

Przetwornice impulsowe

Podstawowe konfiguracje - przetwornica przepustowa

część 5

W poprzednim odcinku zadałem pytanie, czy współczynnik wypełnienia impulsów sterujących zależy od prądu, czy od napięcia? Czy przeprowadzone rozumowanie doprowadziło do sprzeczności? Wyjaśniam tym, którzy jeszcze nie wiedzą: żadnej sprzeczności nie ma!

Rysunki 6a, b, c (w poprzednim numerze) wskazują, że przy małych prądach wypełnienie będzie zależęć od prądu obciążenia. Sytuacja taka ma miejsce, gdy w części okresu prąd spada do zera, czyli gdy cewka w części okresu jest wolna od energii (bezczylna). Można powiedzieć, że układ automatycznej regulacji (rys. 2) tak dobiera współczynnik wypełnienia, by przenieść na wyjście potrzebną moc ($U_2 \cdot I_L$).

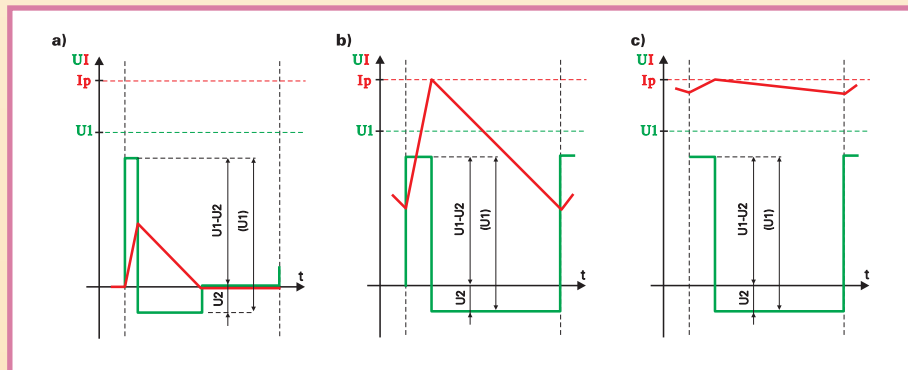
Natomiast przy większym obciążeniu, gdy przez cewkę cały czas płynie prąd (rysunki 6d, e), współczynnik wypełnienia ustala jedynie napięcie wyjściowe, a (średni) prąd rośnie lub maleje w zależności od obciążenia.

Istnieją przetwornice, które nie mają żadnej automatyki i pracują przy stałym współczynniku wypełnienia impulsów sterujących. Nie zapominaj jednak, że taka praca jest możliwa tylko przy większych prądach. Właśnie dlatego w niektórych źródłach znajdziesz wzmianki o minimalnym prądzie obciążenia (lub minimalnej indukcyjności). Nie przestrasz się tym! Chodzi o to, by prąd cewki nie malował do zera - wtedy układ zachowuje się jak "transformator prądu stałego". Gdy prąd obciążenia jest mniejszy, niedociążona przetwornica przestaje być "transformatorem prądu stałego" i napięcie wyjściowe wzrasta.

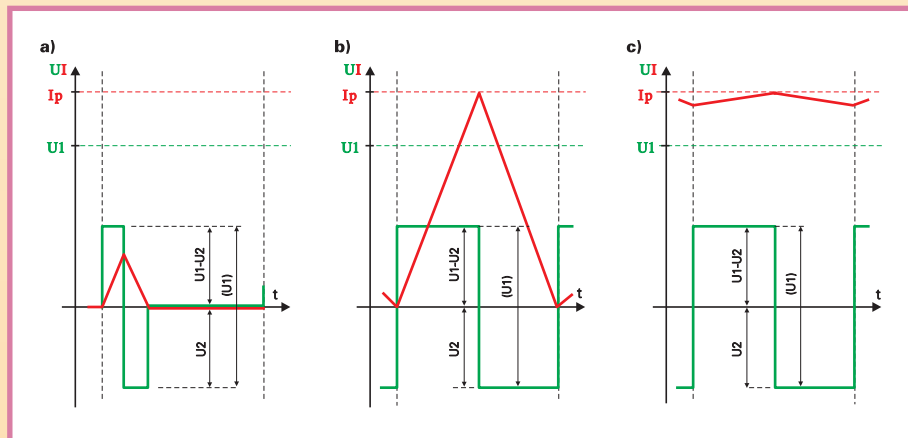
W praktyce wystarczy zastosować układ automatyki wg rysunku 2, zmieniający wypełnienie impulsów od zera do 100% i wtedy nie ma takich ograniczeń na prąd minimalny i napięcie wyjściowe.

Jeśli to zrozumiałeś, idziemy dalej.

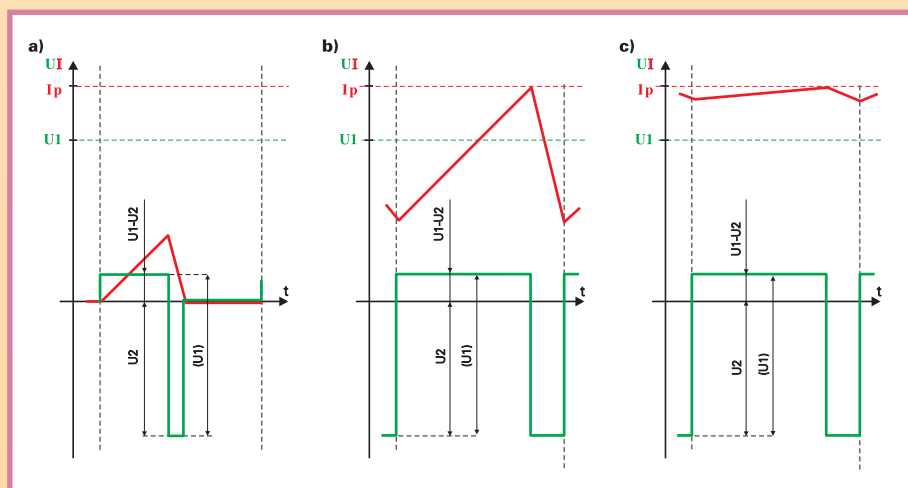
Przypuszczam, że jeszcze masz pewne wątpliwości odnośnie napięć wyjściowych. Trochę Cię niepokoi fakt, że zmiana napięcia wyjściowego U_2 zmienia też napięcie "ładowania" cewki równe



Rys. 7.



Rys. 8.



Rys. 9.

Listy od Piotra

U1-U2. Nie dziwię Ci się, że o tym myślisz. Intuicyjne przyswojenie sobie występujących tu zależności jest rzeczywiście trochę trudniejsze, ale poradzimy sobie i z tym.

Na **ryśunkach 7, 8 i 9** znajdziesz przebiegi napięcia i prądu przy różnych napięciach wyjściowych. Co istotne, w każdym przypadku napięcie wejściowe U1 jest takie samo. W sytuacji z rysunku 7 napięcie wyjściowe U2 jest pięciokrotnie mniejsze od wejściowego. W drugim przypadku (rysunek 8) napięcie U2 jest równe połowie U1, natomiast w sytuacji z rysunku 9 napięcie U2 to 5/6 napięcia wejściowego U1. Na rysunkach 7a, 8a, 9a pokazałem Ci sytuację w układzie z pewną indukcyjnością przy jakimś niewielkim prądzie. Na rysunkach 7b, 8b i 9b znajdziesz przebiegi w układzie z tą samą indukcyjnością, ale przy prądzie szczytowym zbliżonym do prądu nasycenia I_p . I wreszcie na rysunkach 7c, 8c i 9c znajdziesz przebiegi w układzie z cewką o znacznie większej indukcyjności - zauważ, że zmiany prądu są mniejsze, ale nachylenie w czasie ładowania i rozładowania nadal jest proporcjonalne do napięć ładowania (U1-U2) i rozładowania (U2).

Przeanalizuj teraz bardzo starannie rysunki 7...9. Powinny one rozjaśnić Ci całkowicie obraz sprawy.

A my zajmiemy się jeszcze jedną kwestią. Czy na podstawie rysunków 7...9 potrafisz coś powiedzieć o mocy przenoszonej (czyli po prostu o mocy naszej przetwornicy)? Czy ta moc zależy jakoś od napięcia wyjściowego?

W poprzednich listach wykazałem, że moc przetwornicy zaporowej silnie zależy od stosunku napięć wyjściowego i wejściowego. Okazało się, że przetwornicy zaporowej nie warto stosować przy małych napięciach wyjściowych. Podalem Ci wzór na teoretyczną moc maksymalną przetwornicy zaporowej (przy bardzo dużej częstotliwości)

$$P_{max} = U1 * I_p * [U2 / (U2 + U1)]$$

A jak to wygląda w przetwornicy przepustowej?

Odpowiedź znajdziesz analizując rysunki 7c, 8c i 9c. Przy dużej indukcyjności (lub dużej częstotliwości pracy) wahania prądu są minimalne - możemy je pominąć i założyć, że średni prąd na rysunkach c jest równy I_p . Skoncentruj się! Patrząc na rysunki 7c, 8c, 9c bez trudu zauważysz, że w każdym przypadku średni prąd ładowania wynosi

$$I1 = I_p (t_{on}/T)$$

W czasie ładowania cewki, do obciążenia jest już dostarczana moc

$$P1 = U2 * I1 = U2 * I_p (t_{on}/T)$$

Z kolei średni prąd rozładowania wynosi

$$I2 = I_p (t_{off}/T)$$

Czyli w fazie rozładowania do obciążenia jest dostarczana moc

$$P2 = U2 * I2 = U2 * I_p (t_{off}/T)$$

Moc całkowita

$$P = P1 + P2 = U2 * I_p [(t_{on} + t_{off}) / T]$$

$$P = U2 * I_p$$

I co, jesteś zdziwiony?

Tu również okazuje się, że czym większe napięcie wyjściowe, tym większa moc. Ponieważ w przetwornicy przepustowej napięcie wyjściowe nie może być większe od wejściowego, ostatecznie moc będzie największa, gdy napięcie wyjściowe będzie (niemal) równe wejściowemu - moc wyniesie wtedy

$$P_{max} = U1 * I_p$$

I wszystko zgadza się z intuicją: jeśli przetwornicę przepustową "otworzymy na stałe", napięcie wyjściowe będzie równe wejściowemu i rzeczywiście moc dostarczana do obciążenia będzie równa $U1 * I_p$.

A może więcej? Co nam szkodzi zwiększyć wtedy prąd powyżej I_p ? Że rdzeń się nasyci? A co nas to obchodzi - przecież tranzystor-kłucz jest na stałe otwarty!

Stop! Nie przesadzaj! W praktyce Twoja przetwornica nigdy nie będzie "na stałe otwarta", bo zechcesz pracować przy napięciach wyjściowych mniejszych niż wejściowe. Dlatego nie ma sensu rozpatrywać sytuacji, gdy tranzystor-kłucz stale przewodzi.

No tak, ale może nawet gdy $U2 < U1$ uda się coś "zarobić", zwiększając prąd powyżej I_p ? Wcześniej prosiłem, byś się zastanowił, czym to grozi. Ponieważ obciążenie R_L jest włączone w szereg z cewką, więc sytuacja jest inna niż przetwornicy zaporowej i nie można powiedzieć, że "prąd będzie się marnował".

Jednak przetwornica przestanie być przetwornicą indukcyjną według rysunku 1 czy 3b, a stanie się przetwornicą pojemnościową według rysunku 3a. Rola rezystancji ograniczającej prąd ładowania będzie pełnić (niewielka) rezystancja uzwojenia cewki, a sprawność znacznie spadnie. W skrajnym przypadku duży prąd ładowania (ograniczony niewielką rezystancją cewki) może uszkodzić tranzystor-kłucz.

Z a m y k a m y sprawę: nawet gdyby tranzystor

się nie uszkodził, także w przetwornicy przepustowej nie powinniśmy pracować przy prądach większych od prądu nasycenia cewki I_p , a moc maksymalna nie przekroczy

$$P = U2 * I_p$$

Czy jednak nie zgubiłeś się w powyższych rozważaniach? Co to za moc?

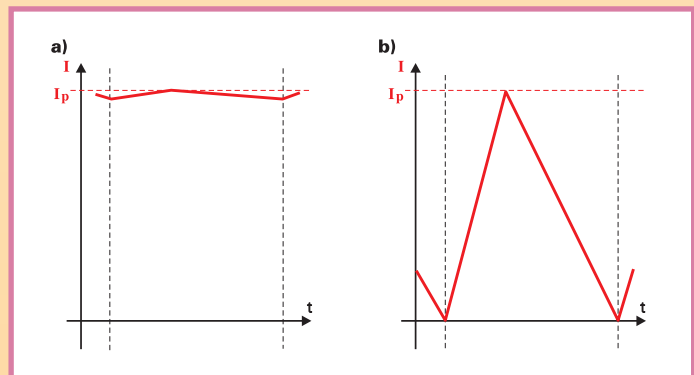
Jest to teoretyczna moc maksymalna, jaką można "wydusić" z przetwornicy przy następujących założeniach:

- pomijamy wszelkie straty (spadek napięcia na diodzie D, rezystancji cewki i napięcie nasycenia tranzystora);

- zakładamy, że średni prąd płynący przez cewkę jest równy I_p (co jest bliskie prawdy tylko przy bardzo dużej częstotliwości pracy albo przy bardzo dużej indukcyjności - przebieg prądu wygląda wtedy mniej więcej jak na rysunku 10a).

W praktyce nie zwiększamy nadmiernie indukcyjności i nie pracujemy przy bardzo dużych częstotliwościach. Wtedy oczywiście moc jest mniejsza. W granicznym przypadku, jak na rysunku 10b, gdy prąd chwilowo spada do zera, przenoszona moc jest o połowę mniejsza od wcześniej wyliczonej (i dodatkowo pomniejszona o straty w elementach przetwornicy). Patrząc na rysunek 10 nie zastanawiaj się, jakiej konkretnie częstotliwości odpowiada ta sytuacja, lub jaka jest indukcyjność (indukcyjności) - to nie ma znaczenia (podobnie, jak wartości napięć). Chodzi tylko o kształt prądu, a ściślej o jego wartość średnią - nie masz wątpliwości, że przy tej samej wartości I_p średnia wartość prądu z **rysunku 10a** jest niemal dwukrotnie większa niż tego z **rysunku 10b**.

Przypuśćmy teraz, że chcemy zbudować przetwornicę zaporową, a właściwie zasilacz impulsowy o regulowanym napięciu wyjściowym. Mając jakąś cewkę o prądzie nasycenia I_p oraz indukcyjności L musimy dobrać częstotliwość pracy tak, by w najgorszych warunkach prąd nie przekroczył warto-



Rys. 10.

ści I_p . Chyba już zauważyłeś, że prąd rośnie tym szybciej, im większe jest napięcie ładowania (równe U_1-U_2) - zobacz rysunki 4 i 7...9. Gdy napięcie wyjściowe U_2 jest bardzo małe, napięcie ładowania jest zbliżone do U_1 (rys 7). Znając I_p , L oraz U_1 możesz już obliczyć maksymalny czas włączenia tranzystora (t_{on}) przy bardzo małych napięciach wyjściowych. Przekształcając znany Ci dobrze wzór otrzymasz:

$$t_{onmax} = L * I_p / U_1$$

I co to jest za czas? Czas ten dotyczy tylko przypadku, gdy U_2 jest bliskie zeru. Sytuacja wygląda wtedy mniej więcej tak, jak na rysunku 7. Przypuśćmy, że obliczyłeś czas t_{on} . Niewiele to daje. Gdy czas t_{on} jest krótki, na pewno (bardzo) długi będzie czas t_{off} , bo napięcie U_2 jest bardzo małe. Przy większym napięciu wyjściowym U_2 (a tym samym mniejszym napięciu ładowania U_1-U_2) czas t_{on} mógłby być znacznie dłuższy, za to krótszy będzie czas t_{off} .

Aby znaleźć najgorszy przypadek należałoby napisać wzory na t_{on} i t_{off} , znaleźć wzór na T (okres), potem na

f (częstotliwość) i zbadać go w funkcji U_2/U_1 . Jeśli ktoś chce, niech to zrobi - po przekształceniach trzeba będzie zbadać funkcję

$$y = -x^2 + x$$

Okaże się, że najgorszy przypadek występuje przy $U_2 = 0,5 U_1$. Poniękad potwierdza to rysunek 8b, ale ten rysunek to żaden dowód. W każdym razie dla tego najgorszego przypadku ($U_2=0,5U_1$) minimalna częstotliwość przetwornicy wynosi

$$f_{min} = \frac{U_1}{4 L I_p}$$

Gdyby częstotliwość była mniejsza (czasy dłuższe), prąd nadmiernie wzrośnie i rdzeń cewki się nasyci.

Gdyby przetwornica miała pracować przy stałym napięciu wyjściowym U_2 , innym niż $0,5U_1$, wtedy minimalna częstotliwość mogłaby być mniejsza.

W praktyce i tak należy pracować z możliwie dużą częstotliwością (ograniczoną przez straty histerezy rdzenia i straty przełączania tranzystora), dlatego do wstępnych szacunkowych obliczeń należy wykorzystać wzór

$$f_{min} = \frac{U_1}{4 L I_p}$$

$4 L I_p$

i wybrać częstotliwość pracy większą niż tak wyliczona.

Jak wykazano wcześniej, przy częstotliwości minimalnej moc przetwornicy nie przekroczy

$$P = 0,5 U_2 * I_p$$

Oczywiście częstotliwość może, i w miarę możliwości powinna być większa - wtedy zmiany prądu będą mniejsze, przebiegi będą podobne jak na rysunkach 7c, 8c, 9c, 10a i moc przenoszona będzie o kilkadziesiąt procent większa niż przy częstotliwości minimalnej (teoretycznie $P=U_2*I_p$).

Mam nadzieję, że cały czas nadążasz za mną. Jeśli jednak masz jakiegokolwiek kłopoty ze zrozumieniem całości materiału, przeanalizuj dokładnie ten i poprzednie odcinki, a jeśli i to nie pomoże, napisz do mnie (na adres redakcji). W razie potrzeby wrócimy do tematu.

Tyle na temat przetwornicy przepustowej. W następnym odcinku zapoznam Cię z przetwornicą podwyższającą.

Piotr Górecki