

W4. Dokładne obliczanie mocy strat w IGBT z uwzględnieniem specyficznych warunków pracy

A. Obliczanie mocy strat P_{str} w IGBT dla przypadku prostego przekształtnika obniżającego napięcie (step-down PWM)

A1. Obliczenie maksymalnego prądu przy przewodzeniu ciągłym

Straty mocy przy tym nietypowym rodzaju pracy tranzystora jako łącznika statycznego określa zależność:

$$P_C = I_C (U_{TO} + r_{TCE} I_C) \quad (4.1)$$

gdzie U_{TO} napięcie progowe r_{TCE} – rezystancja dynamiczna aproksymacji charakterystyki

Jeżeli dopuszczalna temperatura podstawy obudowy wynosi T_C a temperatura struktury krzemowej T_{jmax} to przy rezystancji termicznej R_{thj-c} dopuszczalny przyrost temperatury

$$\Delta T_j = T_{jM} - T_C = P_C * R_{thj-c} \quad (4.2)$$

Stąd wynika jaki prąd ciągły (DC) może przewodzić tranzystor pod warunkiem że będzie dotrzymana temperatura T_C :

$$I_C = \frac{\sqrt{R_{thj-c} V_{TO}^2 + 4r_{TCE} \Delta T_j} - V_{TO}}{2\sqrt{R_{thj-c} r_{TCE}}} - \frac{V_{TO}}{2r_{TCE}} \quad (4.3)$$

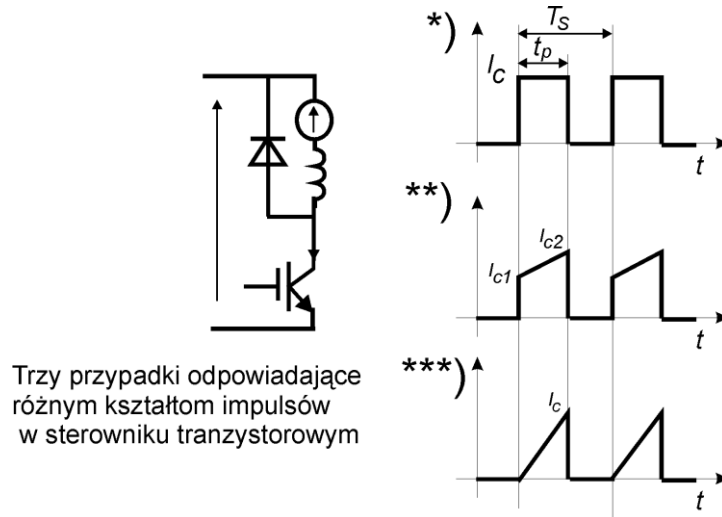
Charakterystyki napięciowo prądowe jednego typu wykazują rozrzut, który w katalogu jest uwidoczniiony jako dwie wartości napięcia nasycenia : $U_{CEsat,typ}$ i $U_{CEsat,max}$

Przy obliczeniach należy przyjmować najgorszy przypadek dla charakterystyki przewodzenia dodając do katalogowej wartości parametru UTO różnicę pomiędzy maksymalna i typową wartością napięcia nasycenia

$$U_{TOmax} = U_{TO} + (U_{CEsat,max} - U_{CEsat,typ}) \quad (4.4)$$

A2. Obliczanie strat przy normalnej pracy impulsowej przy częstotliwości łączeń -f_S:

Wyprowadzone zależności dotyczą układu i charakterystycznych przebiegów prądu jak na rysunku:



Obliczenie strat przewodzenia przy różnych kształtach impulsów prądu w tranzystorze :

*)impuls prostokątny (I_c - I_c ; t_p)

$$P_C = I_C (r_{CE(t)} * I_C + U_{TO(T)}) \quad (4.5)$$

**) impuls trapezoidalny (I_{c1} - I_{c2} , t_p)

$$P_C = \left[\frac{1}{2} r_{CE(T)} (I_{C1} + I_{C2}) + \frac{1}{3} U_{TO(T)} (I_{C1}^2 + I_{C1} I_{C2} + I_{C2}^2) \right] t_p f_s \quad (4.6)$$

***)impuls trójkątny (0 - I_c , t_p)

$$P_C = \frac{1}{6} I_C t_p f_s (2r_{CE(T)} I_C + 3U_{TO(T)}) \quad (4.7)$$

Obliczenie strat łączeniowych:

Straty te są obliczane na podstawie ogólnej zależności uwzględniającej katalogowe nominalne wartości energii traconej przy pojedynczym załączeniu – E_{on} i wyłączeniu E_{off} .

$$P_S = (E_{on} + E_{off}) f_S \quad (4.8)$$

Straty energii przy załączaniu i wyłączaniu są funkcją prądu kolektora i mogą być opisane równaniami liniowymi o współczynnikach A i B

$$E_{on} = A_{on} I_C + B_{on}; \quad (4.9 a)$$

$$E_{off} = A_{off} I_C + B_{off}; \quad (4.9 b)$$

gdzie:

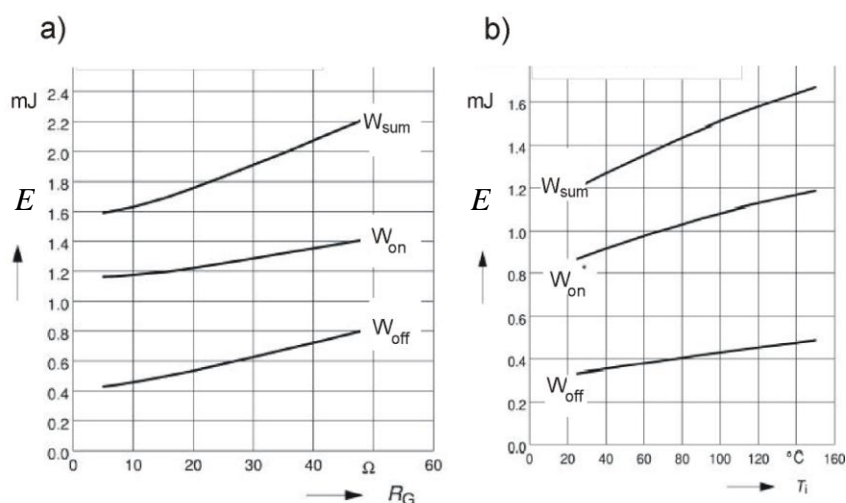
$$A_{on} = \frac{E_{on2} - E_{on1}}{I_{C2} - I_{C1}} \dots B_{on} = E_{on2} - A_{on} I_{C2}$$

$$A_{off} = \frac{E_{off2} - E_{off1}}{I_{C2} - I_{C1}} \dots B_{off} = E_{off2} - A_{off} I_{C2}$$

Straty energii W_{on} i W_{off} zależą również od wartości rezystancji bramkowej RG od napięcia roboczego (U_{don} , U_{doff}) oraz temperatury struktury złączonej T_j . Dla określenia straty w rzeczywistych warunkach należy współczynniki korygujące w poniższych wzorach wyznaczyć na podstawie odpowiednich nomogramów podanych przez producenta. (jak na przykładowych rysunkach podanych poniżej)

$$A_{onX} = A_{on} \frac{E_{on(RGR)}}{E_{on(RGK)}} \frac{U_{don}}{U_{dK}} \frac{E_{on(Tj)}}{E_{on(Tj\max)}}; \quad B_{onX} = B_{on} \frac{E_{on(RGR)}}{E_{on(RGK)}} \frac{U_{don}}{U_{dK}} \frac{E_{on(Tj)}}{E_{on(Tj\max)}} \quad (4.10ab)$$

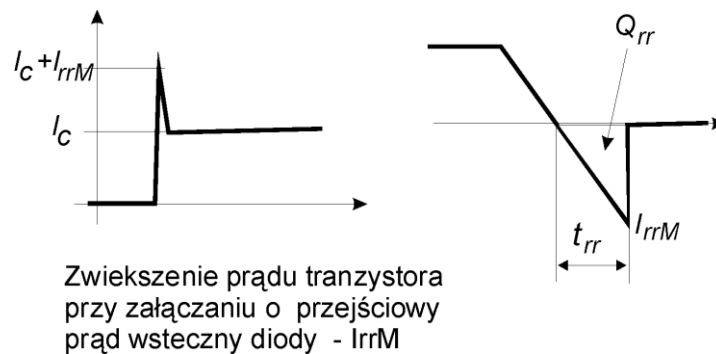
$$A_{offX} = A_{off} \frac{E_{off(RGR)}}{E_{off(RGK)}} \frac{U_{doff}}{U_{dK}} \frac{E_{off(Tj)}}{E_{off(Tj\max)}}; \quad B_{offX} = B_{off} \frac{E_{off(RGR)}}{E_{off(RGK)}} \frac{U_{doff}}{U_{dK}} \frac{E_{off(Tj)}}{E_{off(Tj\max)}} \quad (4.11 ab)$$



Obliczanie strat energii przy różnych kształtach przewodzonych impulsów:***) prostokątny (I_C - I_C ; t_p)**

$$E_{on} = A_{onX} I_C + B_{onX}$$

W przypadku strat załączania należy uwzględnić fakt, że prąd w tranzystorze narasta nie do wartości I_C ale do wartości $I_C + I_{rrM}$ przy czym I_{rrM} zależy od parametrów diody: Q_{rr} i t_{rr} zinterpretowanych jak na rysunku:



Wtedy wzór na energię załączania przyjmuje postać:

$$E_{on} = \frac{1}{2} \left[\frac{I_C + \frac{2Q_{rr}}{t_{rr}}}{\frac{di_C}{dt}} \right]^2 U_{don} + \frac{1}{6} \left[t_{rr} - \frac{2Q_{rr}}{t_{rr} \frac{di_C}{dt}} \right] \left(\frac{4Q_{rr}}{t_{rr}} + 3I_C \right) U_{don} \quad (4.12)$$

Energia wyłączenia to

$$E_{off} = A_{offX} I_C + B_{offX} \quad (4.13)$$

*****) trapezoidalny (I_{C1} - I_{C2} , t_p)**

$$E_{on} = A_{onX} I_{C1} + B_{onX} \quad (4.14)$$

Z uwzględnieniem wpływ diody współdziałającej przy załączaniu

$$E_{on} = \frac{1}{2} \left[\frac{I_{C1} + \frac{2Q_{rr}}{t_{rr}}}{\frac{di_C}{dt}} \right]^2 U_{don} + \frac{1}{6} \left[t_{rr} - \frac{2Q_{rr}}{t_{rr} \frac{di_C}{dt}} \right] \left(\frac{4Q_{rr}}{t_{rr}} + 3I_{C1} \right) U_{don} \quad (4.15)$$

$$E_{off} = A_{offX} I_{C2} + B_{offX} \quad (4.16)$$

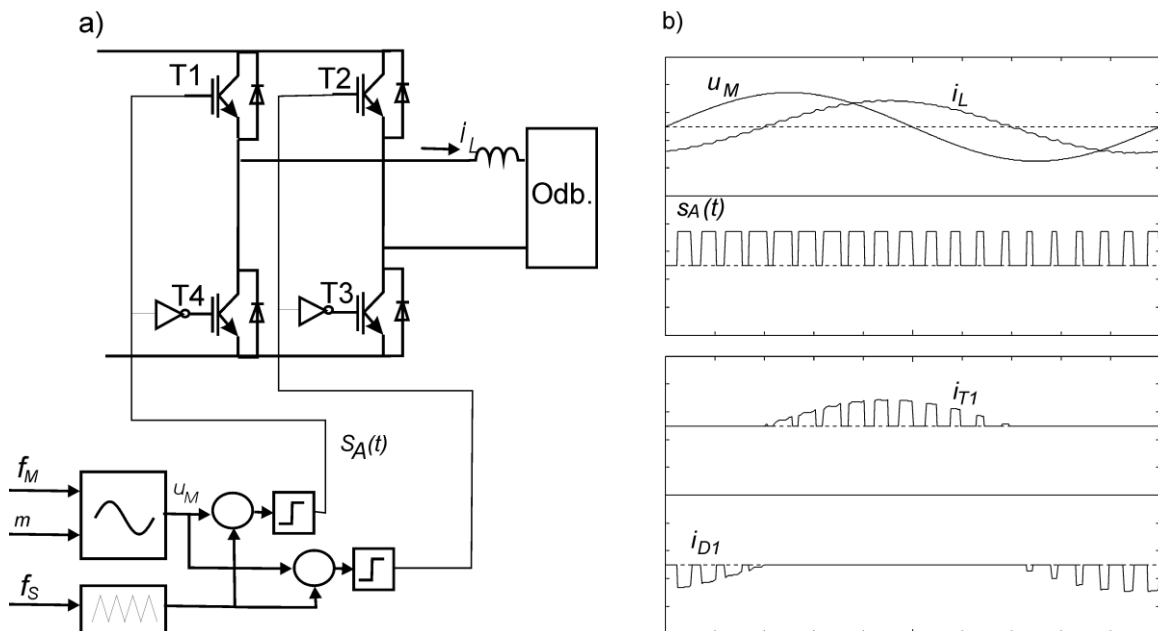
***) trójkątny (0-Ic, tp)

$$E_{on} = 0$$

$$E_{off} = A_{offX} I_C + B_{offX} \quad (4.17)$$

B. Obliczanie mocy strat P str w IGBT i diodzie gałęzi przekształtnika sterowanego wg metody sinus PWM

Obliczenia dotyczą średniej mocy strat wyznaczonej w przybliżeniu przy założeniu, że prąd odbiornika ma kształt fali sinusoidalnej o częstotliwości f_M i amplitudzie I_M a napięcie na wyjściu przekształtnika w okresie $T_M = 1/f_M$ ma postać impulsów o częstotliwości f_s utworzoną przy współczynniku głębokości modulacji m (0 – 1)



Schemat jednofazowego falownika mostkowego PWM (a) i przebiegi charakterystycznych wielkości (b).

B1. Straty w IGBT

Straty przewodzenia IGBT w postaci ogólnej mogą być wyliczone jako:

$$P_{przewIGBT} = \frac{1}{T_M} \int_0^{T_M} u_{CE}(t) i_C(t) s(t) dt \quad (4.18)$$

gdzie $s(t)$ funkcja przełączająca opisana zmienną typu logicznego (0,1)

Przyjmując, że przybliżony przebieg prądu wyjściowego z gałęzi jest opisany wzorem :

$$i(t) = I_M (\sin \omega_M t) \quad (4.19)$$

napięcie na przewodzącym tranzystorze wynika z napięcia progowego $U_{CE(th)}$ oraz rezystancji dynamicznej (r_F):

$$u_{CE}(t) = U_{CE(th)} + r_F i(t) \quad (4.20)$$

a zmienna $s(t)$ zostanie zastąpiona przez funkcję uśredniającą:

$$s_{AV}(t) = \frac{1}{2} (1 + m \sin(\omega_M t + \varphi)) \quad (4.21)$$

gdzie: φ - kąt przesunięcia pomiędzy falą prądu i podstawową harmoniczną napięcia (kąt mocy) .

Straty mocy przewodzenia w IGBT są ostatecznie określone wzorem:

$$P_{przewIGBT} = 0,5(U_{CE(th)} \frac{I_M}{\pi} + r_F \frac{I_M^2}{4}) + m \cos \varphi (U_{CE(th)} \frac{I_M}{8} + r_F \frac{I_M^2}{3\pi}) \quad (4.22)$$

Straty łączeniowe IGBT

Dla pojedynczego impulsu („on” – „off”) można w funkcji prądu i napięcia określić traconą energię na podstawie danych katalogowych

$$E_i(i) = (W_{onIGBT}(I_{CN}, U_{CEN}) + E_{offIGBT}(I_{CN}, U_{CEN})) \frac{I_C}{I_{CN}} \frac{U_{CE}}{U_{CEN}} \quad (4.23)$$

$$P_{sIGBT} = f_s \frac{1}{T_M} \int_0^{T_M/2} E_i(i, t) dt \quad (4.24)$$

$$P_{sIGBT} = f_s \frac{1 + \cos \varphi}{2\pi} ((E_{onIGBT}(I_{CN}, U_{CEN}) + E_{offIGBT}(I_{CN}, U_{CEN})) \frac{I_M}{I_{CN}} \frac{U_{CE}}{U_{CEN}}) \quad (4.25)$$

B2. Straty w diodzie zwrotnej

Straty przewodzenia oblicza się podobnie jak w tranzystorze

$$P_{przewDIODY} = 0,5(U_{CE(th)} \frac{I_M}{\pi} + r_F \frac{I_M^2}{4}) - m \cos \varphi (U_{CE(th)} \frac{I_M}{8} + r_F \frac{I_M^2}{3\pi}) \quad (4.26)$$

Straty łączeniowe obliczane z założeniem że straty załączania są pomijalnie małe

$$P_{sIGBT} = f_s \frac{1 + \cos \varphi}{2\pi} \left[E_{offD}(I_{CN}, U_{CEN}, \frac{I_M}{I_{CN}}) \right] \frac{U_{CE}}{U_{CEN}} \quad (4.27)$$

E_{offD} wyliczane jest nie jako liniowa funkcja prądu ale z uwzględnieniem wzoru empirycznego. Oznacza to, że wyrażenie w nawiasie jest zastąpione przez wzór

$$E_{offD} = E_{recD}(I_{DN}) (0,45 \frac{I_M}{I_{CN}} + 0,55) \quad (4.28)$$

gdzie E_{recD} – energia tracona przy wyłączaniu diody dla nominalnego prądu (parametr katalogowy)