

Praca dwustanowa półprzewodnikowych elementów mocy – straty statyczne i dynamiczne.

Tranzystory mocy w układach energoelektronicznych

Tranzystory mocy pracują w układach falowników i przerywaczy prądu stałego dwustanowo, współpracują one z urządzeniami o mocy do 1500 kVA, a częstotliwość ich przełączania osiąga wartość $20 \div 50$ kHz. Na przykładzie tranzystora bipolarnego omówiono przebieg strat statycznych i dynamicznych (przełączania) w układach energoelektronicznych.

Straty tranzystorów mocy pracujących dwustanowo

W elementach półprzewodnikowych podczas pracy występują straty mocy czynnej które powodują grzanie się struktury półprzewodnikowej, co może spowodować trwałe uszkodzenie elementów w skutek nieodpowiednich warunków termicznych pracy. W warunkach ustalonej wymiany cieplnej w układach tranzystorów mocy ilość energii cieplnej wydzielonej w strukturze półprzewodnika jest równa ilości tej energii odprowadzanej do czynnika chłodzącego.

Moc średnia strat tranzystora PAV, pracującego w warunkach równowagi cieplnej można określić z zależności:

$$P_{AV} = \frac{V_j - V_a}{R_{thj-a}}$$

gdzie:

V_j, V_a – odpowiednio, średnia temperatura struktury półprzewodnikowej i czynnika chłodzącego,

R_{thj-a} – całkowita rezystancja cieplna drogi struktura półprzewodnika – czynnik chłodzący

Dla zapewnienia właściwych termicznych warunków pracy tranzystora należy spełnić warunek :

$$V_j \leq V_{j \max}$$

$$V_j = V_a + R_{thj-a} \cdot P_{AV}$$

gdzie:

$V_{j \max}$ – maksymalna dopuszczalna temperatura struktury półprzewodnikowej.

Wartość średnią mocy strat tranzystora w układzie impulsowym możemy określić jako:

$$P_{AV} = P_L + P_T$$

gdzie:

P_L – straty przy przełączaniu tranzystora (straty komutacyjne),

P_T – straty statyczne pracy tranzystora.

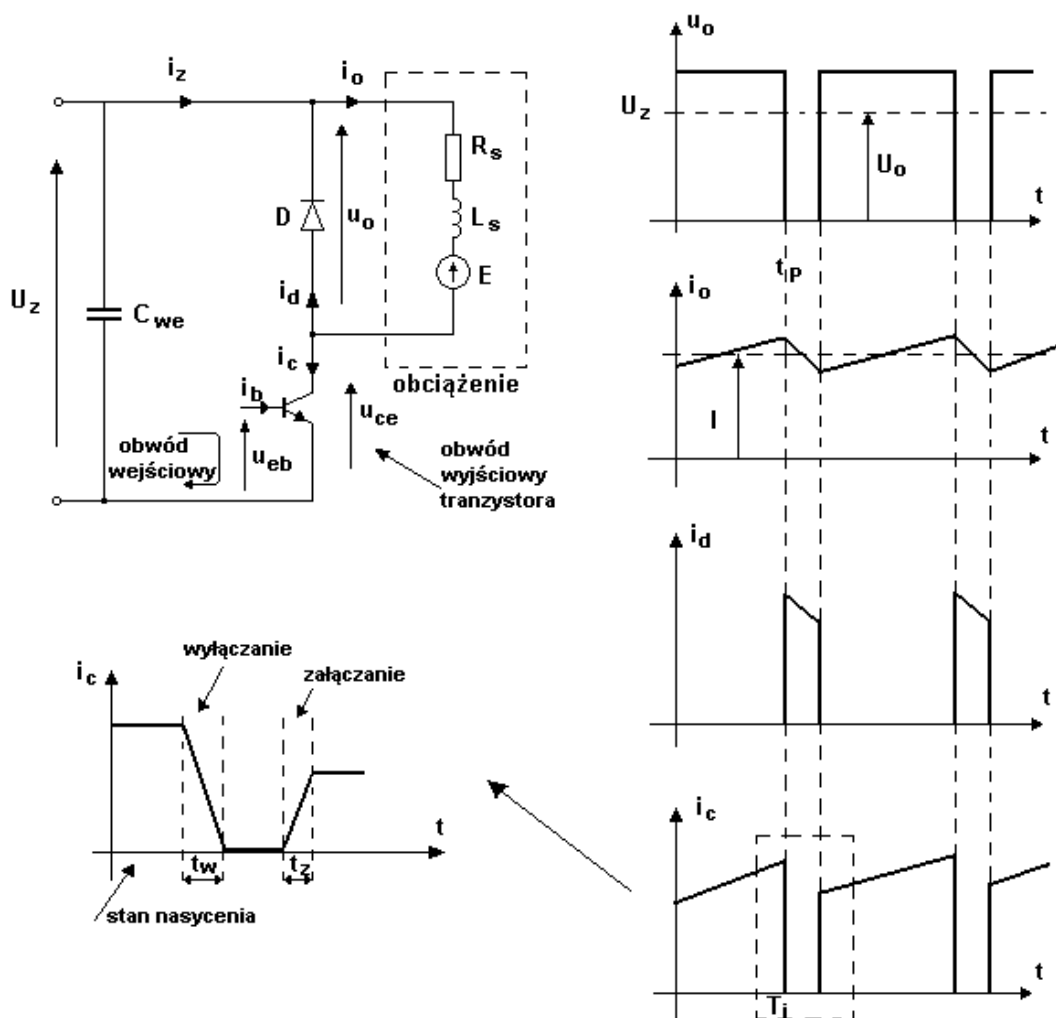
Tranzystor pełniąc rolę przerywacza prądu stałego może znajdować się w stanie nasycenia, łącznik przewodzi, lub w stanie zatkania, łącznik nie przewodzi. Tranzystor w układzie wspólnego emitera WE. Energię strat w stanie przewodzenia i nieprzewodzenia łącznika tranzystorowego określić można po wyznaczeniu okresów przewodzenia i nieprzewodzenia w czasie jednego cyklu.

$$T_i = \alpha_i \cdot T_i + [(1 - \alpha_i T_i) - (t_z + t_w)]$$

gdzie:

$t_z + t_w$ – czas komutacji tranzystora mocy .

Rys.1. Przerywacz tranzystorowy z obciążeniem indukcyjnym RLE–D



Energia strat przerywacza w czasie pracy statycznej która wynosi:

$$WE = \alpha_i \cdot T_i (P_{CZ} + P_{BZ}) + [(1 - \alpha_i) T_i - (t_z + t_w)] (P_{CW} + P_{BW})$$

gdzie:

$\alpha = t_p / T_i$ – współczynnik wypełnienia i-tego cyklu pracy łącznika,

t_p – czas przebywania łącznika w stanie przewodzenia,

T_i – czas trwania i-tego cyklu pracy łącznika,

P_{CZ} , P_{CW} – średnia moc strat obwodu kolektorowego, odpowiednio dla stanu przewodzenia i nieprzewodzenia łącznika,

P_{BZ} , P_{BW} – średnia moc strat obwodu bazy, odpowiednio dla stanu przewodzenia i nieprzewodzenia łącznika,

t_z , t_w – odpowiednio czasy załączania i wyłączania tranzystora.

Średnie moce strat można zapisać jako:

$$P_{CZ} = U_{CEsat} I_0$$

$$P_{CW} = U_Z I_{CE0}$$

$$P_{BZ} = U_{BEsat} I_B$$

$$P_{BW} = U_{EBR} I_{EBR}$$

gdzie:

$U_{CE sat}$ – napięcie nasycenia złącza kolektor - emiter,

$U_{BE sat}$ – napięcie złącza emiter - baza tranzystora w stanie nasycenia,

I_{CE0} – prąd zaporowy złącza kolektor - emiter,

U_{EBR} , I_{EBR} – napięcie złącza emiter - baza i prąd bazy w czasie wstecznej polaryzacji obwodu wejściowego tranzystora.

Straty tranzystora w stanie nieprzewodzenia prądu kolektorowego I_c są pomijalnie małe:

$$E_{Ti} = \alpha_i \cdot T_i (P_{CZ} + P_{BZ})$$

Straty przewodzenia obwodu wejściowego tranzystora PBZ są znaczne dlatego uwzględniamy je w stratach przewodzenia tranzystora mocy PT.

$$P_{Ti} = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^{i=N} \alpha_i \cdot T_i (P_{CZ} + P_{BZ})$$

gdzie:

N – ilość cykli pracy przerywacza na jednostkę czasu – T .

Dla ustalonych warunków sterowania przerywacza:

$$f_p = const$$

$$\alpha = const$$

gdzie:

f_p – częstotliwość przełączeń przerywacza, wtedy:

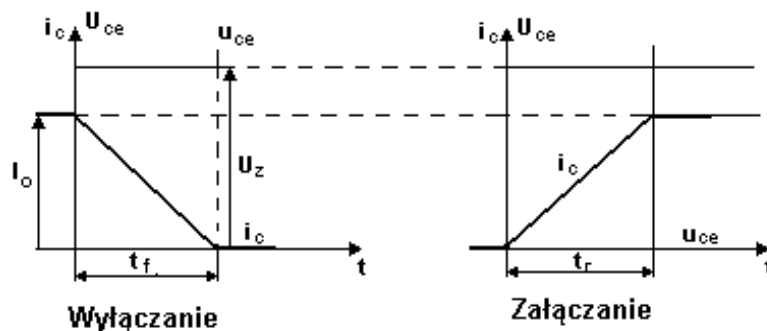
$$P_T = \alpha \cdot T_p (P_{CZ} + P_{BZ}) \cdot f_p = \alpha \cdot (P_{CZ} + P_{BZ})$$

Średnia moc strat przerywacza tranzystorowego PT jest proporcjonalna do współczynnika wypełnienia impulsu i nie zależy od częstotliwości przełączeń f_p .

Straty przełączania P_L charakteryzujące zjawisko zachodzące w czasie zmiany stanu pracy łącznika zależą od częstotliwości przełączeń f_p , sposobu sterowania obwodu wejściowego łącznika, charakteru obciążenia, prądowo–napięciowych warunków pracy oraz właściwości dynamicznych tranzystora.

Tranzystory mocy pracują w granicznych warunkach prądowo–napięciowych, dlatego współczynnik wzmocnienia prądowego–waha się od 5 do 10.

O wartości strat przełączania łącznika decyduje charakter obciążenia tranzystora w czasie przełączania.



Rys.2. Przebieg prądu kolektora i_c i napięcia kolektor–emiter u_{ce} tranzystora podczas przełączania

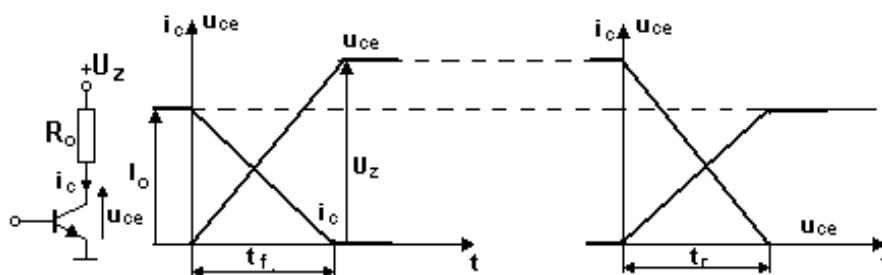
Energię strat przełączania dla obciążenia indukcyjnego E_{LL} można określić jako:

$$E_{LL} = \int_0^{t_z} u_{CE}(t) \cdot i_C(t) dt + \int_0^{t_w} u_{CE}(t) \cdot i_C(t) dt \approx \frac{1}{2} U_z I_0 (t_r + t_f)$$

a średnia moc strat przełączania łącznika obciążonego indukcyjnie wynosi:

$$P_{LL} = \frac{1}{2} U_z I_0 (t_r + t_f) f_p$$

W podany sposób wyznaczyć możemy straty przełączania łącznika z obciążeniem rezystancyjnym P_{LR} .



Rys.3. Przełączanie klucza tranzystorowego z obciążeniem rezystancyjnym R_o .

$$E_{LR} \approx \int_0^{t_r} \left(\frac{I_0}{t_r} \right) \cdot \left(-\frac{U_z}{t_r} \cdot t + U_z \right) dt + \int_0^{t_f} \left(\frac{U_z}{t_f} \right) \cdot \left(-\frac{I_0}{t_f} \cdot t + I_0 \right) dt$$

stąd:

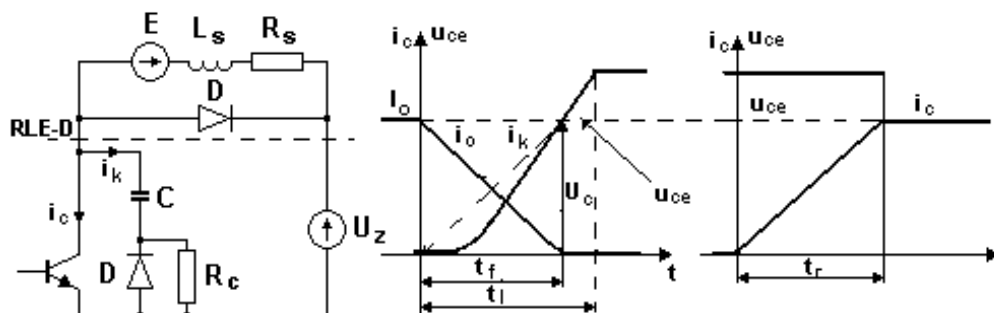
$$E_{LR} \approx \frac{1}{6} U_z I_0 (t_r + t_f)$$

$$P_{LR} \approx \frac{1}{6} U_z I_0 (t_r + t_f) f_p$$

Porównując straty przełączania łącznika przy obciążeniu indukcyjnym P_{LL} z obciążeniem rezystancyjnym P_{LR} dochodzimy do wniosku iż :

$$P_{LL} = 3P_L$$

Należy także wspomnieć iż straty przełączania występują również w przypadku włączenia elementów biernych do obwodu wyjścia tranzystora. Najczęstszym współpracującym członem obwodu wyjściowego jest obciążenie pojemnościowe RCD, gdzie odpowiednia wielkość rezystancji R_c zmniejsza wpływ prądu rozładowania kondensatora i_k na straty tranzystora w czasie załączania.



Rys.4. Przełączanie tranzystora z obciążeniem pojemnościowym RCD dla dynamicznych stanów pracy.

Przebieg prądu kolektora i_c i napięcia kolektor – emiter U_{ce} można opisać jako:

$$U_{ce} = U_c \left(\frac{t}{t_f} \right)^2$$

$$U_c = \frac{I_0 \cdot t_f}{2C}$$

$$i_c = I_0 \left(1 - \frac{t}{t_f} \right)$$

Stąd energia strat przy wyłączeniu tranzystora $E_{LCwył}$, wynosi:

$$E_{LCwy} = \int_0^{t_f} U_{ce}(t) \cdot i_c(t) dt \approx \int_0^{t_f} \frac{I_0^2 \cdot t_f}{2C} \left(1 - \frac{t}{t_f} \right) \left(\frac{t}{t_f} \right)^2 dt$$

$$E_{LCwy} = \frac{I_0^2 \cdot t_f^2}{24C} = \frac{1}{12} U_0 \cdot I_0 \cdot t_f$$

Energia strat przełączania wynosi:

$$E_{LC} = E_{LCwy} + E_{LCzal} = \frac{1}{12} U_0 \cdot I_0 \cdot T_f + \frac{1}{2} U_z \cdot I_0 \cdot t_r$$

Moc strat przełączania dla układu wynosi:

$$P_{LC} \approx \left(\frac{1}{12} U_0 \cdot t_f + \frac{1}{2} U_z t_r \right) I_0 \cdot f_p$$

Zastosowanie członu RCD zmniejsza straty wyłączenia łącznika kosztem zmniejszenia maksymalnej częstotliwości przełączania f_p , którą ogranicza stała czasowa rozładowania kondensatora $\tau = R_c \cdot C$.

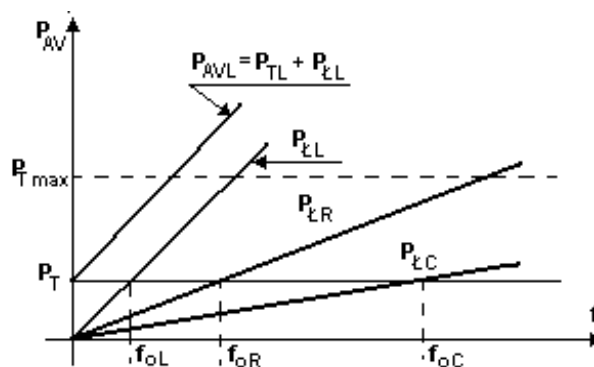
Wartość średnią mocy strat tranzystora w układzie impulsowym możemy określić jako:

$$P_{AV} = P_L + P_T$$

gdzie:

P_L – straty przy przełączaniu (komutacyjne)

P_T – straty statyczne pracy tranzystora.



Rys.5. Zależność mocy strat P_{AV} tranzystora pracującego impulsowo dla różnych obciążeń.

Dla przerywacza tranzystorowego w funkcji częstotliwości przełączania dla quasi ustalonych warunków pracy częstotliwość graniczną f_0 to wynosi:

$$f_{0L} = \frac{2P_T}{U_z \cdot I_0 (t_r + t_f)}$$

$$f_{0R} = \frac{6P_T}{U_z \cdot I_0 (t_r + t_f)}$$

przy zastosowaniu członu RCD dla obciążenia indukcyjnego:

$$f_{0C} = \frac{P_T}{I_0 \left(\frac{1}{12} U_0 \cdot t_f + \frac{1}{12} U_z \cdot t_r \right)}$$

Częstotliwość graniczną f_0 umożliwia określenie przedziału częstotliwości, dla którego istnieje konieczność uwzględnienia w ogólnym bilansie strat tranzystora, strat komutacyjnych. Skuteczną metodą obniżania wartości tych strat jest dołączenie odpowiednich sieci biernych w obwodzie wyjściowym tranzystora zmieniających charakter jego obciążenia w czasie przełączania.

Literatura

J.Szymański: „Straty tranzystorów mocy podczas pracy impulsowej” Zeszyty Naukowe – PR TK nr 5/87