

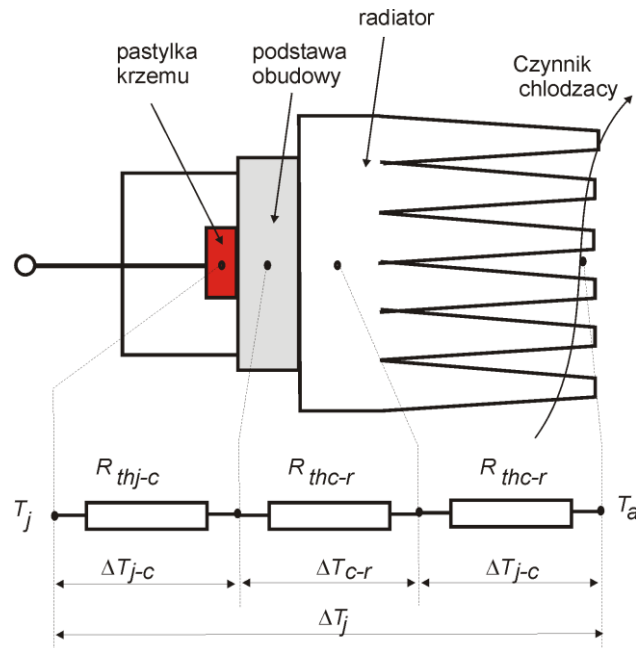
## W2. Wiadomości nt. doboru termicznego (część 1)

### Wstęp:

Zgodnie z podanym w pierwszym wykładzie stwierdzeniem, kluczowym zagadnieniem przy projektowaniu przekształtnika jest przeprowadzenie obliczeń termicznych i dokonanie na ich podstawie doboru elementów i podzespołów tak by w żadnym z tych elementów (a właściwie w ich częściach i punktach termicznie aktywnych i krytycznych) nie została przekroczona wyznaczona przez producentów maksymalna dopuszczalna temperatura. Podstawowym powodem wzrostu temperatury są straty energii i określająca je moc strat. Najbardziej krytycznymi termicznie częściami przekształtnika są półprzewodnikowe struktury złączowe (pastylki Si) w przyrządach półprzewodnikowych a to dlatego, że mimo iż maksymalne dopuszczalne temperatury ich pracy są stosunkowo wysokie ( $\sim 150\text{ C}$ ) to duża gęstość mocy strat w krzemie prowadzi do intensywnego nagrzewania. Oznacza to, że w odniesieniu do przyrządów półprzewodnikowych – łączników mocy konieczne jest bardzo precyzyjne wyznaczenie termicznych warunków pracy. Z tego powodu problematykę obliczeń i doboru termicznego odnosi się w pierwszym rzędzie do tych właśnie składników przekształtnika z uwzględnieniem sposobu i warunków odprowadzania ciepła czyli chłodzenia. Przy pełnym projekcie przekształtnika konieczne jest oczywiście uwzględnienie w analizie termicznej innych poza łącznikami elementów i zespołów jak transformatory, dławiki, kondensatory itd. których dopuszczalne temperatury są na ogół niższe niż struktur krzemowych (np. kondensatory  $\sim 80\text{ C}$ , materiały magnetyczne  $\sim 120\text{ C}$ ) ale również straty jednostkowe są w nich mniejsze niż w krzemie.

### 2.1 Opis zjawisk cieplnych w przyrządach półprzewodnikowych

Punktem wyjścia do przeprowadzenia analizy jest podany na rysunku 2.1 szkic przedstawiający przyrząd półprzewodnikowy wraz z radiatorem. Krytyczny termicznie obszar to struktura krzemowa w której temperatura  $T_j$  w czasie pracy wzrasta ponad temperaturę otoczenia pod wpływem wydzielanej energii strat charakteryzowanej przez moc strat  $P_{str}$ . Wartość temperatury  $T_j$  zależy także od właściwości termicznych i parametrów ciepłowodności czyli od efektywności odprowadzania energii – chłodzenia. Dla wyznaczania temperatury struktury i sprawdzenia w procesie projektowania czy nie przekroczy ona wartości dopuszczalnej ( $T_{jmax}$ ) należy dokładnie rozpoznać ilościowo zarówno wartość i rozkład w czasie mocy strat jak i właściwości statyczne i dynamiczne ciepłowodności.



**Rysunek 2.1.** Szkic przyrządu półprzewodnikowego z radiatorem i schemat zastępczy układu cieplnego: struktura półprzewodnikowa obudowa-radiator

### 2.1.1. Wyznaczanie mocy strat w strukturze półprzewodnikowej

Sumaryczna moc strat  $P_{str\Sigma}$  jest sumą następujących składników:

**a) Moc strat przewodnictwa  $P_C$**  – związana jest z przepływem prądu w łączniku w warunkach ustalonego stanu przewodnictwa (tzn. z wyłączeniem procesu załączania i wyłączania). Przebieg mocy  $P_C$  określa zależność ogólna:

$$P_C(t) = u_F(t)i(t) \quad (2.1)$$

Dla większości praktycznych obliczeń przy częstotliwości przewodzonych impulsów 50 Hz i więcej stosowne jest posługiwanie się uśrednioną wartością mocy strat wyznaczoną za okres impulsowania  $T_S$  zgodnie z wzorem

$$P_{C(AV)} = \frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} u_F(t)i(t)dt \quad (2.2)$$

Jeżeli napięcie na przewodzącym łączniku jest powiązane zależnością liniową odpowiadającą liniowej aproksymacji charakterystyki napięciowo-prądowej w stanie przewodzenia przez zależność:  $u_F(t) = U_{TO} + r_F i(t)$  wartość średnią mocy strat można wyliczyć z wzoru

$$P_{C(AV)} = U_{TO} I_{F(AV)} + r_F I_{F(RMS)}^2 \quad (2.3)$$

### b) Moc strat stanu blokowania i zaworowego - $P_{RD}$

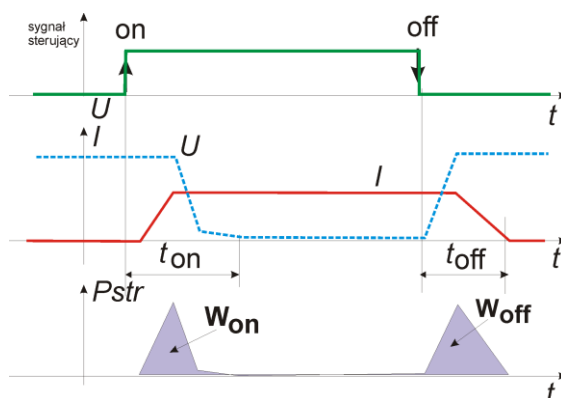
Straty te z reguły są do pominięcia gdyż ich wartość nie przekracza 1÷2 % wartości strat przewodzenia jednak w przypadku dokładnych obliczeń można je wyznaczyć przyjmując, że w stanie zaworowym i blokowania przez przyrząd przepływa stały – zgodny z katalogową wartością - prąd nasycenia złącza  $I_R \cong I_D$

$$P_{RD(AV)} = I_{RD} |U_{R,D}|_{(AV)} \quad (2.4)$$

gdzie  $|U_{R,D}|_{(AV)}$  - wartość średnia z wartości absolutnej napięcia blokowania i wstecznego

### c) Moc strat łączeniowych - $P_S$

Straty łączeniowe mogą być wyliczane na podstawie przebiegu mocy strat wyznaczonego z uwzględnieniem procesu załączania (on) i wyłączenia (off) tak jak to przedstawiono dla uproszczonego przebiegu z rys.2.2



**Rysunek 2.2.** Przebiegi napięcia i prądu podczas załączania i wyłączenia półprzewodnikowych przyrządów mocy i wyznaczana na ich podstawie energia tracona przy załączaniu ( $W_{on}$ ) i wyłączeniu ( $W_{off}$ )

W praktyce korzysta się z podanych katalogowo wartości energii traconej przy załączaniu –  $W_{on}$  i wyłączeniu  $W_{off}$  odpowiadające scałkowanym przebiegom mocy strat w przedziale odpowiadającym czasowi załączania ( $t_{on}$ ) i wyłączenia ( $t_{off}$ ) zgodnie ze wzorem:

$$W_{on} = \int_t^{t+t_{on}} u(t)i(t)dt \quad \text{oraz} \quad W_{off} = \int_t^{t+t_{off}} u(t)i(t)dt \quad (2.5 \text{ a,b})$$

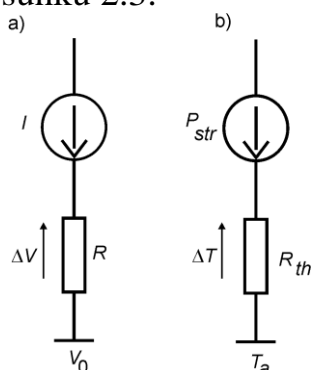
Wartości energii są odniesione do charakterystycznych zdefiniowanych katalogowo wartości napięcia i prądu przełączanego i powinny być przeliczone na wartości rzeczywiste

**d) Straty sterowania –  $P_{ctr}$**  w znacznej większości praktycznych przypadków są do pominięcia. Jedynie w przypadku łączników o dużej mocy sterowania jak duże BJT, GTO czy GCT konieczne jest uwzględnienie tego składnika. Ogólnie

straty sterowania należy w takim przypadku wyliczyć (oszacować) w sposób analogiczny do strat w obwodzie głównym (punkty a) i c) powyżej)

### 2.1.2 Obliczenia termiczne w stanie ustalonym

W obliczeniach termicznych najprostsze obliczenia umożliwiające wyznaczenie przyrostu temperatury są możliwe dla stanów ustalonych, w których przy stałej mocy strat w strukturze po czasie dostatecznie długim (zwykle kilka do kilkadziesiąt minut) nastąpi ustalenie rozkładu temperatur w ciepłowodzie. Korzysta się przy tym z analogii rezystancyjnego obwodu elektrycznego i obwodu termicznego zobrazowanej na rysunku 2.3:



**Rysunek 2.3.** Schematy przedstawiające analogię obwodu elektrycznego (a) i cieplnego (b) w stanie ustalonym:  $I$  - źródło prądu,  $P_{str}$  - źródło ciepła (strat mocy),  $R$  - rezystancja elektryczna,  $R_{th}$  - rezystancja cieplna.  $V_0$  - potencjał odniesienia,  $T_a$  - temperatura otoczenia.  $\Delta V$  - różnica potencjałów elektrycznych,  $\Delta T$  - różnica temperatur

Odpowiednia zależność analogiczna do prawa Ohm'a dla prądu pozwala na obliczanie przyrostu temperatury w strukturze w której wydziela się energia przy mocy strat  $P_{str}$ :

$$\Delta T_j = P_{str} R_{th\Sigma} \quad (2.6)$$

przy czym (patrz rys. 2.1)  $R_{th\Sigma} = (R_{thj-c} + R_{thc-r} + R_{thr-a})$

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

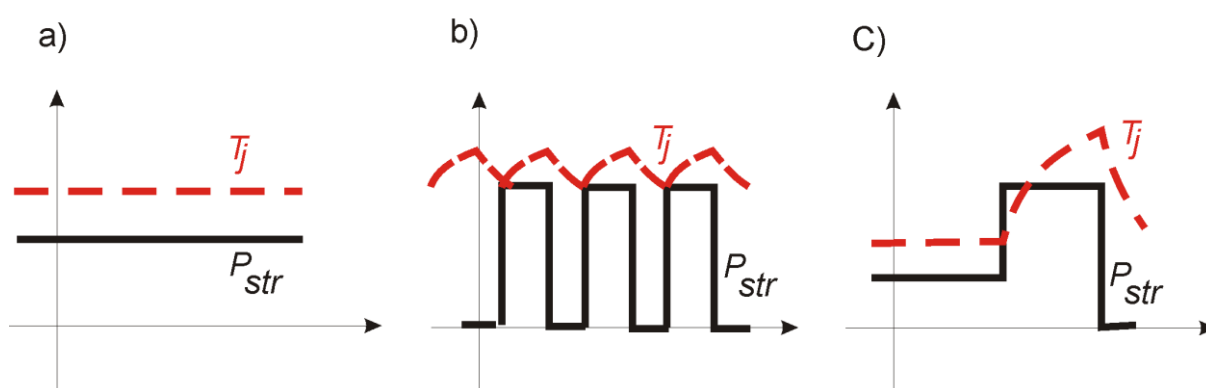
W celu zapewnienia poprawnej pracy elementu musi być spełniony warunek:

$$T_j = T_a + \Delta T_j < T_{jmax}$$

gdzie:  $T_j$  - ustalona temperatura struktury półprzewodnikowej;  $T_a$  - temperatura czynnika chłodzącego;  $T_{jmax}$  - katalogowa wartość maksymalnej temperatury struktury.

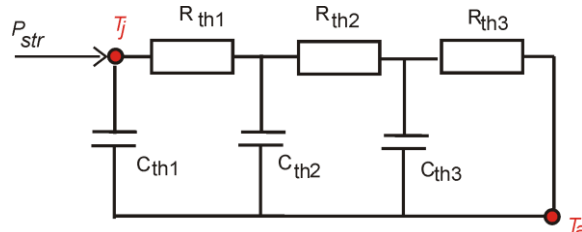
### 2.1.3 Obliczenia termiczne w stanach nieustalonych (przejściowych)

Podany model i relacje związane z ciepłym stanem ustalonym, gdy zarówno straty mocy, jak i temperatura utrzymują stałą wartość, dotyczą rzadko występującego w praktyce przypadku i na ogół nie umożliwiają dokładnego wyznaczenia rzeczywistej wartości maksymalnego przyrostu temperatury. Co najwyżej mogą posłużyć do szacunkowej oceny stanu nagrzania w szczególnych stanach pracy układu przekształtnika. W większości przypadków elementy półprzewodnikowe pracują przy zmiennym obciążeniu. Konsekwencją tego jest zmiana strat mocy w czasie i związana z nią ciągła zmiana temperatury półprzewodnika. Na rysunku 2.4 podano przykłady kilku przebiegów strat mocy wydzielanych w strukturze półprzewodnikowej wraz z naniesionymi wykresami temperatury w funkcji czasu  $T_j(t)$  przy tego rodzaju obciążeniach.



**Rysunek 2.4** Przebiegi mocy strat i temperatury przy różnych rodzajach pracy: a) praca ciągła (przewodzenie ciągłe - z zasady nie występuje w przekształtnikach); b) praca impulsowa (charakterystyczna dla przekształtników); c) praca przekształtnika ze zmiennym obciążeniem (przebieg mocy strat i przebieg temperatury, wyznaczony jako wielkość uśredniona)

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 rys. 2.5. W tym przypadku widać analogię do obwodu RC. Model według tego schematu jest oczywiście znacznie uproszczony, gdyż w rzeczywistości jest to układ o parametrach rozłożonych (tzw. człon continuum) i - z uwagi na zwykle skomplikowane kształty geometryczne elementu wraz z radiatorem - o trudnych do określenia parametrach.



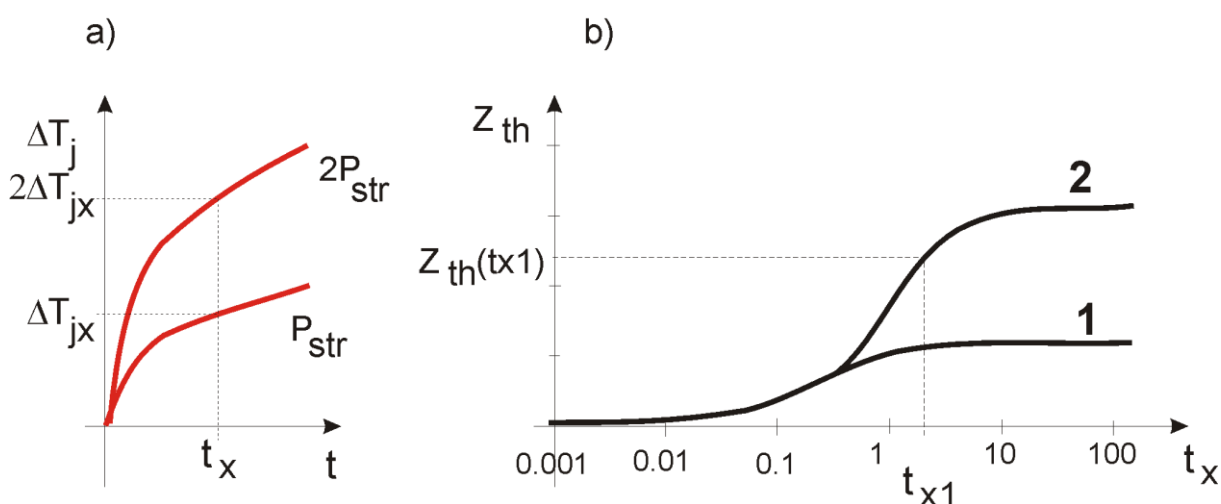
**Rysunek 2.5.** Schemat zastępczy obwodu cieplnego jako łańcuch pojemności cieplnych i rezystancji cieplnych

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 przyrostu temperatury od mocy wydzielanej w strukturze co ilustruje wykres nagrzewania przedstawiony na rys. 2.6a.

Prześciowa impedancja cieplna jest zdefiniowana jako iloraz przyrostu temperatury  $\Delta T_{j(tx)}$  i stałej mocy  $P_{strM}$  wydzielanej w półprzewodniku w przedziale czasu  $t_x$

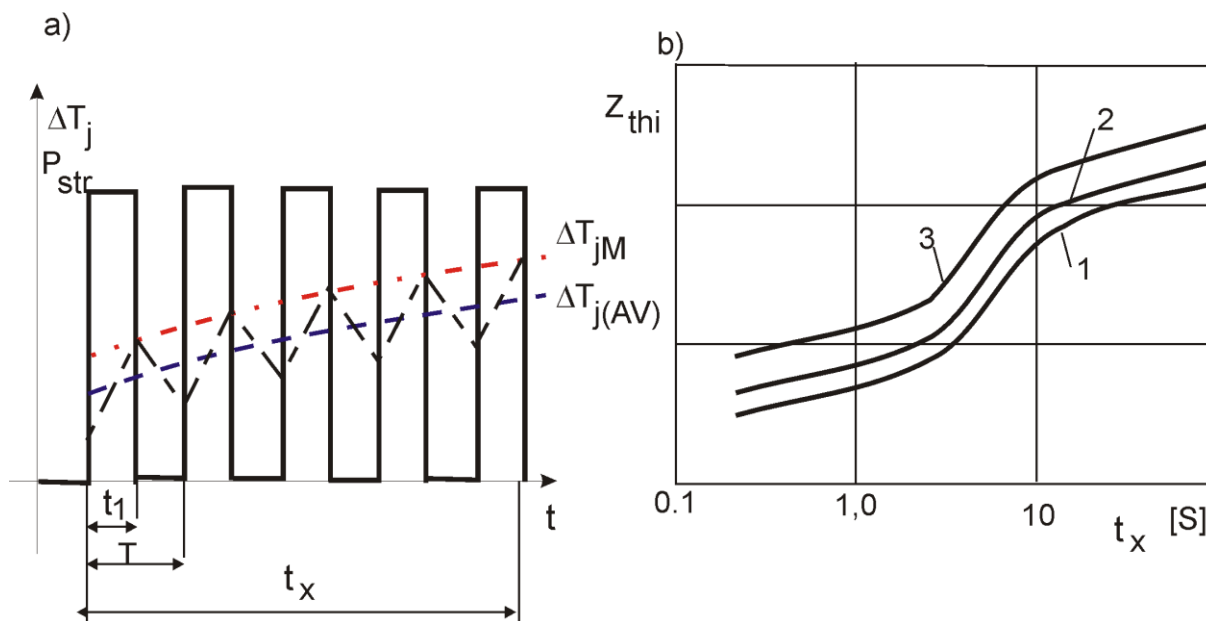
$$Z_{th(tx)} = \frac{\Delta T_{j(tx)}}{P_{str(AV)}} \quad (2.7)$$

Przykładowe charakterystyki przejściowej impedancji cieplnej, w funkcji czasu trwania impulsu strat mocy o stałej wartości przedstawiono na rys. 2.6b. 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. Często w katalogu elementów półprzewodnikowych jest określony już typ radiatora najbardziej dopasowanego do parametrów danego elementu.



**Rysunek . 2.6** Krzywe nagrzewania struktury przy różnych wartościach mocy strat –a) i charakterystyka przejściowej impedancji cieplnej - b); 1 - element półprzewodnikowy bez radiatora , 2 - z radiatorem

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 łączy elementu (np. 50 Hz). Wynikające stąd cykliczne zmiany temperatury powinny być wzięte pod uwagę,



**Rysunek.2.7.** Wyznaczanie przyrostu maksymalnej temperatury struktury półprzewodnikowej  $\Delta T_{jM}$  dla przebiegów impulsowych przy znanej wartości strat średnich (a) i przykładowy wykres impedancji cieplnej impulsowej  $Z_{th-i}$  dla przebiegu strat mocy o częstotliwości 50 Hz i różnych kształtach impulsów (1 –  $t_1/T = 0,5$ ; 2 –  $t_1/T = 0,33$  ;

Na rysunku 2.7 a 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  $P_{str(AV)} = (t_1/T) P_{strM}$ . 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

$$Z_{th-i(t_x)} = \frac{\Delta T_{jM(t_x)}}{P_{str(AV)}} \quad (2.8)$$

Wykres impedancji cieplnej impulsowej, podany przykładowo na rys. 2.7b. dotyczy zwykle czasów krótszych niż jedna sekunda. Dla przebiegów cieplnych o dłuższym czasie trwania zmiany temperatury uwzględnia się przez wprowa-

dzenie do obliczeń dodatkowej rezystancji cieplnej impulsowej  $\Delta R_{th-i}$ , zależnej od kształtu prądu przepływającego przez dany element.

Do określenia maksymalnej temperatury struktury półprzewodnikowej przy impulsowym przebiegu strat mocy w czasie należy posługiwać się następującymi wzorami:

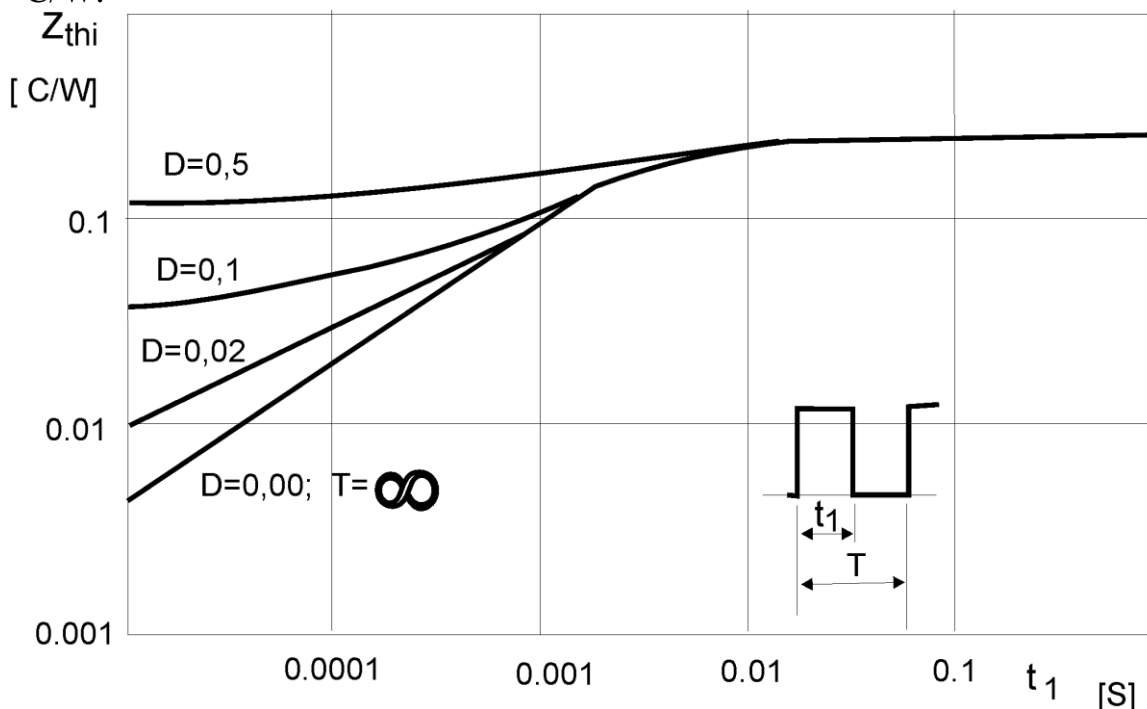
--przy czasie występowania obciążenia  $t_x < 1$  s

$$T_{jM} = P_{str(AV)} [Z_{th-i(E)} + Z_{th(RA)}]_{(t_x)} + T_a \quad (2.9)$$

--przy  $t_x > 1$  s

$$T_{jM} = P_{str(AV)} [Z_{th(E)} + Z_{th(RA)} + \Delta R_{th-i}]_{(t_x)} + T_a \quad (2.10)$$

w których:  $P_{str(AV)}$  - średnie straty mocy w elemencie przy obciążeniu impulsowym;  $T_{jM}$  - maksymalna temperatura struktury półprzewodnikowej po czasie  $t_x$ ;  $T_a$  - temperatura czynnika chłodzącego;  $Z_{th(E)}$  - impedancja cieplna tyrystora przy ciągłym impulsie strat mocy, °C/W;  $Z_{th-i(E)}$  - impedancja cieplna impulsowa elementu, °C/W;  $Z_{th(RA)}$  - impedancja cieplna radiatora, °C/W;  $\Delta R_{th-i}$  - dodatkowy przyrost rezystancji elementu spowodowany impulsowym przebiegiem strat mocy przy określonej częstotliwości i określonym wypełnieniu impulsów, °C/W.



**Rysunek 2.8** Typowa katalogowa charakterystyką impedancji termicznej dla przebiegów impulsowych

Niekiedy wykres impedancji cieplnej elementu zamieszczony w danych katalogowych ma postać jak na rys. 2.8 . Jak widać, oprócz charakterystyki impedancji dla pojedynczego impulsu strat mocy o czasie trwania  $t_2$  ( $Z_{th-C}$ ) zawiera



też charakterystyki wyznaczone dla impulsowego przebiegu strat mocy o określonym stosunku wypełnienia ( $Z_{th-i}$ ). Dodatkową rezystancję cieplną  $\Delta R_{th-i}$  przy określonej częstotliwości pracy  $f_S = 1/t_2$  można wyznaczyć z takiego wykresu na podstawie zależności

$$R_{th-i} = Z_{th-i} / D - R_{thj-c} \quad (2.11)$$

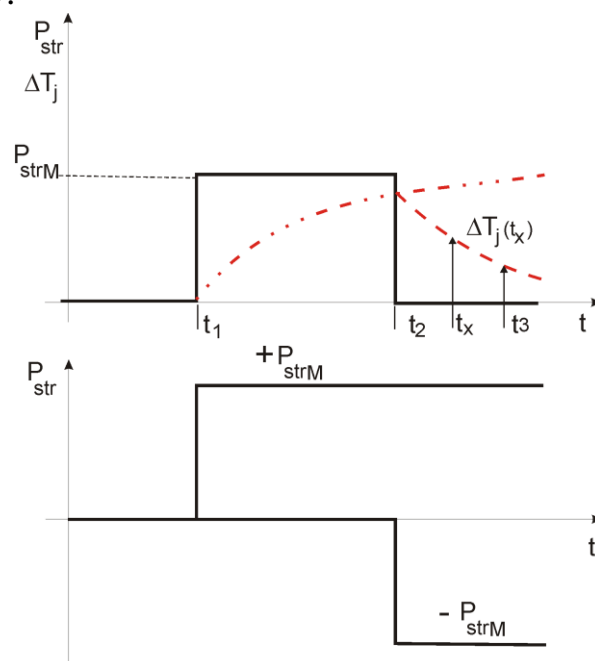
gdzie:  $Z_{th-D}$  - impedancja cieplna odczytana z krzywej dla określonego współczynnika wypełnienia  $D = t_1/t_2$  (przy czym  $t_2$  - okres występowania impulsów strat mocy);  $R_{thj-c}$  - rezystancja cieplna, równa  $Z_{thj-C}$ , dla czasu trwania strat dążącego do nieskończoności.

Ostatecznie przyrost maksymalnej temperatury po czasie  $t_x$ , dla przebiegu strat mocy, jak na rys.2.7, oblicza się ze wzoru

$$\Delta T_{jM} = P_{str(AV)} [Z_{th-C(t_x)} + R_{th-j}] \quad (2.12)$$

przy czym  $P_{str(AV)} = DP_M$  ( $P_M$  - moc strat w impulsie)

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 przykładami z rys.2.9.



**Rys.2.9.** Wyznaczanie temperatury struktury półprzewodnikowej metodą superpozycji w przypadku pojedynczego impulsu strat mocy

Na rysunku przedstawiono przypadek nagrzewania i chłodzenia struktury pod wpływem pojedynczego impulsu strat mocy. Przebieg temperatury w prze-

dziale  $t_1 \div t_2$  można wyznaczyć wprost z wykresu impedancji cieplnej  $Z_{th}(t)$  na podstawie zależności:

$$T_{j(t_x)} = T_a + P_{strM} Z_{th}(t_x - t_1) \quad (2.13)$$

Oznacza to, że temperaturę w chwili  $t_2$  określa wzór

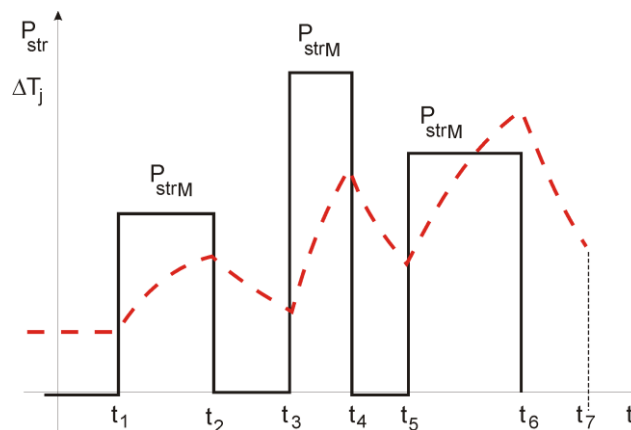
$$T_{j(t_2)} = T_a + P_{strM} Z_{th}(t_2 - t_1) \quad (2.14)$$

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  $t_2$ . A zatem, dla  $t_x > t_2$  przebieg temperatury wyznacza się ze wzoru

$$T_{j(t_x)} = T_a + P_{strM} Z_{th}(t_x - t_1) - P_{strM}(t_x - t_2) \quad (2.15)$$

a więc

$$T_{j(t_3)} = T_a + P_{strM} Z_{th}(t_3 - t_1) - P_{strM}(t_3 - t_2) \quad (2.16)$$

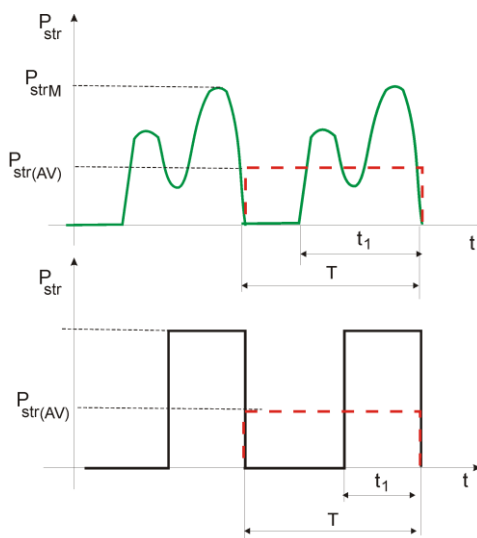


### 2.10. Wyznaczanie temperatury struktury w przypadku, gdy przebieg strat mocy ma postać ciągu impulsów prostokątnych o różnych wartościach $j$ różnych czasach trwania

W analogiczny sposób można wyznaczać przebieg temperatury struktury półprzewodnikowej przy różnych przebiegach strat mocy. Na przykład temperatura w chwili  $t_7$ , w przypadku gdy  $P_{str}(t)$  ma postać jak na rys. 2.10, jest obliczana ze wzoru

$$T_{j(t_7)} = T_a + P_{strM1} Z_{th}(t_7 - t_1) - P_{strM1} Z_{th}(t_7 - t_2) + P_{strM2} Z_{th}(t_7 - t_3) - P_{strM2} Z_{th}(t_7 - t_4) + P_{strM3} Z_{th}(t_7 - t_5) - P_{strM3} Z_{th}(t_7 - t_6)$$

Wartości  $Z_{th}$  występujące w poszczególnych czynnikach, wyznacza się z wykresu impedancji cieplnej dla wartości czasów obliczonych na podstawie wyrażeń podanych w nawiasach. Jeżeli przebieg strat mocy w poszczególnych przedziałach został uwzględniony jako wartości średnie z przebiegu impulsowego o dużej częstotliwości, to - w przypadku składników ze znakiem dodatnim - należy dodać odpowiednią wartość dodatkowej cieplnej rezystancji impulsowej  $R_{th-i}$ .



**Rysunek 2.11.** Aproxymacja nieregularnych cyklicznych impulsów strat mocy przez ciąg impulsów prostokątnych

Czasami krzywa średnich strat mocy w elemencie ma przebieg nieregularny. I w tym przypadku można stosować metodę superpozycji posługując się charakterystykami  $Z_{th(t)}$ . Wymaga to jednak możliwie dokładnej aproksymacji krzywej rzeczywistej za pomocą prostokątów.

Jeżeli przebieg nieregularny impulsów strat mocy ma charakter cykliczny (rys, 2.11), to można go zastąpić ciągiem impulsów prostokątnych. Należy przy tym pamiętać, że wartość średnia strat mocy impulsu prostokątnego wyznaczana za okres  $T$  musi być równa wartości średniej strat mocy przebiegu nieregularnego, czyli  $\int P_{str} dt = P_{str(AV)} T$ , a wartość szczytowa prostokątnego impulsu strat mocy musi być równa wartości szczytowej strat mocy przebiegu nieregularnego, czyli  $P_{strM} t_1 = P_{str(AV)} T$ .

We wszystkich przedstawionych powyżej zależnościach i rozważaniach, oprócz odczytanych z katalogów wartości impedancji cieplnej (dla przypadku długotrwałych stałych strat mocy - rezystancji cieplnej), należy dodatkowo uwzględniać, podawaną w katalogu dla elementu, wartość rezystancji cieplnej przejścia między obudową elementu i radiatorem  $R_{thc-r}$ . Pojemność cieplna przejścia z uwagi na jego znikomą objętość jest pomijana.