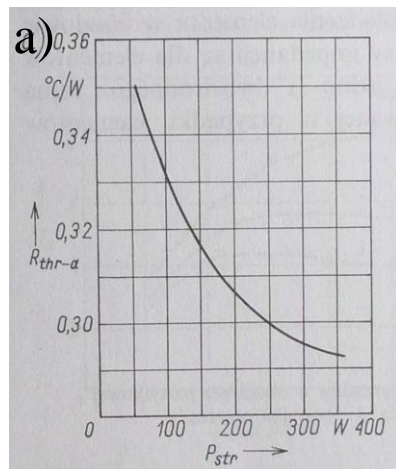
Chłodzenie powietrzne

Do chłodzenia powietrznego obecnie są stosowane radiatory firmowe, dostarczane przez wyspecjalizowanego producenta. Są one omówione w katalogach w sposób dostosowany do opisu zjawisk cieplnych, powszechnie używanego w odniesieniu do elementów półprzewodnikowych. Są to przeważnie kształtowniki wykonane w postaci walcowanych szyn aluminiowych o rozwiniętym profilu przekroju poprzecznego. Produkowane są także radiatory o kształcie dostosowanym do określonej formy obudowy przyrządu, odlewane z aluminium lub specjalnych stopów metali, dobrze przewodzących ciepło. Należy zauważyć, że oferta radiatorów dostępnych na rynku jest niezwykle szeroka i praktycznie można zawsze dobrać odpowiedni kształtownik optymalny do określonego elementu półprzewodnikowego i jego zastosowania nie tylko ze względu na właściwości cieplne, ale także z uwagi na potrzeby konstrukcyjne całego urządzenia. Przy wyborze typu radiatora chłodzonego powietrzem należy rozstrzygnąć problem odprowadzania ciepła: czy ma być dokonywane za pomocą konwekcji naturalnej, polegającej na ruchu powietrza wywołanego jego unoszeniem się pod wpływem nagrzewania, czy też konwekcji wymuszonej, w której powietrze jest przemieszczane wokół żeber radiatora na skutek działania specjalnego wentylatora. Preferowany jest pierwszy z tych rodzajów, gdyż jest zwykle tańszy, mniej zawodny, a przede wszystkim pozwala uniknąć uciążliwego hałasu wywołanego pracą wentylatora. W przypadku przekształtników większych mocy i zwartej konstrukcji urządzenia zastosowanie wymuszonego przepływu jest koniecznością



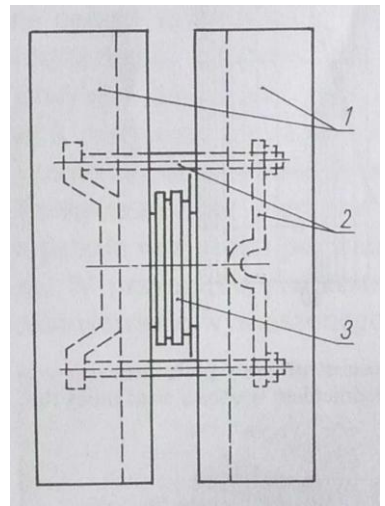
Chłodzenie powietrzne

Należy zwrócić uwagę, że parametry ciepłe radiatora zależą od wartości strat mocy odprowadzanej w postaci ciepła z chłodzonego elementu. Przy większych wartościach strat mocy z uwagi na wyższą temperaturę radiatora jest szybsze unoszenie powietrza, a tym samym jest większa efektywność chłodzenia. Na rysunku a pokazano typową zależność między rezystancją cieplną radiatora a wartością mocy przez niego odprowadzonej. Również w wykresach impedancji cieplnej dla danego typu radiatora istnieje konieczność uwzględnienia wartości strat mocy, które występują w elemencie (rys.b). Jeżeli w grę wchodzi chłodzenie z ruchem wymuszonym powietrza, to należy uwzględnić wpływ prędkości ruchu powietrza, poruszanego wentylatorem, na wartość rezystancji i impedancji cieplnej, tak jak to pokazano na rys. c i d.



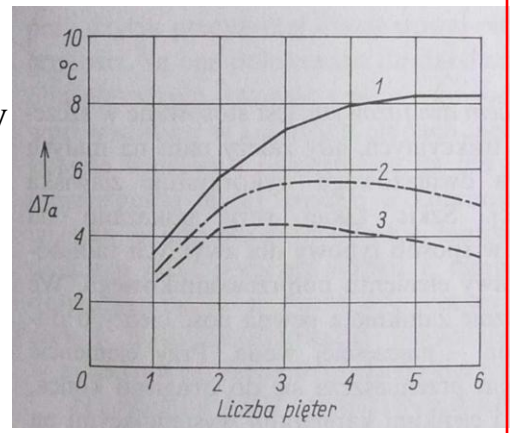
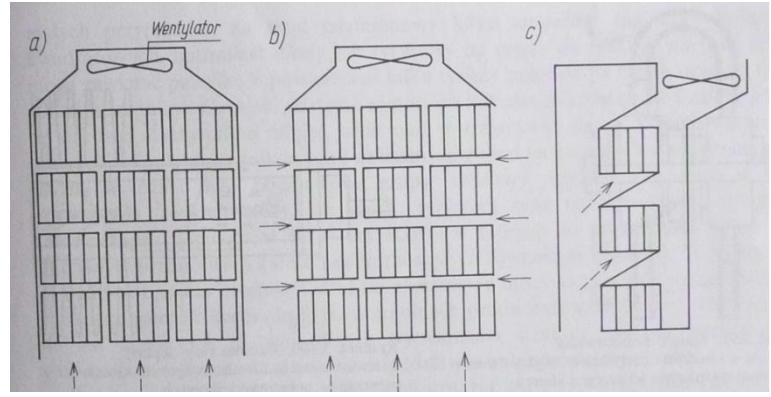
Chłodzenie powietrzne

Do chłodzenia elementów przewodzących duże prądy i związane z nimi duże wartości strat mocy stosuje się chłodzenie dwustronne pastylki krzemowej, umieszczonej w dostosowanej do tego płaskiej (pastylkowej) obudowie. Szkic takiej konstrukcji, w której dostosowane do tego radiatory są dociskane obustronnie do półprzewodnikowego elementu specjalną klamrą, przedstawiono na rysunku. Możliwe jest także zastosowanie takiej konstrukcji do jednostronnego chłodzenia elementu w obudowie pastylkowej. Parametry cieplne - rezystancje i wykresy impedancji są dla elementów pastylkowych podawane oddzielnie dla chłodzenia jedno- i dwustronnego. Sama metoda obliczeń cieplnych nie różni się od stosowanej w przypadku elementów przeznaczonych do chłodzenia jednostronnego.



W układach przekształtników zawierających większą liczbę elementów półprzewodnikowych o dużej wartości wydzielanych w nich strat istnieje problem związany z rozmieszczeniem poszczególnych radiatorów w przeznaczonych na to przestrzeni szafy lub kasety, tak by nie następowało nadmierne wzajemne podgrzewanie.

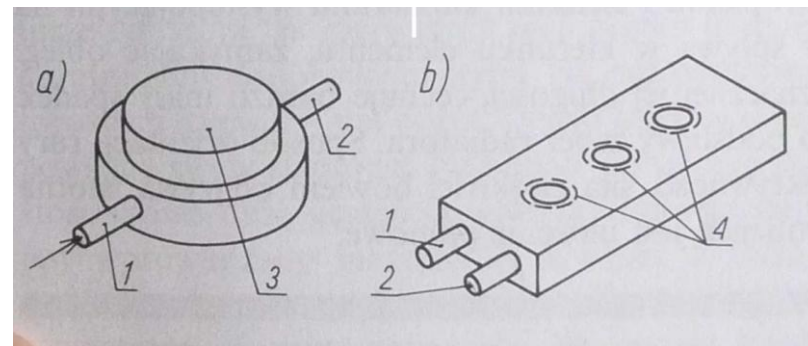
Szkic konstrukcji zawierającej ułożone piętrowo radiatorzy: a) bez dodatkowego powietrza chłodzącego; b) z dodatkowym dopływem powietrza; c) z oddzielnym dopływem powietrza dla każdego piętra



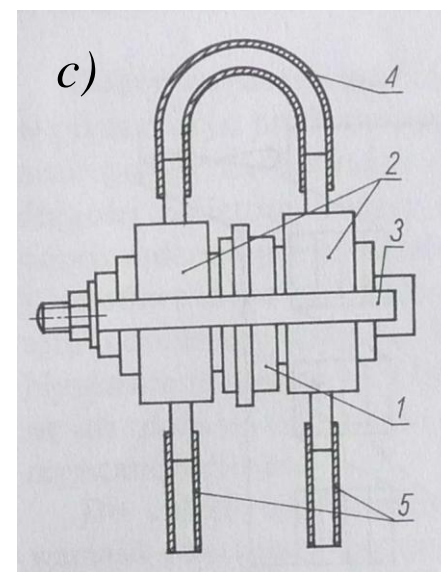
Typowa zależność przyrostu temperatury powietrza chłodzącego radiatorzy w funkcji liczby pięter. Dopływ dodatkowego powietrza w każdym z pięter: 1 - 20%, 2 - 30%, 3 - 40%

Chłodzenie cieczowe

ten sposób chłodzenia jest stosowany przy dużych mocach, i wymaganiach co do zmniejszenia objętości konstrukcji przekształtnika. Radiatory przeznaczone do chłodzenia cieczy mają postać jak na rys. a ,b . Są one wyposażone w doprowadzenie i odprowadzenie cieczy, która może przepływać przez wnętrze i szybko odprowadzać ciepło. Bardziej są rozpowszechnione rozwiązania z radiatorami dostosowanymi do elementów o obudowie pastylkowej montowane w sposób pokazany na rys.c).

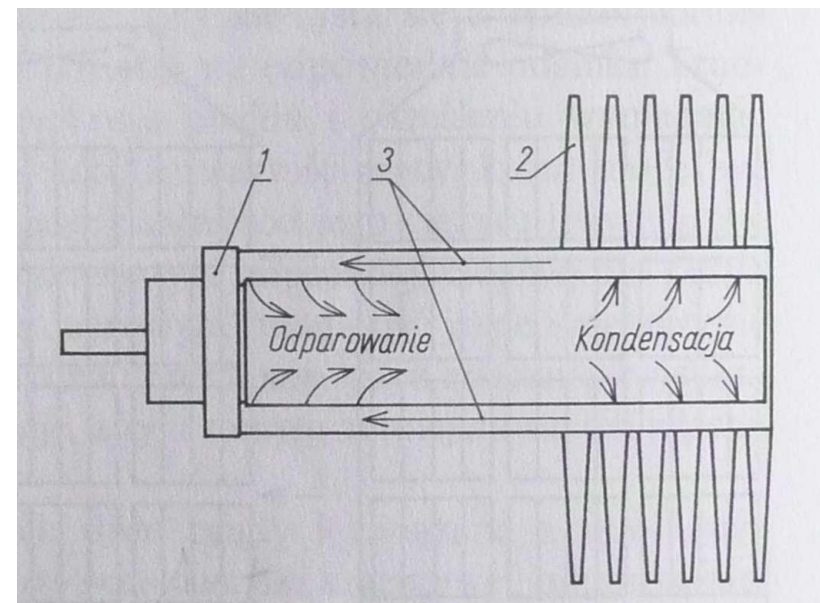


Poszczególne radiatory są łączone w zamknięty obwód hydrauliczny za pomocą przewodów plastikowych, a jako ciecz chłodzącą stosuje się najczęściej czystą wodę, która najlepiej spełnia stawiane wymagania. Ma duże ciepło właściwe, dobre przewodnictwo cieplne, małą lepkość, dobrą wytrzymałość napięciową, jest mało agresywna, nieszkodliwa dla zdrowia i - co ważne - tania. Rzadko stosowany bywa olej transformatorowy. Obieg cieczy chłodzącej jest obiegiem zamkniętym i wymuszonym przez zastosowanie specjalnej pompy, a odprowadzanie z niej ciepła odbywa się za pośrednictwem chłodnicy powietrznej lub wymiennika ciepła chłodzonego wodą bieżącą.



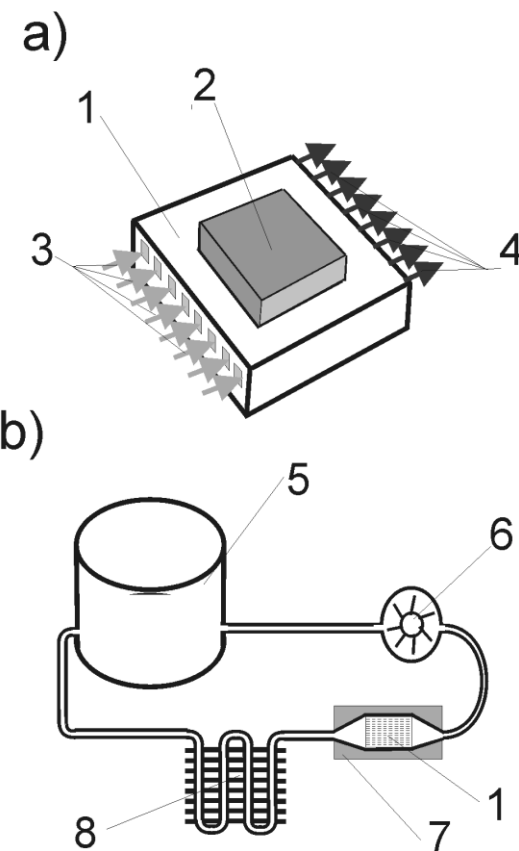
Chłodzenie dwufazowe

Chłodzenie tego rodzaju, zwane też chłodzeniem dwufazowym, jest stosowane w szczególnych przypadkach, np. w przekształtnikach trakcyjnych, gdy zależy nam na małych wymiarach urządzenia. Konstrukcja radiatora dwufazowego wykorzystuje zjawiska fizyczne powstające w tzw. rurze cieplnej. Szkic takiej rury pokazano na rysunku ; jeden z jej końców jest ożebrowany w sposób typowy dla zwykłych radiatorów, drugi zaś koniec jest dociśnięty do podstawy elementu półprzewodnikowego. We wnętrzu (po usunięciu powietrza) jest hermetycznie zamknięta pewna ilość cieczy o dużym cieple właściwym parowania i skraplania - najczęściej woda. Przy elemencie chłodzonym ciecz odparowuje i w stanie lotnym przemieszcza się do drugiego końca, gdzie w pobliżu ożebrowania ulega skropleniu i cienkimi kapilarami występującymi na obwodzie wewnętrznych ścianek rury spływa w kierunku elementu, zamykając obieg. Taką konstrukcję, nawet przy dosyć znacznej jej długości, cechuje bardzo mały spadek temperatury od podstawy elementu do podstawy żeber radiatora. Sposób orientacji rury cieplnej przy pracy wpływa na jej efektywność, siła ciężkości bowiem odgrywa istotną rolę przy transporcie płynu; najkorzystniejsze jest ułożenie pionowe. Przy zwartych konstrukcjach nowoczesnych urządzeń informatycznych rury cieplne stosowane są coraz częściej umożliwiając efektywne wyprowadzenie ciepła z gorących obszarów konstrukcji



Chłodzenie mikrokanalowe

Ten rodzaj chłodzenia to najnowsze rozwiązanie w zakresie kontrolowania temperatury dużych i wydzielających znaczne ilości ciepła przyrządów lub modułów. Istotę metody wyjaśniają szkice z rysunku. Chłodzony obiekt (przyrząd, moduł) dociśnięty jest do płytki, która pod powierzchnią zawiera gęsto ułożone mikrokanaliki tak jak to przedstawiono na rysunku a). Przepływająca przez nie ciecz efektywnie odbiera energię z podstawy chłodzonego przyrządu i pozwala na uzyskanie bardzo małych wartości rezystancji termicznej takiej chłodnicy ($< 0,05^{\circ}\text{C}/\text{W}$). Oczywiście w kompletnym systemie chłodzenia konieczna jest pompa tłocząca ciecz w obiegu zamkniętym (rys. b) analogicznie jak to ma miejsce np. w silniku spalinowym. Dla potrzeb tego rodzaju systemów poza specyficznymi mikrokanalowymi chłodnicami opracowywane są miniaturowe pompy i inne akcesoria do kompletacji tego rodzaju będących na etapie rozwoju systemów.



a) chłodnica z mikrokanalikami, b) szkic obwodu z płynem chłodzącym 1- chłodnica mikrokanalowa, 2- chłodzony obiekt, 3 - wlot cieczy 4- wylot cieczy, 5- zbiornik z cieczą, 6- mikropompa, 7- cokół (obudowa) chłodnicy mikrokanalowej 8 - chłodnica cieczy