

## Fundamenty Elektroniki

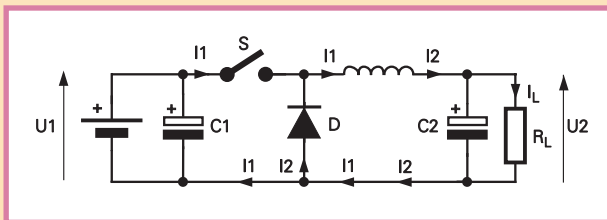
# Przetwornice impulsowe

## Podstawowe konfiguracje - przetwornica przepustowa

### część 4

W poprzednich dwóch listach zapoznałem Cię z działaniem przetwornicy zaporowej. W tym odcinku zaczynamy poznać dwa pozostałe rodzaje przetwornic indukcyjnych. Jeśli zrozumiałeś działanie przetwornicy zaporowej, nie będziesz miał problemów z przyswojeniem sobie wiadomości z tego listu.

Przetwornica przepustowa - obniżająca (z ang. forward converter, buck converter, step down switching regulator). Uproszczony schemat pokazany jest na **rysunku 1**. Jak się słusznie domyślasz, w praktyce taka przetwornica będzie dodatkowo wyposażona w obwód sterujący pracą klucza S. Podobnie jak w przetwornicy zaporowej, będzie to blok zmieniający współczynnik wypełnienia impulsów sterujących kluczem.



Rys. 1

Ten układ regulacji z reguły zawiera źródło napięcia wzorcowego i układ porównujący napięcie wyjściowe z wzorcowym. Już intuicja podpowiada, że gdy napięcie wyjściowe się zmniejszy, układ regulacji po prostu zwiększy współczynnik wypełnienia impulsów. W praktyce kluczem jest najczęściej tranzystor bipolarny PNP lub MOSFET P. Uproszczony schemat blokowy praktycznej przetwornicy przepustowej wygląda więc z grubsza tak, jak na **rysunku 2**.

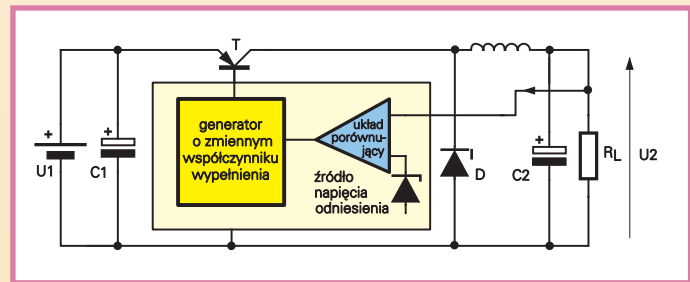
To wszystko nie powinno budzić wątpliwości.

Może nasuwa Ci się tu analogia z uśrednianiem przebiegu prostokątnego przez filtr RC. Na **rysunku 3a** znajdziesz schemat blokowy przetwornicy pojemnościowej. W niektórych źródłach natrafisz na informację, że omawiana w tym odcinku indukcyjna przetwornica przepustowa

także składa się z "siekacza" wytwarzającego przebieg prostokątny o zmiennym współczynniku wypełnienia oraz filtru uśredniającego LC (patrz **rysunek 3b**). W przypadku filtru RC z rysunku 3a wszystko jest

proste jak drut - kondensator wyjściowy ładuje się w czasie gdy klucz jest zwarty, a po jego otwarciu oddaje energię do obciążenia. Natomiast w przypadku filtru LC sytuacja jest nieco inna - zwróć uwagę, że na rysunku 3a nie ma diody D, która w przypadku przetwornicy indukcyjnej (rys. 3b) jest absolutnie niezbędna. Zarówno obecność tej diody, jak i zachowanie samej cewki powodują, że nie warto rozpatrywać przetwornicy przepustowej jako połączenia "siekacza" i filtru LC, bo może to wręcz zaciemnić, a nie rozjaśnić zagadnienie. Do tego wątku jeszcze wrócimy.

Przeanalizujmy teraz dokładniej rysunki 1 i 2. Dla ułatwienia założymy, że przetwornica pracuje i napięcie wyjściowe  $U_2$  jest już ustalone, a pojemność C2 ma bardzo dużą wartość. Przyjmij na razie bez

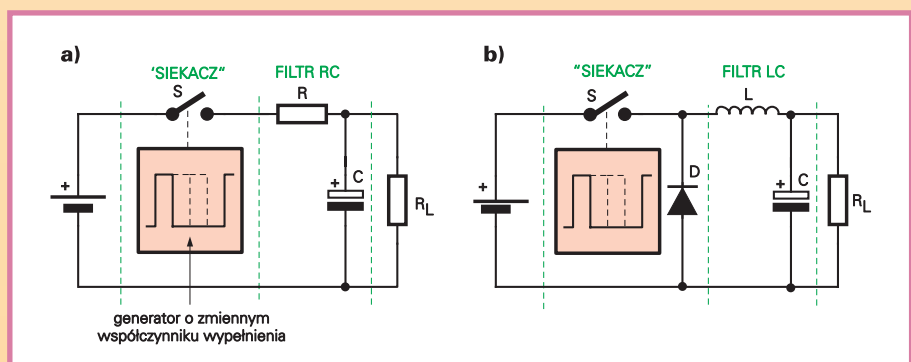


Rys. 2

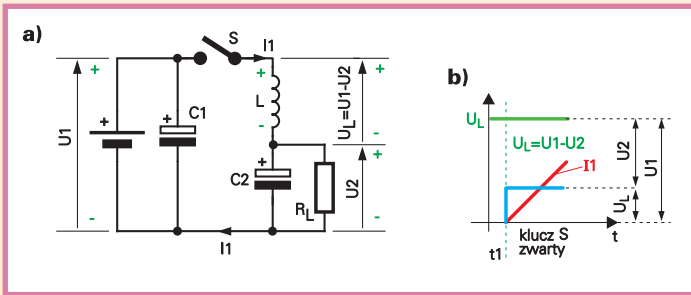
żadnego dowodu, że napięcie wyjściowe  $U_2$  jest mniejsze niż napięcie wejściowe  $U_1$ .

Znów działanie związane jest z gromadzeniem energii w cewce i przekazywaniu jej potem do obciążenia. W pierwszej fazie cyklu klucz S zostaje zwarty (w chwili  $t_1$ ), a z baterii oraz kondensatora filtrującego C1 przez indukcyjność L płynie narastający prąd  $I_1$ . **Rysunek 4** pokazuje sytuację. W dławiku zaczyna gromadzić się energia. Dla ułatwienia założyłem, iż na początku cyklu prąd w cewce był równy zero. Prąd  $I_1$  narasta z szybkością wyznaczoną... no właśnie - przez napięcie przyłożone do cewki, czyli - uważaj - przez różnicę napięć  $U_1-U_2$ .

Po pewnym czasie (w chwili  $t_2$ ) klucz zostaje rozwarty - zaczyna się druga część cyklu. Ilustruje to **rysunek 5** (porównaj też rysunek 1). W momencie rozwarcia klucza S prąd  $I_1$  na pewno przestanie płynąć. Ale jak dobrze wiesz, cewka nie znosi gwałtownych zmian prądu i reaguje na nie gwałtownymi zmianami napięcia. Wytwarzając napięcie samoinduk-



Rys. 3



Rys. 4

cji cewka niejako szuka możliwości podtrzymania przepływu prądu. Po rozwarciu przełącznika cewka staje się źródłem energii, indukuje się na niej napięcie o biegunowości przeciwnej niż poprzednio, co pozwala podtrzymać przepływ prądu przez cewkę w tym samym kierunku. Będzie to malejący prąd I2 płynący w obwodzie L, (C2, RL), D. Doceń kluczową rolę diody D - bez niej prąd nie mógłby się zamknąć w tym obwodzie.

Jakie napięcie zaindukuje się w cewce?

Zwróć baczną uwagę na napięcia oraz stromość narastania i opadania prądu, a także napięcia na rysunkach 4b i 5b. Mam nadzieję, że w poprzednich odcinkach przyswoiłeś sobie zależność między napięciem na cewce, a szybkością narastania prądu. Jest to kluczowa sprawa, dlatego muszę to przypomnieć.

Podstawowy podręcznikowy wzór to  $U = -L (di/dt)$

gdzie owo okropne  $di/dt$  wyraża po prostu chwilową szybkość zmian prądu ( $i$ ) w czasie ( $t$ ), a znak minus wskazuje biegunowość napięcia i nie jest w tej chwili istotny.

Jeśli prąd narasta lub opada liniowo czyli jednostajnie, wzór ten możemy zapisać w prostszej postaci (pomijamy znak minus):

$$U = L(\Delta I/\Delta t)$$

a w wielu wypadkach nawet jeszcze prościej:

$$U = L * I / t$$

Nie zapominaj, że napięcie  $U$  jest zawsze nierozdzielnie związane z szybkością zmian prądu ( $\Delta I/\Delta t$ ): większe napięcie - to szybsze zmiany prądu. Z kolei powolne zmiany prądu oznaczają, iż napięcie jest niewielkie.

W fazie ładowania szybkość narastania prądu jest wyznaczona przez napięcie przyłożone do cewki. W przypadku przetwornicy przepustowej napięcie na cewce podczas ładowania jest równe różnicy  $U1-U2$ .

W fazie rozładowania sytuacja jest trochę inna. Zarówno napięcie, jak i szybkość zmian (opadania) prądu w zasadzie mogą być dowolne. Tak! Może pojawić

się duże napięcie i tym samym prąd spadnie bardzo szybko, albo zaindukuje się małe napięcie i prąd będzie pomalutku zmniejszał swą wartość. Wszystko będzie

zależać od warunków w obwodzie obciążenia. W każdym razie w momencie rozwarcia klucza  $S$  zaindukuje się dokładnie takie napięcie, by podtrzymać przepływ prądu przez cewkę. W naszym układzie z rysunków 1 i 2 mamy na wyjściu kondensator o dużej pojemności, który jest dużym zbiornikiem energii i na którym już wcześniej ustaliliśmy potrzebne napięcie wyjściowe  $U2$ . Nie

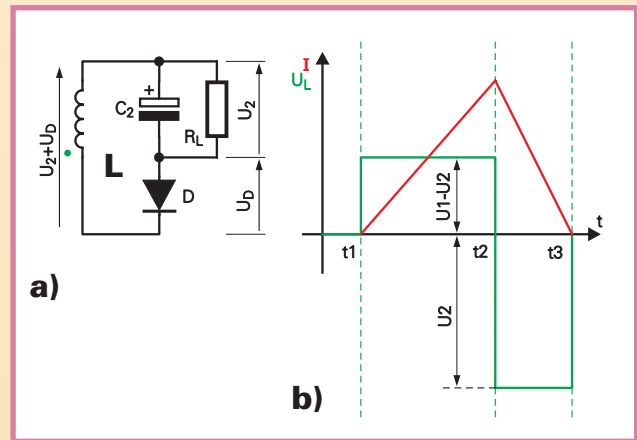
wchodząc w zbędne szczegóły można stwierdzić, że dla zachowania ciągłości przepływu prądu przez cewkę, zaindukowane napięcie będzie mieć wartość  $U2$  plus spadek napięcia na diodzie  $D$ . Właśnie tyle potrzeba do podtrzymania przepływu prądu przez cewkę. Uwaga - na rysunku 5b nie uwzględniłem spadku napięcia na diodzie - przyjąłem, że napięcie na cewce jest dokładnie równe napięciu wyjściowemu (co jest bliskie prawdy, gdy  $U2$  jest dużo większe od  $U_D$ ).

Rysunek 5b jest bardzo podobny do wcześniejszych rysunków dotyczących przetwornicy zaporowej. Nic dziwnego - ogólne zasady i związek między napięciem a szybkością zmian prądu w cewce są niezmiennie. Główna różnica w stosunku do przetwornicy zaporowej polega na tym, że teraz w fazie ładowania (czas  $t_1-t_2$ ) napięcie na cewce nie jest równe  $U1$ , tylko jest równe różnicy napięć  $U1-U2$ . Tym samym "napięcie ładowania" cewki zależy od napięcia wyjściowego. Czy wobec tego zmiany napięcia wyjściowego nie wpłyną jakoś niekorzystnie na właściwości przetwornicy? Pytanie nie jest pozbawione sensu i może Cię trochę niepokoić, ale nie przejmuj się tym - na razie uważaj ciekawą i ważną cechę przetwornicy przepustowej. Jak pokazują rysunki 1 oraz 4, w fazie ładowania prąd  $I1$  płynie ze źródła zasilania nie tylko przez cewkę  $L$ , ale jednocześnie przez obciążenie ( $C2$  oraz  $RL$ ). Stąd zresztą nazwa - przetwornica **przepustowa**. We wcześniej oma-

wianej przetwornicy zaporowej tak nie było - sprawdź w poprzednich odcinkach, że tam "ładujący" prąd  $I1$  nie płynął przez obciążenie. W przetwornicy przepustowej płynie. Czy to dobrze, czy źle?

Jak myślisz?

Słusznie! Jest to zjawisko jak najbardziej pozytywne. W znanej Ci już przetwornicy zaporowej cała energia przekazywana na wyjście musiała być w pierwszej fazie cyklu zmagazynowana w cewce, a w drugiej fazie przekazana do obciążenia. Teraz jest inaczej - część energii (mocy) przekazywana jest na wyjście od razu, niejako przy okazji przepływu prądu ładującego cewkę. W fazie rozładowania ( $t_2-t_3$ ), do obciążenia zostaje dodatkowo przekazana energia zgromadzona w cewce.



Rys. 5

Czy już "czujesz przez skórę", że przetwornica przepustowa przeniesie na wyjście moc większą niż przetwornica zaporowa z taką samą cewką? Jeśli to czujesz, to bardzo dobrze! Jeśli nie, z czasem zrozumiesz - nie będę tego teraz szczegółowo uzasadniał. Wkopalibyśmy się bowiem w zawile zależności między napięciami, czasami i częstotliwością.

Na razie wracamy do układów z rysunków 1 oraz 2. Rozważmy kilka przypadków. W każdym z nich napięcia wejściowe  $U1$  i wyjściowe  $U2$  są takie same. Zmienia się tylko rezystancja obciążenia, a tym samym potrzebna moc wyjściowa oraz prądy  $I_L$ ,  $I1$  oraz  $I2$ . Rysunek 6a pokazuje przebiegi w sytuacji, gdy obciążenie  $RL$  ma dużą oporność i potrzebny prąd obciążenia jest bardzo mały. Intuicja podpowiada, że aby przekazać niewiele energii, wystarczy otwierać tranzystor na krótki czas.

Przebiegi pokazane na rysunku 6b pokazują sytuację, gdy rezystancja  $RL$  jest mniejsza (wymagany prąd  $I_L$  większy). Układ regulacyjny zwiększa czas przewodzenia tranzystora. To też jest oczywiste.

Przy jeszcze mniejszej wartości  $R_L$  (i większym prądzie  $I_L$ ) przebiegi będą wyglądać jak na **rysunku 6c**.

Zwróć uwagę, że na rysunkach 6a, 6b i 6c szybkość narastania i opadania prądu są ściśle związane z napięciami odpowiednio  $U_L=U_1-U_2$  oraz  $U_2$ .

A co się stanie, gdy rezystancja obciążenia jeszcze się zmniejszy?

Podobnie jak w układzie przetwornicy zaporowej prąd wzrośnie i przebiegi będą wyglądać jak na **rysunku 6d**. Prąd cewki w żadnej chwili nie maleje tu do zera, a napięcia i szybkości zmian prądu są takie same jak na poprzednich rysunkach. Podobnie jest przy dalszym wzroście prądu obciążenia - porównaj **rysunek 6e**.

Oczywiście nie powinniśmy zwiększać prądu obciążenia w nieskończoność, bo w końcu przekroczymy dopuszczalną dla danej cewki wartość prądu  $I_p$ , rdzeń wejdzie w nasycenie, prąd niepotrzebnie będzie gwałtownie rósł, jak pokazuje to **rysunek 6f**. (Samodzielnie możesz się zastanowić, czym w przetwornicy przepustowej grozi, a czym nie grozi zwiększenie prądu powyżej  $I_p$  - sytuacja jest tu nieco inna niż w przetwornicy zaporowej, bo prąd ładowania cewki płynie przez obciążenie.)

No dobra, teraz idziemy dalej.

Słusznie się domyślasz, że regulację napięcia wyjściowego możemy przeprowadzać zmieniając współczynnik wypeł-

nienia impulsów sterujących otwieraniem klucza. Teraz uważaj! Czy już zauważyłeś, że przy większych prądach obciążenia (gdy chwilowa wartość prądu w cewce nigdy nie spada do zera) w zasadzie niepotrzebna byłaby żadna automatyka, i generator sterujący mógłby mieć stały współczynnik wypełnienia? Porównaj rysunki 6c, 6d i 6e.

Czy przypomniało Ci się określenie "transformator prądu stałego" z jednego z poprzednich odcinków?

Doskonale! Analogicznie jak w przetwornicy zaporowej, jeśli prąd cewki nie spada do zera, nasz układ zachowuje się jak "transformator prądu stałego" - jego "przekładnia" jest wyznaczona przez stosunek czasu  $t_{on}$  i  $t_{off}$ . Oczywiście zależność będzie trochę inna niż w przetwornicy zaporowej, bo w czasie  $t_{on}$  do cewki przyłożone jest napięcie  $U_1-U_2$ . Korzystając ze wzoru

$$U = L(\Delta I/\Delta t)$$

podstawiając i przekształcając doszlibyśmy do beznadziejnie prostej zależności:

$$U_2 = U_1 [ t_{on} / (t_{on}+t_{off}) ] = U_1 t_{on} / T$$

gdzie  $T=t_{on}+t_{off}$  to okres.

Wynik jest jak najbardziej zgodny z intuicją - czym większe ma być napięcie wyjściowe, tym większy współczynnik wypełnienia. Przy okazji potwierdza się, że zmieniając współczynnik wypełnienia możemy zmieniać napięcie wyjściowe

w zakresie od 0 do  $U_1$ . Wspaniale! Na pewno zechcesz wykorzystać taki układ w roli zasilacza o płynnie regulowanym napięciu wyjściowym. Będzie on miał ogromną przewagę nad klasycznym zasilaczem o pracy ciągłej, bo straty mocy będą małe, a sprawność znakomita (80...95%).

Zanim jednak zaczniesz projektować taki zasilacz impulsowy zastanów się, czy w dotychczasowych rozważaniach wszystko Ci pasuje...

Rozumiesz to wszystko?

A jak to jest z tym współczynnikiem wypełnienia impulsów?. Analizując rysunek 3 doszliśmy do wniosku, że będzie on zależny od prądu - czym większy prąd wyjściowy, tym większy współczynnik wypełnienia. Tak podpowiadała intuicja! Przed chwilą podałem Ci wzór wskazujący, iż współczynnik wypełnienia zależy od **napięcia**. I wygląda, że tylko od napięcia, bo we wzorze prąd nie występuje!

Jak sobie radzisz z taką sprzecznością? Jak jest naprawdę?

Znasz odpowiedź?

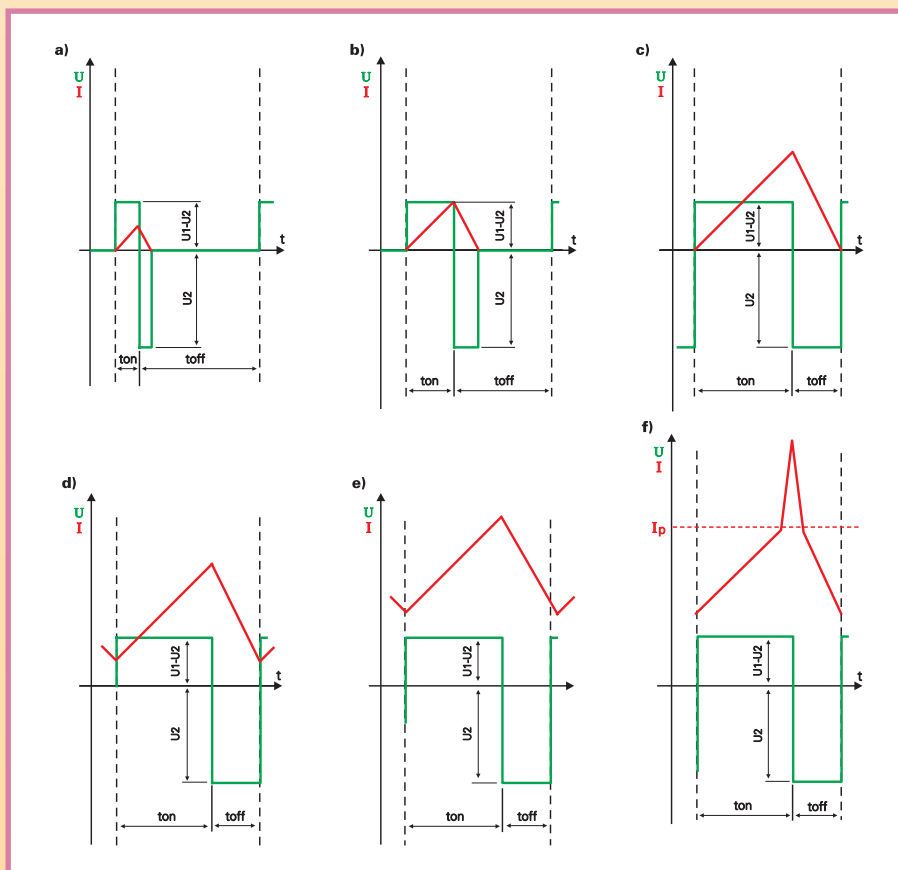
Jeśli tak, to naprawdę rozumiesz działanie przetwornic impulsowych. Gratuluję!

Ci, którzy nie wiedzą, znajdują odpowiedź w następnym odcinku: żadnej sprzeczności tu nie ma!

Rysunki 6a, b, c wskazują, że przy małych prądach wypełnienie będzie zależęć właśnie 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 (bezcynna). 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 współczynnikiem wypełnienia impulsów sterujących. Nie zapomnij 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 malał 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.



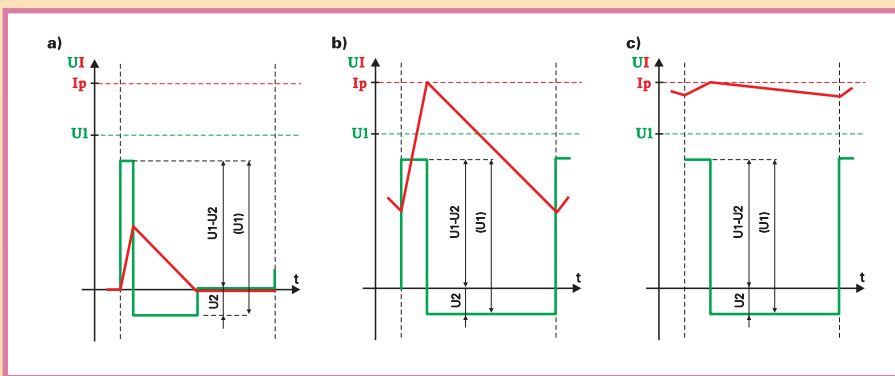
Rys. 6.

## Listy od Piotra

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  $U_1 - U_2$ . 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 **rysunkach 7, 8 i 9** znajdziesz przebiegi napięcia i prądu przy różnych napięciach wyjściowych. Co istotne, w każdym przypadku napięcie wejściowe  $U_1$  jest takie samo. W sytuacji z rysunku 7 napięcie wyjściowe  $U_2$  jest pięciokrotnie mniejsze od wejściowego. W drugim przypadku (rysunek 8) napięcie  $U_2$  jest równe połowie  $U_1$ , natomiast w sytuacji z rysunku 9 napięcie  $U_2$  do 5/6 napięcia wejściowego  $U_1$ . 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 ( $U_1 - U_2$ ) i rozładowania ( $U_2$ ).



Rys. 7.

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?

Rys. 8.

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. Podałem Ci wzór na teoretyczną moc maksymalną przetwornicy zaporowej (przy bardzo dużej częstotliwości)

$$P_{max} = U_1 \cdot I_p \cdot [U_2 / (U_2 + U_1)]$$

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 rysunku 7c, 8c, 9c bez trudu zauważysz, że w każdym przypadku średni prąd ładowania wynosi

$$I_1 = I_p (t_{on}/T)$$

W czasie ładowania cewki, do obciążenia jest już dostarczana moc

$$P_1 = U_2 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_p (t_{on}/T)$$

Z kolei średni prąd rozładowania wynosi  $I_2 = I_p (t_{off}/T)$

Czyli w fazie rozładowania do obciążenia jest dostarczana moc

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 = U_2 \cdot I_p (t_{off}/T)$$

Moc całkowita

$$P = P_1 + P_2 = U_2 \cdot I_p [(t_{on} + t_{off}) / T]$$

$$P = U_2 \cdot I_p$$

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  $P_{max} = U_1 \cdot I_p$

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  $U_1 \cdot I_p$ .

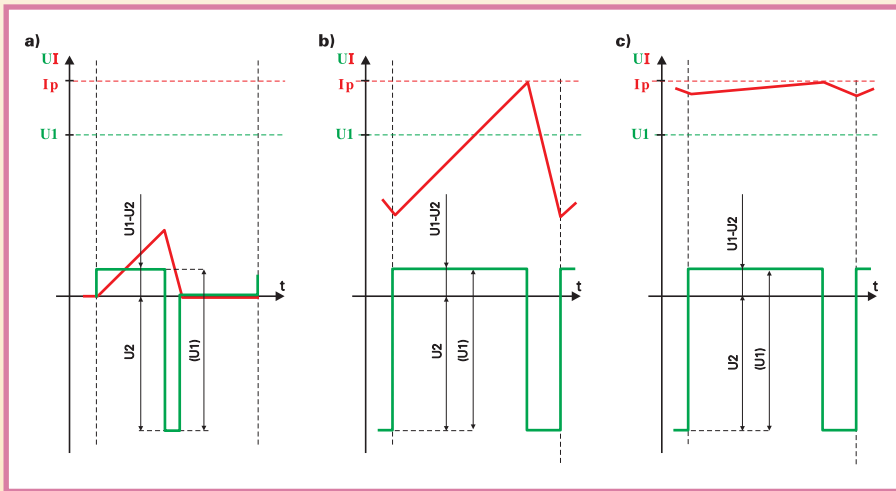
A może więcej? Co nam szkodzi zwiększyć wtedy prąd powyżej  $I_p$ ? Że rdzeń się nasyci? A co nas to obchodzi - przecież tranzystor-kłucz jest na stałe otwarty!

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  $U_2 < U_1$  uda się coś "zrobić", 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. Rolę rezystancji ograniczającej prąd ładowania będzie pełnił (niewielka) rezystancja uzwojenia cewki, a sprawność znacznie spadnie. W skrajnym przypadku duży prąd ładowania (ograniczony niewielką rezystancją cewki) może uszkodzić tranzystor-kłucz.

Zamykamy sprawę: nawet gdyby tranzystor się nie uszkodził, także



Rys. 9.

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

$$P = U_2 * I_p$$

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

Jest to teoretyczna moc maksymalna, jaką można "wydusić" z przetwornicy

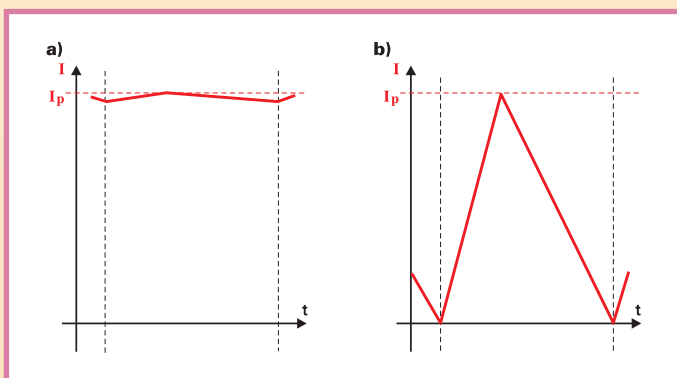
przy następujących założeniach:

- 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 napięcie). 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 ry-

sunku 10a jest niemal dwukrotnie większa niż tego z rysunku 10b.



Rys. 10.

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 wartości  $I_p$ . 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 zero. 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 na-

pięciu 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  $U_2 = 0,5 U_1$ . Poniekąd 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 wzrosł 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

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

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