

Jan WAJLER

STRATY PRZY WYŁĄCZANIU TRANZYSTORA IMPULSOWEGO
ZBLOCZNIKOWANEGO TŁUMIKIEM RC

Streszczenie. W artykule omówiono wpływ tłumika RC na kształt trajektorii wyłączenia tranzystora impulsowego pracującego przy obciążeniu o silnie indukcyjnym charakterze. Przedstawiono także zasady właściwego doboru wartości elementów tłumika ze względu na minimalizację przepięć i strat przy wyłączeniu tranzystora.

Określenie warunków pracy tranzystorów kluczujących stosowanych w impulsowych przetwornicach napięcia jest zagadnieniem niezwykle istotnym dla projektanta tych urządzeń. Prawidłowe wyznaczenie strat na przełączanie oraz określenie trajektorii przełączeń tranzystora jest z reguły podstawą poprawnej i bezawaryjnej pracy zasilacza impulsowego. Produkowane obecnie tranzystory impulsowe posiadają znacznie rozszerzone zakresy parametrów granicznych ($I_{cmax} = 10 \text{ A}$, $U_{CEmax} = 1000 \text{ V}$, $f_T = 5 \text{ MHz}$), co umożliwia budowanie zasilaczy impulsowych o mocy wyjściowej sięgającej 1 kilowata. Jednakże nawet tak zachęcające, jak przedstawione wyżej parametry, nie zwalniają projektanta od zwrócenia szczególnej uwagi na właściwe ukształtowanie trajektorii przełączeń, zminimalizowanie przepięć między kolektorem a emitern tranzystora oraz strat w zasilaczu.

Warunki pracy tranzystora kluczującego są szczególnie niekorzystne przy wyłączeniu, zwłaszcza wtedy, gdy obciążenie ma silnie indukcyjny charakter (np. impulsowa przetwornica napięcia). Przy wyłączeniu tranzystora może nastąpić przekroczenie granicznej wartości napięcia kolektor-emiter $U_{CEO(sus)}$, która jest znacznie niższa od napięcia granicznego przy zerowym prądzie kolektora U_{CEX} . Ponadto przy wyłączeniu, wskutek wystąpienia pola poprzecznego w bazie, następuje skupienie się strugł prądu na niewielkim obszarze bazy. Może to prowadzić do powstawania tzw. gorących plamek, a w konsekwencji do lokalnego przegrzania tranzystora (zjawisko wtórnego przebiccia).

Jak wynika z badań opisanych w [3], zjawisko wtórnego przebiccia występuje znacznie częściej przy wyłączeniu niż przy załączaniu tranzystora. Stąd też obszary bezpiecznej pracy (SOAR) są dla wyłączenia tranzystora znacznie mniejsze niż dla załączenia [5].

Skutecznym sposobem rozwiązania przedstawionych wyżej problemów jest włączenie między kolektor a emiter tranzystora równoległego tłumika RC. Tłumik taki w istotny sposób poprawia kształt trajektorii wyłączenia tran-

zystora, zmniejsza przepięcia i straty w tranzystorze, a w niektórych przypadkach zmniejsza również całkowite straty w układzie.

Straty mocy w tranzystorze kluczującym, wyznaczone metodą ładunkową, przedstawiono w literaturze [1]. Autor przeprowadza tam analizę układu stabilizatora impulsowego typu STSI, w którym brak tłumika RC, bocznikującego tranzystor kluczujący. W obecnie konstruowanych zasilaczach impulsowych zastosowanie tłumika RC jest niezwykle pożądane, a w niektórych przypadkach, zwłaszcza dla przetwornic pracujących przy wysokim napięciu wejściowym, jest warunkiem koniecznym poprawnej pracy układu. Z kolei w literaturze [2] przedstawione wzory na straty przy przełączaniu tranzystora odnoszą się jedynie do przypadku, w którym tranzystor zbocznikowano tłumikiem RCD (rezystor, kondensator, dioda), a ponadto w niektórych wzorach można doszukać się istotnych błędów.

Poniższy artykuł podaje kryteria prawidłowego doboru tłumika RC dla tranzystorów pracujących w impulsowych przetwornikach napięcia o schematach ideowych jak na rys. 1.

W układach tych maksymalne napięcie kolektor-emitery U_{CEmax} , jakie pojawi się podczas wyłączania tranzystora, jest ograniczone do odpowiedniej wartości V_M dzięki poziomującemu działaniu diod $D_1...D_4$.

Pierwotne uzwojenia przetwornicy z rys. 1c powinny być jednak silnie ze sobą sprzężone, co można uzyskać przy dwubobinowym nawinięciu tych uzwojeń.

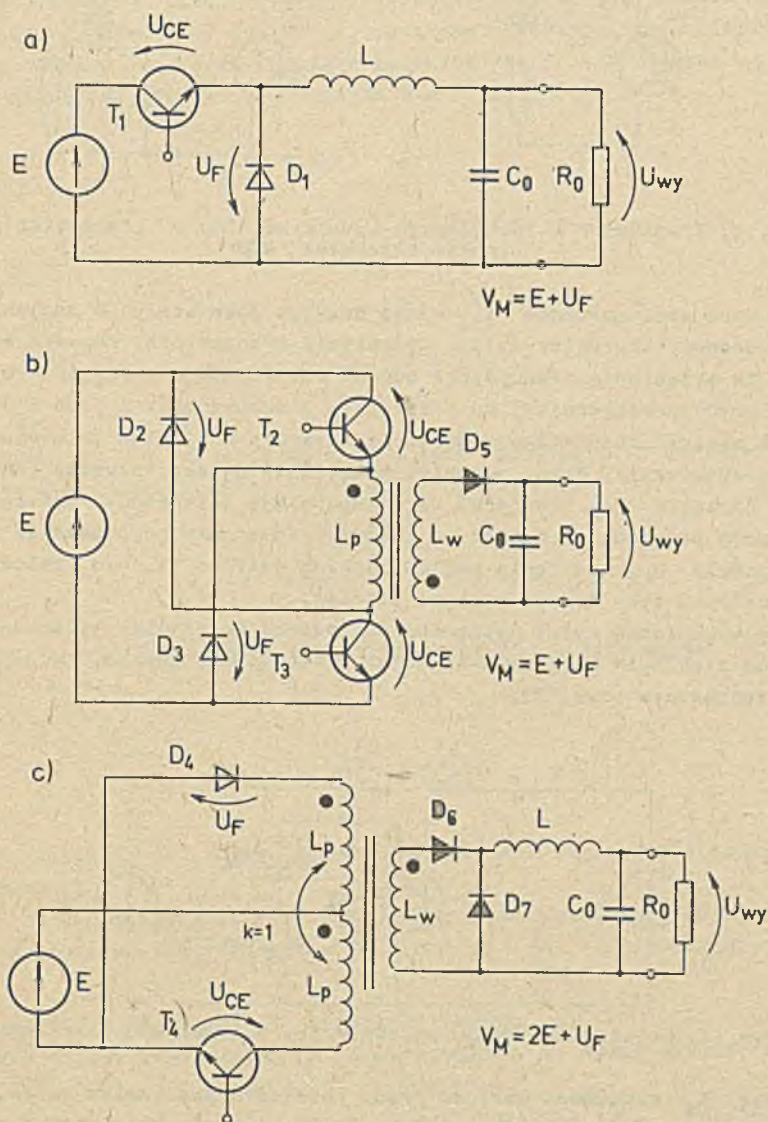
Wyłączenie tranzystorów w przedstawionych wyżej układach odbywa się dwuetapowo (pominięto wpływ czasu magazynowania t_s). Najpierw, przy stałym prądzie kolektora wymuszonym przez indukcyjność L (lub L_p), napięcie U_{CE} narasta do swej wartości maksymalnej V_M , przy której zaczynają przewodzić diody komutacyjne $D_1...D_4$.

W drugim etapie, przy stałym napięciu $U_{CE} = V_M$, prąd kolektora opada do zera. Trajektorie przy takim wyłączaniu tranzystorów przedstawiono na rys. 4d i 4h linią przerywaną.

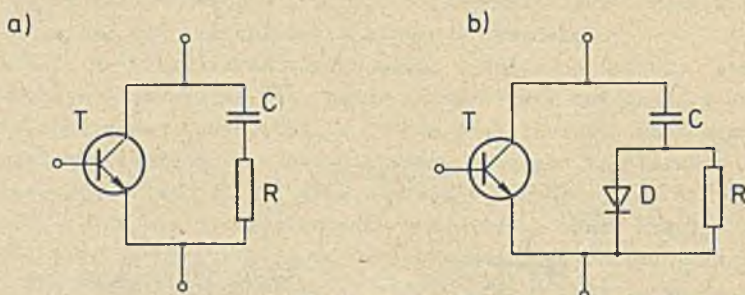
Dołączenie do każdego z tranzystorów tłumika RC lub RCD powoduje to, że przy wyłączaniu jednocześnie ze wzrostem napięcia U_{CE} zmniejszeniu ulegają prądy kolektora tranzystorów. Dzięki temu uzyskać można bardziej korzystny kształt trajektorii wyłączania.

Przykłady tłumików dołączanych do klucza tranzystorowego przedstawiono na rys. 2a i 2b. Zastosowanie diody D równolegle z oporem R zapewnia małą rezystancję dla ładowania kondensatora podczas wyłączania tranzystora. Rezystor R ogranicza udar prądowy związany z rozładowaniem pojemności przy ponownym załączeniu tranzystora.

Do analizy procesu wyłączania tranzystora założono za [2] i [4] liniowe opadanie prądu kolektorowego, co zgodne jest z obserwacjami dla większości praktycznych przypadków. Czas opadania prądu kolektora t_f zależy od temperatury, wartości maksymalnej prądu kolektora, sposobu sterowania bazy przy wyłączaniu, natomiast zmiany napięcia U_{CE} nie mają nań większego wpływu [2].



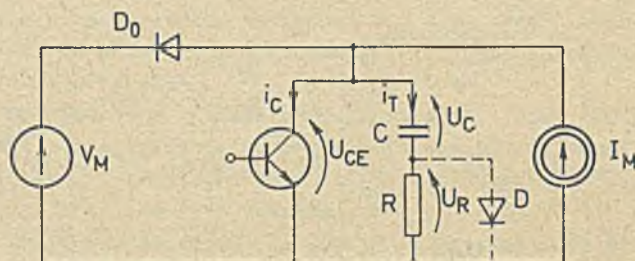
Rys. 1. Schematy idealne impulsowych przetworników napięcia i maksymalne napięcia występujące na kluczach tranzystorowych V_M



Rys. 2. a) Tranzystor z równoległym tłumikiem RC, b) tranzystor z równoległym tłumikiem RCD

Tak więc czas opadania t_f można przyjąć jako stałą (w danych warunkach) parametr charakteryzujący wyłączenie tranzystora. Ponadto można założyć, że wyłączenie tranzystora odbywa się w czasie znacznie krótszym od okresu pracy przetwornicy, co przy dużej indukcyjności L (lub L_p) pozwala przyjąć stałość sumarycznego prądu tranzystora i tłumika w ciągu całego procesu wyłączenia. Przez początek wyłączenia należy rozumieć chwilę, w której napięcie U_{CE} lub prąd i_c zaczną się zmieniać. Koniec procesu wyłączenia przypada na moment, w którym prąd tranzystora opadnie do zera lub napięcie U_{CE} osiągnie swą maksymalną wartość V_M w zależności od tego, który z tych faktów wystąpi później.

Przy spełnieniu wyżej wymienionych założeń do analizy wyłączenia tranzystorów z układów z rys. 1a-1d można posłużyć się jednym, wspólnym schematem zastępczym (rys. 3).



Rys. 3. Schemat zastępczy przetwornicy dla wyłączenia tranzystora

Przez I_M oznaczono wartość prądu kolektora pod koniec taktu, w którym tranzystor przewodził. Analizę wyłączenia tranzystora z tłumikiem RC trzeba przeprowadzić dla dwu przypadków. W pierwszym, gdy prąd kolektora opadnie wcześniej do zera niż napięcie U_{CE} osiągnie maksymalną wartość V_M , tłumik zmienia charakter obciążenia tranzystora z indukcyjnego na pojemnościowe. W takim przypadku do budowy przetwornicy można użyć tranzystorów o napięciu $U_{CE(sus)}$ mniejszym niż V_M i porównywalnym z napię-

ciem $V_O = U_{CE}(t_f)$. W drugim przypadku, gdy napięcie U_{CE} osiągnie wartość V_M zanim prąd kolektora spadnie do zera, napięcie $U_{CE(sus)}$ tranzystora musi być większe od V_M .

Oznaczmy przez τ czas, po którym napięcie U_{CE} osiąga wartość V_M . Dla pierwszego przypadku, tj. gdy $\tau > t_f$, czasowe przebiegi prądu kolektora i_C , prądu tłumika i_T oraz napięcia kolektor-emiter tranzystora U_{CE} przedstawiają wzory (1), (2) i (3), słuszne dla $0 \leq t \leq t_f$.

$$i_C(t) = I_M \left(1 - \frac{t}{t_f}\right) \quad (1)$$

$$i_T(t) = I_M \frac{t}{t_f} \quad (2)$$

$$U_{CE}(t) = \frac{I_M}{2Ct_f} t^2 + I_M R \frac{t}{t_f} \quad (3)$$

Dla czasu $t_f \leq t \leq \tau$ prąd kolektora jest równy zero, prąd tłumika I_M , zaś napięcie kolektora-emiter tranzystora opisuje wzór (4):

$$U_{CE}(t) = \frac{I_M}{2C} (2t - t_f) + I_M R \quad (4)$$

Z warunku $U_{CE}(\tau) = V_M$ można uzyskać związek (5) między czasem τ a pojemnością tłumika C .

$$C = \frac{I_M(2\tau - t_f)}{2(V_M - I_M R)} \quad (5)$$

Dla $t > \tau$ napięcie U_{CE} jest równe V_M , zaś prąd tłumika zanika wykładniczo do zera.

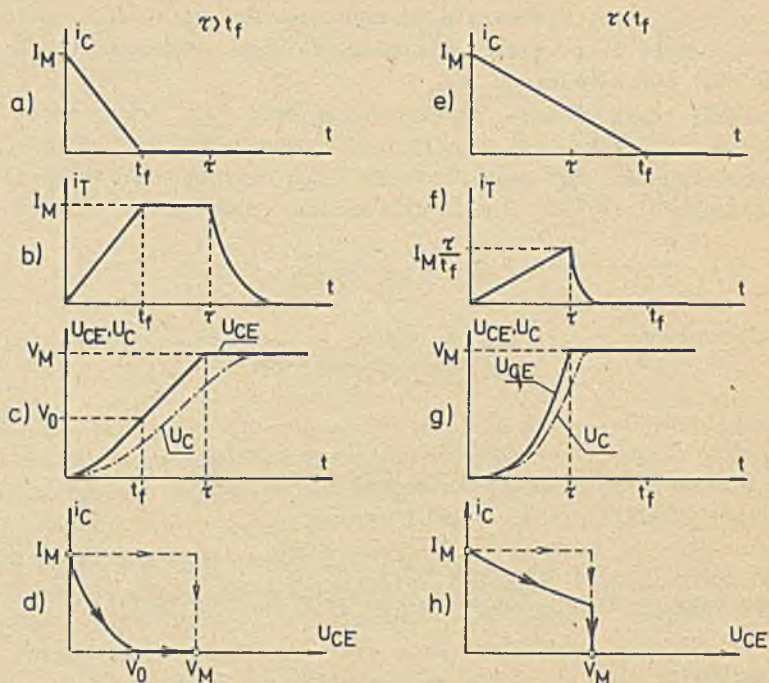
Dążąc do uogólnienia otrzymanych wzorów zdecydowano się wprowadzić do nich bezwymiarowe współrzędne $K = \frac{\tau}{t_f}$ oraz $\alpha = \frac{R}{V_M / I_M}$. α reprezentuje rezystancję R tłumika, zaś K pojemność tłumika C .

Związek między współrzędną K a pojemnością C można uzyskać z równania (5).

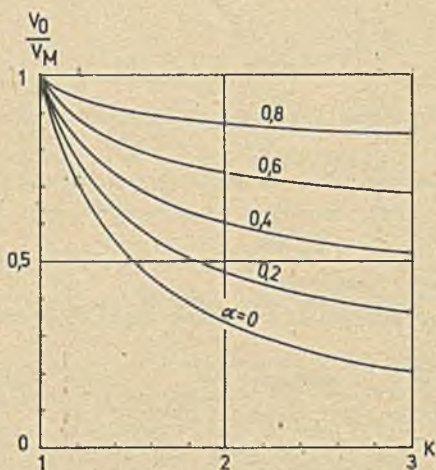
Dla przypadku, gdy $\tau > t_f$, czyli $K > 1$, napięcie U_{CE} tranzystora w chwili gdy prąd kolektorowy osiągnął zero, przedstawia poniższy wzór:

$$V_O = U_{CE}(t_f) = V_M \frac{1 + \alpha 2(K-1)}{2K-1} \quad (6)$$

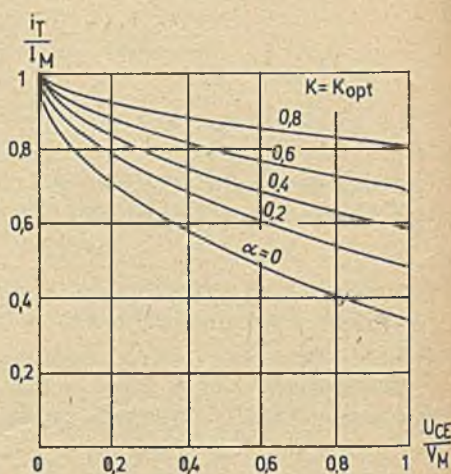
Wykres otrzymany z (6) przedstawiono na rys. 5.



Rys. 4. Przebiegi czasowe prądów i napięć oraz trajektorie wyłączania tranzystora z tłumikiem RC



Rys. 5. Napięcie $V_0 = V_{CE}(t_f)$ w funkcji bezwymiarowych parametrów tłumika RC



Rys. 6. Trajektorie zapewniające minimum strat całkowitych przy wyłączaniu tranzystora

Jak widać z wykresu, najmniejsze wartości napięcia V_0 można uzyskać przy $\alpha = 0$ (tłumik RCD), przy możliwie dużej wartości współrzędnej K , a więc dużej pojemności tłumika. Dla $\alpha > 0$ wzrost pojemności C skutecznie zmniejsza napięcie V_0 tylko przy niezbyt dużych K . Obliczmy z kolei straty W_T w tranzystorze przy wyłączaniu, przypadające na 1 cykl pracy przetwornicy.

$$W_T = \frac{I_M V_M t_f}{2} \cdot \frac{1}{6} \frac{1 + \alpha(4K-3)}{2K-1} \quad (7)$$

Chcąc określić całkowite straty w układzie na jeden cykl pracy, należy wyznaczone wyżej straty w tranzystorze powiększyć o straty w rezystancji tłumika oraz energię gromadzoną w kondensatorze C . Doliczenie energii gromadzonej w pojemności C tłumika do strat wynika z faktu, że energii tej nie można wykorzystać. Zostanie ona zamieniona na ciepło w rezystorze R przy kolejnym załączeniu tranzystora. Straty W_R w rezystancji R i energię gromadzoną w pojemności C tłumika W_C podają poniższe wzory:

$$W_R = \frac{I_M V_M t_f}{2} \cdot 2\alpha \left[K - \frac{2}{3} + \frac{\alpha}{4} \cdot \frac{2K-1}{(1-\alpha)} \right] \quad (8)$$

$$W_C = \frac{I_M V_M t_f}{2} \cdot \frac{2K-1}{2(1-\alpha)} \quad (9)$$

Dla drugiego przypadku, gdy napięcie U_{CE} tranzystora osiąga wartość maksymalną V_M , zanim prąd w tranzystorze spadnie do zera ($\tau < t_f$ czyli $K < 1$), prąd płynący przez tłumik opisują wzory (10) i (11).

$$i_T(\tau) = I_M \frac{\tau}{t_f} \quad \text{dla } 0 \leq \tau \leq t \quad (10)$$

$$i_T(\tau) = I_M \frac{\tau}{t_f} \cdot e^{-\frac{t-\tau}{RC}} \quad \text{dla } t > \tau \quad (11)$$

Dla prądu kolektorowego obowiązuje nadal równanie (1).

Straty w tranzystorze, rezystorze R i energię gromadzoną w pojemności C , przypadające na jeden cykl wyłączania, dla $K < 1$ przedstawiają wzory (12), (13) i (14)

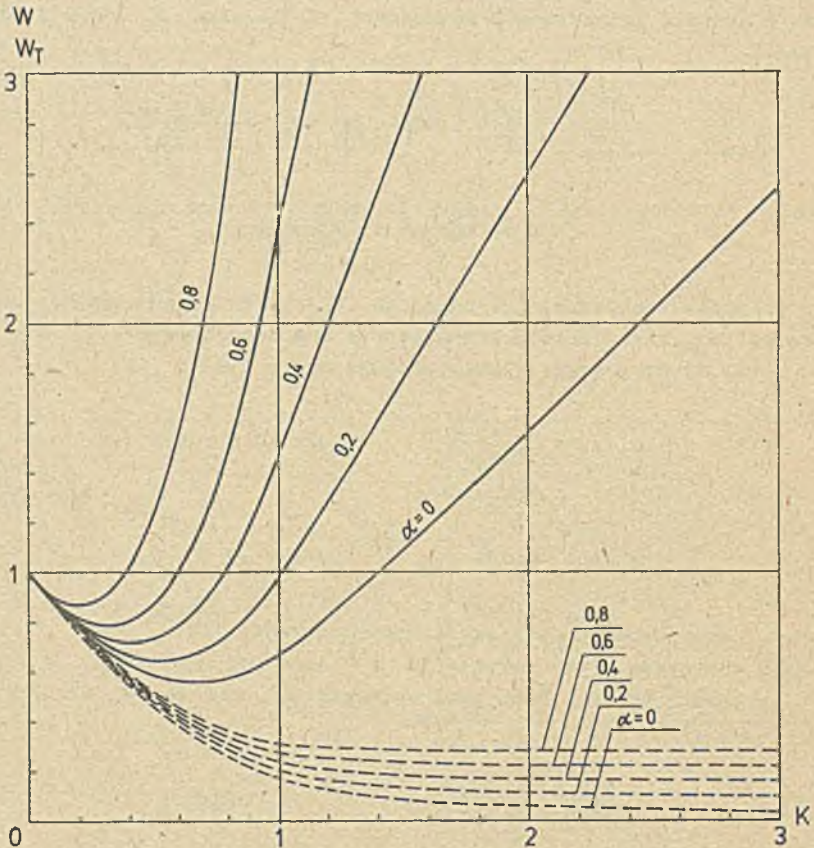
$$W_T = \frac{I_M V_M t_f}{2} \cdot \left[\frac{K^2}{2} - \frac{4}{3} K + 1 + \alpha K^2 \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{6} K \right) \right] \quad (12)$$

$$W_R = \frac{I_M V_M t_f}{2} \cdot 2\alpha \left[\frac{K^3}{3} + \frac{K^4}{4} \cdot \frac{\alpha}{1 - \alpha K} \right] \quad (13)$$

$$W_C = \frac{I_M V_M t_f}{2} \cdot \frac{K^2}{2} \cdot \frac{1}{1 - \alpha} \quad (14)$$

w podanych wyżej równaniach występują zdefiniowane wcześniej bezwymiarowe współrzędne α i K , reprezentujące odpowiednio rezystancję R i pojemność C tłumika. Jednak dla $K < 1$ związek między pojemnością C a parametrem K wyrażać będzie równanie (15).

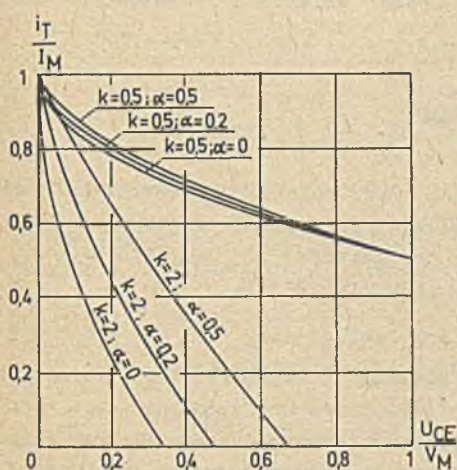
$$C = \frac{I_M t_f}{2V_M} \cdot \frac{K^2}{1 - \alpha K} \quad (15)$$



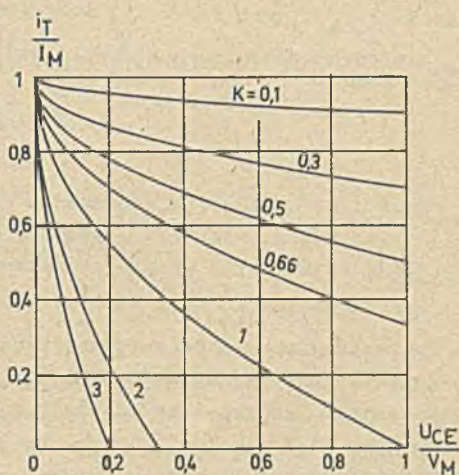
Rys. 7. Straty w tranzystorze oraz całkowite straty w układzie związane z wyłączeniem w funkcji bezwymiarowych parametrów tłumika RC

Wykresy zależności (7) i (12) (straty w tranzystorze przy wyłączeniu) przedstawiono na rys. 7 linią przerywaną. Z kolei wykresy całkowitych strat w układzie związanych z wyłączeniem W ($W = W_T + W_R + W_C$), obliczone wg wzorów (12), (13), (14) oraz (7), (8) i (9), ilustruje na rys. 7 linia ciągła.

Rysunki 6, 8 i 9 przedstawiają trajektorie wyłączenia tranzystora, wyznaczone dla różnych kombinacji parametrów K i α , reprezentujących pojemność C i rezystancję tłumika R .



Rys. 8. Wpływ rezystancji tłumika na kształt trajektorii przy wyłączeniu



Rys. 9. Wpływ pojemności tłumika RCD na kształt trajektorii przy wyłączeniu

Analiza przedstawionych wykresów pozwala sformułować następujące wnioski:

1. Wzrost pojemności C tłumika zawsze zmniejsza straty mocy w tranzystorze przy wyłączeniu.
2. Istnieje taka wartość K_{opt} (a więc i C_{opt}), przy której całkowite straty w układzie są najmniejsze (rys. 7). Trajektorie, po których odbywa się wyłączenie z minimalnymi stratami całkowitymi, odpowiadają indukcyjnemu charakterowi obciążenia (rys. 6), czyli dla tranzystora musi być spełniony warunek $U_{CEO(sus)} > V_M$.
3. Dla K bliskich lub mniejszych K_{opt} rezystancja R w nieznacznym stopniu wpływa na kształt trajektorii wyłączenia i na straty w tranzystorze i układzie.
4. Dla K znacznie większych od K_{opt} rezystancja tłumika R nieznacznie powiększa straty w tranzystorze, ale bardzo silnie zwiększa całko-

wite straty w układzie. Stąd też najkorzystniej jest w tym przypadku stosować tłumik RCD, dla którego $\alpha = 0$.

Dobierając wartość rezystancji R należy mieć na uwadze również ograniczenia związane z załączeniem tranzystora

$$R > \frac{V_M}{I_{cmax} - I_{co}} \quad (16)$$

gdzie I_{cmax} jest graniczną wartością prądu kolektora tranzystora, zaś I_{co} prądem tranzystora w chwili załączenia przy braku tłumika RC

$$R < \frac{t_{ONmin}}{4C} \quad (17)$$

Wzór (16) wynika z ograniczenia uderu prądu kolektora w chwili załączenia tranzystora, zaś (17) z warunku pełnego rozładowania pojemności C nawet przy najkrótszym czasie załączania tranzystora t_{ONmin} .

Zastosowanie tłumika RC lub RCD podyktowane jest:

- zmniejszeniem strat w tranzystorze przy wyłączeniu,
- zmniejszeniem wymaganego napięcia $U_{CE(sus)}$ tranzystora,
- zmniejszeniem strat całkowitych w układzie.

Powyższe wymagania nie mogą być spełniane jednocześnie. Gdy decydującym kryterium doboru tłumika ma być zminimalizowanie całkowitych strat w układzie przy wyłączeniu, wówczas pojemność C powinna być obliczona ze wzoru (15) przy $K = K_{opt}$, odczytanym z wykresów na rys. 7. Najmniejsze całkowite straty można uzyskać dla tłumika RCD (bo $\alpha = 0$), przy $K = 0,66$. Jednak gdy wartość R dobrana według (16) i (17) zapewni niezbyt dużą wartość α , to wówczas stosowanie tłumika RC zamiast RCD może okazać się wygodniejsze. Natomiast zmniejszenie strat w tranzystorze jednocześnie ze zmniejszeniem wymaganego napięcia $U_{CE(sus)}$ tranzystora możliwe jest dla $K > 1$. Jednak przy zbyt dużych K silnie rosną całkowite straty w układzie. Jakkolwiek znacznie korzystniej jest tracić moc związaną z wyłączeniem na rezystancji R niż w tranzystorze, powinno się dobierać taką wartość K , przy której całkowite straty nie przekraczają więcej niż 2÷3-krotnie wartości $\frac{1}{2} I_M V_M t_f$, tj. strat przy wyłączeniu w tranzystorze bez tłumika RC.

Jak już zaznaczono wcześniej, dla $K > 1$ najkorzystniej jest stosować tłumik RCD, wyznaczając pojemność C ze wzoru (5), zaś rezystancję R tak, by spełnić (16) i (17).

LITERATURA

- [1] Siurek K.: Dynamiczne straty mocy w tranzystorach przełączających zasilaczy impulsowych. Elektronika 7-8'80.
- [2] Praca zbiorowa: Power transistors in the switching mode. Sescosem Laboratories 1978.
- [3] Chabanne J.: The secondary breakdown phenomena in power transistors. EMI No 191-15.9, 1974.
- [4] Wilson T.G.: Cross regulation in an energy - storage DC-to-DC converter with two regulated outputs. Bell Laboratories, Whippany, New Jersey 1977.
- [5] Power Transistors - katalog firmy Sescosem, 1981.

Recenzent: Doc. dr M. Jastrzębska

wpłynęło do Redakcji: 1.VII.1982 r.

ПОТЕРИ МОЩНОСТИ ВО ВРЕМЯ ВКЛЮЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО
ТРАНЗИСТОРА С ЦУНТИРОВАННОГО ДЕМПФЕРОМ

Р е з ю м е

Рассматривается влияние демпфера на форму траектории выключения импульсного транзистора, работающего с нагрузкой сильно индукционного типа. Представлены принципы соответствующего выбора элементов демпфера для получения минимальных перерегулировок напряжения и потерь мощности во время выключения транзистора.

TURN OFF POWER LOSSES IN THE SWITCHING
TRANSISTOR WITH RC SNUBBER

S u m m a r y

The influence of the RC snubber circuit on the collector current-voltage switching locus during "turn off" process of the power transistor with heavy inductive load is described. The proper choice of snubber parameters ensuring the minimum turn off overshoots and power losses is also considered.