

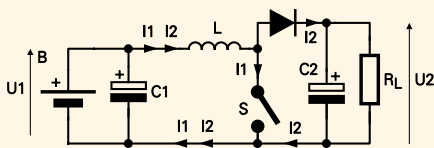
# Przetwornice impulsowe

## Podstawowe konfiguracje - przetwornica podwyższająca

Po długiej przerwie znów powracamy do tematu przetwornic. Czytelnicy upominają się o dalsze informacje na ten temat.

Do tej pory omówiliśmy przetwornicę zaporową i przepustową. W tym odcinku omówimy przetwornicę podwyższającą. Jeśli do tej pory się nie zgubiłeś, nie będziesz miał żadnych problemów z przyswojeniem sobie informacji z tego listu. W razie potrzeby przypomnij sobie wiadomości o przetwornicach zamieszczone w EdW 4/99 ... 8/99.

Przetwornica podwyższająca jest rodzajem przetwornicy zaporowej (ang. boost converter, step up switching regulator). Uproszczony schemat jest pokazany na rysunku 1. Nie muszę już chyba dodawać, że w większości praktycznych przetwornic występuje obwód regulacji, zmieniający współczynnik wypełnienia impulsów sterujących w zależności od napięcia wyjściowego.



Rys. 1 Przetwornica podwyższająca

W pierwszej fazie cyklu, po zamknięciu klucza S, przez klucz i cewkę płynie rosnący prąd  $I_1$  - w cewce gromadzi się energia. Ilustruje to rysunek 2. Sytuacja wygląda dokładnie tak, jak w przetwornicy zaporowej, którą poznałeś na początku. Troszkę inaczej jest tylko w drugiej fazie cyklu, gdy energia jest przekazywana do kondensatora C2 i obciążenia. Po otwarciu klucza prąd nadal "chce" płynąć przez cewkę w tym samym kierunku - w cewce zaindukuje się więc takie napięcie, aby prąd mógł nadal płynąć. W odróżnieniu od poznanej wcześniej przetwornicy zaporowej, prąd  $I_2$  zamknie się w obwodzie: B, L, D,  $R_L$ . Ilustruje to rysunek 3a. Jasne i oczywiste.

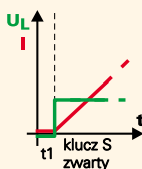
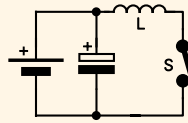
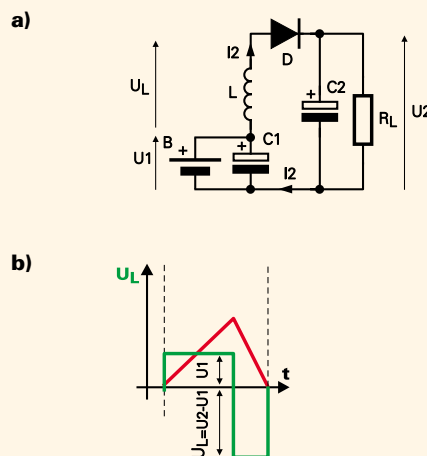
Gdyby przetwornica nie pracowała, a klucz S byłby na stałe otwarty, prąd po prostu płynąłby do obciążenia przez diodę D. Jeśli przetwornica pracuje, cewka na przemian gromadzi i oddaje energię, zwiększając napię-

cie wyjściowe. Wygląda na to, że cewka dodaje do napięcia wejściowego  $U_1$  jakiegoś "swoje" napięcie  $U_L$ . Tym samym napięcie wyjściowe  $U_2$  pracującej przetwornicy będzie zawsze większe niż napięcie wejściowe  $U_1$  (pomijamy spadek napięcia na diodzie). Stąd nazwa - przetwornica podwyższająca.

Rysunek 3b pokazuje przykładowe przebiegi napięcia i prądu. Zwróć uwagę, że w fazie ładowania cewka podłączona jest do napięcia  $U_1$ , a więc szybkość przyrostu prądu wyznaczona jest właśnie przez to napięcie. A jakie napięcie zaindukuje się w cewce w czasie rozładowania? Teoretycznie napięcie to może być dowolne: małe lub duże. W praktyce będzie dokładnie takie, by podtrzymać przepływ prądu w cewce. Podobnie jak przy omawianiu poprzednich przetwornic zakładamy, że przetwornica już pracuje i napięcie wyjściowe  $U_2$  na kondensatorze C2 zdążyło się wcześniej ustalić. W cewce zaindukuje się więc napięcie...

Wcale nie będzie to napięcie wyjściowe  $U_2$  plus spadek napięcia na diodzie D. Dlaczego?

Rys. 3



Rys. 2

Rysunki 1 i 3a pokazują, że wystarczy napięcie mniejsze - napięcie z cewki ( $U_L$ ) będzie dodawane do napięcia  $U_1$ , tworząc napięcie wyjściowe  $U_2$ . Jeśli więc pominiemy (w sumie niewielki) spadek napięcia na diodzie, możemy powiedzieć, że napięcie na cewce wyniesie  $U_L = U_2 - U_1$ .

A jak regulować to napięcie, a tym samym napięcie wyjściowe? Szczegóły za chwilę, ale chyba już "czujesz przez skórę", że również w tej przetwornicy regulacja napięcia będzie polegać na zmianie współczynnika wypełnienia impulsów sterujących.

Zwróć jeszcze uwagę na drogę prądów  $I_1$  oraz  $I_2$ . Przy zamkniętym kluczu S, ze źródła zasilania B pobierana jest energia - zostaje ona zmagazynowana w indukcyjności, a następnie przekazana do obciążenia w drugiej fazie cyklu. To oczywiste! Czy jednak już widzisz, że energia jest pobierana ze źródła B także wtedy, gdy klucz S jest otwarty - prąd  $I_2$  płynie przecież przez baterię zasilającą B! Co to znaczy?

Podobnie jak w przetwornicy przepustowej, także i tu część energii jest dostarczana do obciążenia niejako przy okazji. W przetwornicy przepustowej następowało to w fazie ładowania cewki (przy zamkniętym kluczu S), natomiast w przetwornicy podwyższającej następuje w fazie rozładowania cewki. Jak się okaże, pozwoli to "wyduścić" z przetwornicy podwyższającej moc większą, niż z przetwornicy zaporowej z tą samą cewką.

### Tryby pracy

Podobnie jak w dwóch poprzednio omówionych układach przetwornic, także i tu możemy odróżnić tryb pracy, w którym prąd w cewce w części okresu jest równy zero. Sytuacja taka ma miejsce przy małych prądach obciążenia. Rysunki 4a i 4b pokazują przykładowe przebiegi w tym trybie. Znowu szybkość zmian prądu jest ściśle związana z napięciami występującymi na cewce: wejściowym  $U_1$  w fazie ładowania i napięciem ( $U_2 - U_1$ ) w fazie rozładowania. W tym trybie współczynnik wypełnienia impulsów sterujących zależy od chwilowego zapotrzebowania na moc wyjściową.

Analogicznie przy większych prądach obciążenia, prąd cewki cały czas jest większy od zera, i wtedy nasz układ staje się "transformatorem prądu stałego". Przykładowe przebiegi znajdziesz na rysunkach 4c i 4d.

Na **rysunku 4e** pokazałem sytuację, gdy czas  $t_{on}$  jest zbyt długi - prąd wzrasta powyżej prądu nasycenia  $I_p$ . Oczywiście jest to sytuacja niedopuszczalna, bo gwałtownie wzrosną straty (w praktyce zapewne uszkodzi się też tranzystor-klucz).

Może się zastanawiasz, dlaczego nagle mówimy o różnicy napięć  $U_2-U_1$ , jakby napięcie  $U_2$  było już z góry ustalone. Możemy tak robić - umówiliśmy się, że rozpatrujemy działanie przetwornicy w trakcie jej normalnej pracy, przy jakimś prądzie obciążenia, gdy przebiegi napięć i prądów są ustabilizowane. Nie zapominaj o układzie automatyki (którego tym razem nie rysowałem). Ten układ automatyki dobierze współczynnik wypełnienia (a tym samym napięcie  $U_L$  i szybkości zmian prądów), by napięcie wyjściowe  $U_2$  było dokładnie takie jak chcemy.

Jeśli jednak masz jakiegokolwiek wątpliwości, przyjrzymy się temu bliżej.

Jaki ma być ten współczynnik wypełnienia? Przypuśćmy, że chcemy dodać do napięcia  $U_1$  napięcie dwukrotnie większe, czyli napięcie wyjściowe  $U_2$  ma być równe  $3*U_1$  (pomiemy spadek napięcia na diodzie). Aby napięcie  $U_L$  było dwa razy większe od  $U_1$ , szybkość zmian prądu w fazie rozładowania musi być dwukrotnie większa niż w fazie ładowania. Właśnie taką sytuację pokazuje rysunek 4.

Pamiętaj, że mówimy o ustalonych warunkach pracy - to znaczy, że w drugiej fazie każdego cyklu cewka oddaje do obciążenia dokładnie tyle energii, ile pobrała w pierwszej fazie. Inaczej mówiąc, o ile prąd wzrośnie w pierwszej fazie, o tyle musi zmaleć w drugiej. Jeśli przyrosty prądu mają być jednakowe, to w sytuacji z rysunków 4c i 4d wartości napięć będą zależne od czasów  $t_{on}$  i  $t_{off}$  według znanej zależności

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

Nie ulega wątpliwości, że w omawianym przykładzie czas  $t_{off}$  musi być dwukrotnie

krótszy od  $t_{on}$ . Tylko wtedy napięcie  $U_L$  będzie dwa razy większe od napięcia  $U_1$ .

Teraz już chyba widzisz, że w przypadku przetwornicy podwyższającej prawdziwa jest zależność

$$t_{on} / t_{off} = U_L / U_1$$

Nam bardziej przydatna byłaby zależność napięcia wyjściowego  $U_2$  od czasów  $t_{on}$  i  $t_{off}$ . Ponieważ  $U_L = U_2-U_1$ , więc

$$t_{on} / t_{off} = (U_2-U_1) / U_1$$

stąd

$$t_{on}U_1 = t_{off}U_2 - t_{off}U_1$$

co odpowiada

$$t_{off}U_2 = t_{on}U_1 + t_{off}U_1 = (t_{on} + t_{off})U_1$$

a ponieważ  $t_{on} + t_{off} = T$ , ostatecznie

$$U_2 = (T/t_{off})U_1$$

i jest to wzór na "przekładnię" przetwornicy podwyższającej. Zależność tę można też zapisać w postaci

$$U_2/U_1 = T/t_{off}$$

Przypominam, że podana właśnie zależność jest słuszna tylko wtedy, gdy prąd w cewce nie maleje do zera, czyli indukcyjność nigdy nie jest wolna od energii (zobacz rys. 4c, d). Napięcie wyjściowe wyznaczone jest przez czasy  $t_{on}$  i  $t_{off}$ . Gdy rezystancja  $R_L$  się zmniejsza, wzrasta średni prąd, jak pokazują rysunki 4c, d.

Przy znacznie mniejszych prądach obciążenia, gdy chwilowa wartość prądu cewki maleje do zera (rys. 4a, b), powyższa zależność nie jest prawdziwa - przetwornica nie jest "transformatorem prądu stałego". Ale napięcie wyjściowe nadal może być utrzymane na założonym poziomie - układ automatyki tak skróci czas ładowania  $t_{on}$ , by energia przekazywana w każdym cyklu wystarczyła do utrzymania potrzebnego napięcia  $U_2$ . Jeśli w takiej sytuacji zmniejszy się trochę  $R_L$ , układ automatyki zwiększy nieco współczynnik wypełnienia i zwiększy średni prąd  $I_2$ .

Przedostatni wzór  $U_2 = (T/t_{off})U_1$  wskazuje, że czym krótszy czas  $t_{off}$ , tym większe napięcie wyjściowe. Zgadza się to z intuicją i potwierdzają to **rysunki 5...7**. Ilustrują one trzy przypadki, gdy napięcie wyjściowe jest:

- o 1/5 (20%) większe od  $U_1$
- dwukrotnie większe od  $U_1$
- pięciokrotnie większe od  $U_1$ .

Rysunki 5a, 6a i 7a pokazują przebiegi przy niewielkiej indukcyjności (lub niewielkiej częstotliwości). Rysunki 5b, 6b i 7b pokazują sytuację przy dużej pojemności (lub dużej częstotliwości) - zmiany prądu są wtedy niewielkie.

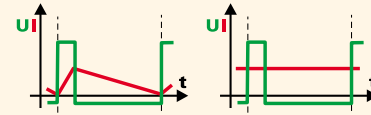
## Moc i napięcie

Rysunki 5b...7b pozwalają także określić maksymalną moc przetwornicy podwyższającej z cewką i prądzie nasycenia  $I_p$  przy wielkiej częstotliwości pracy. Można to zrobić na dro-

dze rachunkowej. Moc wyjściowa to iloczyn napięcia  $U_2$  i średniego prądu rozładowania  $I_2$

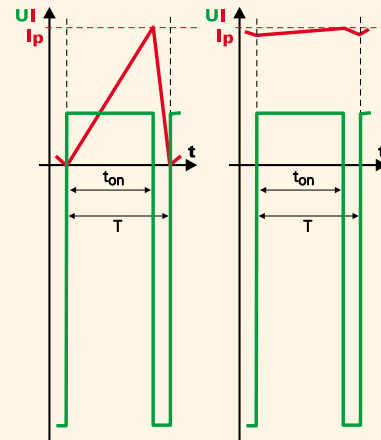
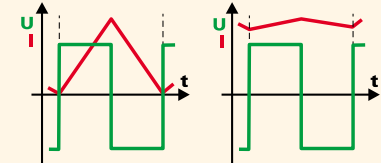
$$P = U_2 * I_2 \text{sr}$$

Wartość szczytowa prądu  $I_2$  może być co najwyżej równa prądowi nasycenia  $I_p$ , więc średni prąd rozładowania w sytuacji z rysunków 5b, 6b, 7b wyniesie prawie



Rys. 5

Rys. 6



Rys. 7

$$I_2 \text{sr} = (t_{off}/T) I_p$$

Z kolei

$$U_2 = (T/t_{off})U_1$$

Co daje nieco zaskakujący wynik

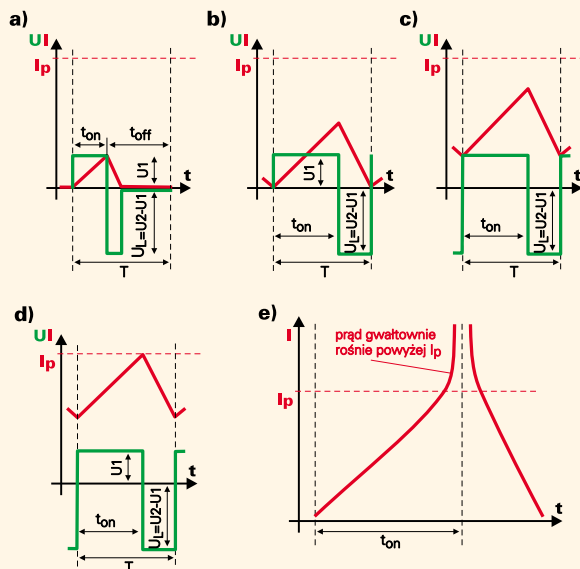
$$P = (T/t_{off})U_1 * (t_{off}/T)I_p = U_1 * I_p$$

Wynik ten jest słuszny dla przypadków, gdy wartość prądu jest cały czas zbliżona do  $I_p$  (duża indukcyjność  $L$  lub duża częstotliwość). Dla częstotliwości  $f_{min}$  (rysunki 5a, 6a, 7a) moc ta będzie o połowę mniejsza.

W każdym razie wynik ten nie powinien dziwić. Wystarczy pomyśleć: w przetwornicy idealnej, bez strat (taką zresztą cały czas rozpatrujemy) moc wyjściowa musi być równa mocy wejściowej. A jaka moc jest pobierana z baterii  $U_1$ ?

Rysunek 1 oraz 7b wskazują, że prąd jest pobierany z baterii zarówno w czasie ładowania, jak i rozładowania, a więc jego wartość średnia jest tylko odrobinę mniejsza od  $I_p$ . Jeśli z baterii o napięciu  $U_1$  cały czas jest pobierany prąd  $I_p$ , to maksymalna moc pobierana wynosi w przetwornicy podwyższającej  $P = U_1 * I_p$

Rys. 4



Wzór ten jest odmienny, niż w przypadku poprzednio omówionych przetwornic, ponieważ prąd ładujący  $I_1$  jest pobierany ze źródła tylko w czasie  $t_{on}$ . Więc zarówno w przetwornicy

**odwracającej**  $P=U_1 \cdot I_p (t_{on}/T)$

a także

**przepustowej**  $P=U_1 \cdot I_p (t_{on}/T)$

Zwróć jeszcze uwagę na zależność napięcia wyjściowego od współczynnika wypełnienia (czyli od czasów  $t_{on}$  i  $t_{off}$ ) dla poszczególnych przetwornic:

**podwyższającej**  $U_2=(T/t_{off})U_1$

następnie

**odwracającej**  $U_2=(t_{on}/t_{off})U_1$

oraz

**przepustowej**  $U_2=(t_{on}/T)U_1$

Dokładnie przeanalizuj sześć powyższych wzorów. Nie masz chyba wątpliwości, że gdy potrzebne Ci napięcie  $U_2$  jest mniejsze niż napięcie  $U_1$ , którym dysponujesz, wtedy powinienś zastosować przetwornicę przepustową, bowiem w tym zakresie napięć będzie ona mieć większą moc niż przetwornica odwracająca z tą samą cewką. Jeśli nie wiesz, dokonaj kilku przykładowych obliczeń.

Gdy natomiast potrzebne Ci napięcie  $U_2$  ma być wyższe od napięcia  $U_1$ , którym dysponujesz, wykorzystasz przetwornicę podwyższającą, która w tym zakresie okaże się lepsza od odwracającej.

Przetwornicę odwracającą wykorzystasz tylko wtedy, gdy zechcesz zmieniać napięcie  $U_2$  w szerokich granicach.

## Projektowanie

W praktyce, mając jakąś cewkę o indukcyjności  $L$  i prądzie nasycenia  $I_p$  oraz wiedząc, jakie będzie maksymalne napięcie wejściowe  $U_1$ , obliczysz maksymalny czas włączenia  $t_{on}$ , nie powodujący nasycenia rdzenia cewki:

$$t_{onmax} = L \cdot I_p / U_{1max}$$

Przy mniejszym napięciu  $U_1$  czas ten mógłby być dłuższy, ale Ty musisz uwzględnić najgorszy przypadek.

Wiedząc, jakie ma być napięcie wyjściowe  $U_2$ , możesz z łatwością obliczyć

$$U_L = U_2 - U_1, \text{ a potem czas } t_{off} \text{ z zależności}$$

$$t_{on} / t_{off} = U_L / U_1$$

znając  $t_{onmax}$  i  $t_{off}$  można obliczyć minimalną częstotliwość  $f_{min}$ .

W praktyce wystarczy policzyć  $t_{onmax}$ . W najbardziej niekorzystnym przypadku, gdy napięcie wyjściowe ma być bardzo duże, czas  $T$  będzie tylko trochę większy niż  $t_{onmax}$  (porównaj rysunek 7). Możesz więc od razu obliczać najmniejszą częstotliwość pracy

$$f = 1/t_{onmax}$$

Potem w praktycznym układzie i tak powinienś pracować z jeszcze większą częstotliwością, żeby przy największych prądach przebiegi wyglądały jak na rysunkach 5b...7b, a nie jak na rysunkach 5a...7a. "Wyciśniesz" wtedy z danej przetwornicy większą moc. Oczywiście nie możesz przesadzić

ze zwiększaniem częstotliwości - pamiętaj o stratach przełączania tranzystorów i stratach histerezy.

To wszystko! Popatrz, jakie to okazało się łatwe, pod warunkiem, że masz cewkę i znasz jej indukcyjność  $L$  oraz prąd nasycenia  $I_p$ .

Ale Ty pewnie mierzysz o oczko wyżej i chciałbyś zaprojektować układ "od zera", w tym także obliczyć i wykonać cewkę. Obliczyć i wykonać cewkę to znaczy, zakładając indukcyjność  $L$ , prąd  $I_p$ , dobrąć rdzeń, z odpowiedniego materiału, o właściwej wielkości oraz obliczyć liczbę zwojów i grubość drutu nawojowego. Moje listy powinny Cię przekonać, że nie jest to wcale łatwe zadanie. Dlatego na razie nie zachęcam Cię do takich obliczeń. Pozostań przy gotowych cewkach. Owszem, możesz eksperymentować - możesz nawijać różne cewki i sprawdzać je prostym przyrządem, który był opisany w EdW 9/99.

Nie zapomnij jednak, że oprócz indukcyjności  $L$ , prądu nasycenia  $I_p$  każda cewka ma jakąś rezystancję (drutu) i że występują w niej straty (związane między innymi z właściwościami materiału rdzenia). Będzie to powodować nagrzewanie się cewki, a jak Ci już sygnalizowałem, temperatura rdzenia w jego najgorętszym punkcie nie powinna przekraczać  $+100^\circ\text{C}$ .

## Dodatkowe wyjaśnienia

Przy analizie wszystkich trzech rodzajów przetwornic zakładaliśmy, że "ze względu na dużą pojemność kondensatora wyjściowego  $C_2$  napięcie wyjściowe  $U_2$  nie zmienia się w czasie pracy". Czy to prawda?

I tak, i nie!

Prawdą jest, że przy dużej częstotliwości pracy i dużej pojemności kondensatora włączanie kolejnej, w sumie niewielkiej, porcji energii z cewki, bardzo niewiele zmieni napięcie na kondensatorze - o kilka czy kilkanaście miliwoltów, czyli zmiana napięcia będzie rzędu 0,1%. Potem prąd obciążenia płynący przez rezystor  $R_L$  rozładuje kondensator o te drobne miliwolty, potem napięcie znów wzrośnie, itd... Takie zmiany napięcia o 0,1% możemy spokojnie pominąć przy wstępnej analizie. Stąd założenie, że napięcie na kondensatorze wyjściowym jest stałe.

Niemniej jednak w wielu przypadkach interesuje nas, jakie jest to napięcie tętnień. Oczywiście zależy ono od pojemności kondensatora wyjściowego - czym

pojemność większa, tym mniejsze tętnienia. Trzeba jednak pamiętać, że przetwornica pracuje przy częstotliwościach co najmniej 20kHz (często 100kHz i więcej), a przy takich częstotliwościach elektrolity mają mniejszą pojemność. Tak - pojemność jest mniejsza od nominalnej! To nie wszystko - ponieważ płynące prądy mają charakter impulsowy, oprócz pojemności trzeba też wziąć pod uwagę wewnętrzną rezystancję szeregową kondensatora wyjściowego  $C_2$  (parametr oznaczony w katalogach ESR). Rezystancja ta powinna być jak najmniejsza. Przystawka - miernik rezystancji kondensatorów przedstawiony był w EdW 3/2001. Ścisłej biorąc, należałoby także uwzględnić rezystancję ścieżek i przewodów, zwłaszcza w obwodach, gdzie występują impulsy prądu, ale to już wyższa szkoła jazdy. W dotychczasowych rozważaniach pomijaliśmy spadek napięcia na diodzie  $D$ , występujący w każdej przetwornicy. Przy niewielkich napięciach na cewce, rzędu kilku woltów, te 0,6...0,8V na diodzie to sporo. Sprawność zmniejszy się o kilka, a nawet o kilkanaście procent. Dlatego w przetwornicach pracujących przy niskich napięciach stosuje się z reguły diody Schottky'ego, mające napięcie przewodzenia o połowę mniejsze.

Na pewno zdążyłeś już zauważyć, że tranzystor-klucz pracujący w przetwornicy odwracającej lub podwyższającej o dużym napięciu wyjściowym musi wytrzymać napięcie pojawiające się na nim w fazie rozładowania cewki.

Przy w pełni profesjonalnym projektowaniu przetwornicy należałoby także wziąć pod uwagę szereg dodatkowych czynników, jak charakterystyki przełączania tranzystorów, generowanie zakłóceń i inne, jednak ich szczegółowe omówienie zdecydowanie wykracza poza ramy niniejszego cyklu.

I tyle na razie o podstawowych przetwornicach. W najbliższej przyszłości zapoznam Cię z przetwornicami synchronicznymi.

Piotr Górecki