

Przetwornice impulsowe

Podstawowe konfiguracje - przetwornica zaporowa

część 3

Moc, prąd i częstotliwość

W dotychczasowych rozważaniach nie zastanawialiśmy się nad problemem nasycenia. Jak wiesz, nie można zwiększać prądu w cewce ponad pewną graniczną wartość, ponieważ rdzeń ulegnie nasyceniu, indukcyjność spadnie, prąd zacznie gwałtownie rosnąć i przetwornica przestanie poprawnie pracować. Tym samym w danych warunkach pracy przetwornica z konkretną cewką przeniesie co najwyżej ściśle określoną moc. Domyślasz się, że malańki dławik w kształcie rezystora nie pozwoli przenieść mocy takiej jak potężna cewka nawinięta grubym drutem na dużym rdzeniu. Na pewno chciałbyś wiedzieć, jakie tu występują ograniczenia.

Jeśli chciałbyś przeprowadzać tekie rachunki, na pewno potrzebne Ci będą podstawowe parametry cewki (dławika), mianowicie indukcyjność L i prąd maksymalny I_p , nie powodujący nasycenia rdzenia. Znajdziesz je w katalogu lub zmierzysz. Od dawna znasz wszystkie potrzebne wzory:

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

i jego uproszczoną postać $U = L \cdot I / t$

$$E = (L \cdot I^2) / 2$$

$$P = E \cdot f$$

$$U1/U2 = t_{on}/t_{off}$$

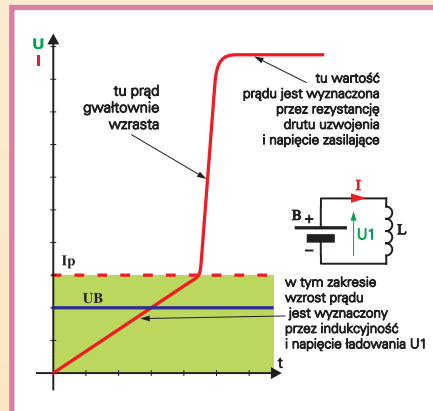
Obliczamy więc. Po zamknięciu klucza (podaniu na cewkę napięcia) prąd cewki wzrasta liniowo osiągając po czasie t_{on} (z ang. on - załączony) wartość:

$$I = U1 \cdot t_{on} / L$$

gdzie $U1$ to napięcie podane na cewkę.

Na koniec czasu t_{on} chwilowa wartość prądu nie może przekroczyć katalogowej wartości I_p , bo cewka się nasyci i prąd zacznie wzrastać w niekontrolowany sposób (niezgodny z podanym wzorem). Ilustruje to **rysunek 20**. Oczywiście projektując przetwornicę musimy zapewnić jej pracę w obszarze charakterystyki zaznaczonym na zielono. To znaczy, że czas włączenia klucza nie może być zbyt duży, bo prąd wzrósłby ponad dopuszczalną wartość I_p .

Maksymalny czas włączenia klucza t_{onmax} możemy obliczyć z ostatniego wzo-



Rys. 20

ru $I = U1 \cdot t_{on} / L$, jeśli tylko znamy indukcyjność L , prąd maksymalny I_p oraz wartość napięcia zasilającego $U1$:

$$t_{onmax} = L \cdot I_p / U1$$

Mamy więc pierwsze ograniczenie - w naszej przetwornicy czas ładowania t_{on} nie może być dłuższy, bo przy maksymalnym napięciu zasilania rdzeń uległby nasyceniu.

Teraz określimy minimalną częstotliwość pracy przetwornicy. Potrzebna będzie do tego znajomość czasów t_{onmax} (już znamy) oraz czasu t_{off} w granicznej sytuacji, gdy przebiegi w układzie będą takie jak na rysunku 13.

Czas t_{off} (a właściwie t_{offmin}) możemy łatwo obliczyć pamiętając o zależności

$$U1/U2 = t_{off}/t_{on}$$

Stąd

$$t_{off} = U1 \cdot t_{onmax} / U2$$

Mając t_{onmax} i t_{off} obliczamy długość cyklu T

$$T = t_{onmax} + t_{off}$$

a stąd minimalną częstotliwość, przy której w trybie pracy wg rysunku 13 przetwornica przeniesie maksymalną moc:

$$f_{min} = 1 / T$$

Czy częstotliwość pracy nie może być mniejsza (czas T większy)? Na pewno nie wolno zwiększać czasu t_{on} ze względu na

nasycenie (**rysunek 21a**). Natomiast czas t_{off} i tym samym T mógłby być dłuższy jak pokazuje **rysunek 21b**. Będzie to tryb pracy z uwalnianiem dławika od energii w części okresu. Jednak wtedy, przy mniejszej częstotliwości, moc przenoszona będzie mniejsza, a chyba to nie jest naszym celem?

Jak by na problem nie patrzeć, dla danej cewki o indukcyjności L , prądzie maksymalnym I_p przy napięciu wejściowym $U1$ i wyjściowym $U2$ częstotliwość pracy nie powinna być mniejsza od obliczonej właśnie f_{min} .

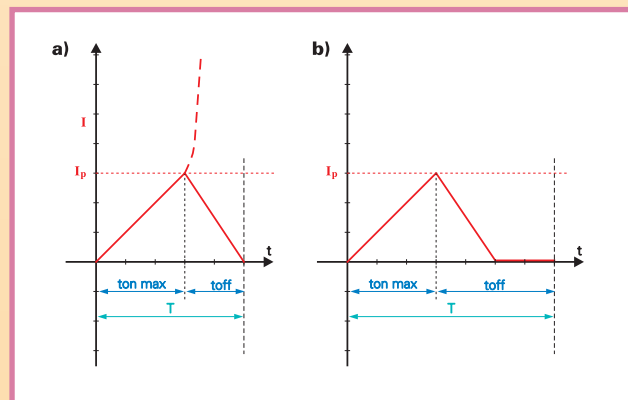
Możemy teraz obliczyć przenoszoną moc (pomijamy straty). Przy napięciu $U1$ w cewce jednorazowo zgromadzi się co najwyżej następująca porcja energii

$$E_p = L \cdot (I_p)^2 / 2 = 0,5 \cdot L \cdot (I_p)^2$$

Jeśli w każdym cyklu cała ta energia zostanie przeniesiona na wyjście (patrz rysunki 13 oraz 21b), wtedy maksymalna moc przenoszona wyniesie:

$$P = E_p \cdot f_{min}$$

$$P = 0,5 \cdot L \cdot f_{min} \cdot (I_p)^2$$



Rys. 21

Taką maksymalną moc przeniesie przetwornica w trybie z uwalnianiem energii z rdzenia. Teraz zastanówmy się, jak zmieni się maksymalna moc przenoszona, gdy w tym samym układzie, przy tej samej cewce zwiększymy częstotliwość?

Najpierw spróbujmy to określić na uproszczonej drodze rachunkowej. Pomocą będzie **rysunek 22**. Dla sytuacji z rysunku 22a, czyli dla częstotliwości $f\Omega$

Listy od Piotra

jednorazowo gromadzona porcja energii to:

$$E = 0,5 * L * I_p^2$$

a moc przenoszona to:

$$P = 0,5 * L * f_{min} * I_p^2$$

Na **rysunku 22b** zobaczysz przykładowe przebiegi przy częstotliwości pracy dwukrotnie większej niż na rysunku 22a.

Obliczmy, jaka porcja energii jest przekazywana w każdym cyklu na wyjście. Nie możemy podstawić do wzoru przyrostu ΔI , tylko musimy odjąć wartości energii na końcu i początku czasu t_{on} (albo t_{off}):

$$\Delta E = E_p - E_a = 0,5 * L * (I_p)^2 - 0,5 * L * (I_p/2)^2 = 0,5 * L * (I_p^2 - 0,25 I_p^2) = 0,5 * L * 0,75 I_p^2 = 0,375 * L * I_p^2$$

Porcja energii jest teraz mniejsza, ale ponieważ częstotliwość jest dwukrotnie większa (2f_{min}), więc w sumie przenoszona moc jest znacząco większa i wynosi:

$$P_2 = 0,75 * L * f_{min} * I_p^2$$

Rysunek 22c pokazuje przebieg prądu przy dziesięciokrotnym zwiększeniu częstotliwości (10f_{min}). Obliczamy najpierw porcję energii przekazywaną w każdym cyklu:

$$\Delta E = E_p - E_b = 0,5 * L * (I_p)^2 - 0,5 * L * (0,9 I_p)^2 = 0,5 * L * (I_p^2 - 0,81 I_p^2) = 0,5 * L * 0,19 I_p^2 = 0,095 * L * I_p^2$$

Potem moc dla częstotliwości 10f_{min}:

$$P_{10} = \Delta E * 10 f_{min} = 0,95 * L * f_{min} * I_p^2$$

to jest prawie dwa razy więcej niż dla częstotliwości f_{min}! Jeśli dla danej cewki moc maksymalną przy częstotliwości f_{min} przyjmiemy jako 100%, samo zwiększanie częstotliwości pozwoli (teoretycznie) uzyskać następujące moce:

$$\begin{aligned} f &= 2f_{min}: P_2 = 150\% \\ f &= 3f_{min}: P_3 = 166\% \\ f &= 5f_{min}: P_5 = 170\% \\ f &= 10f_{min}: P_{10} = 190\% \\ f &= 100f_{min}: P_{100} = 199\% \end{aligned}$$

Co prawda przebiegi pokazane na rysunku 22 dotyczą jednego przypadku, gdy $U_1 = U_2$, $t_{on} = t_{off}$, jednak generalny wniosek jest słuszny także dla innych napięć: zwiększając częstotliwości pracy przetwornicy powyżej f_{min} moglibyśmy zwiększyć moc przetwornicy niemal dwukrotnie.

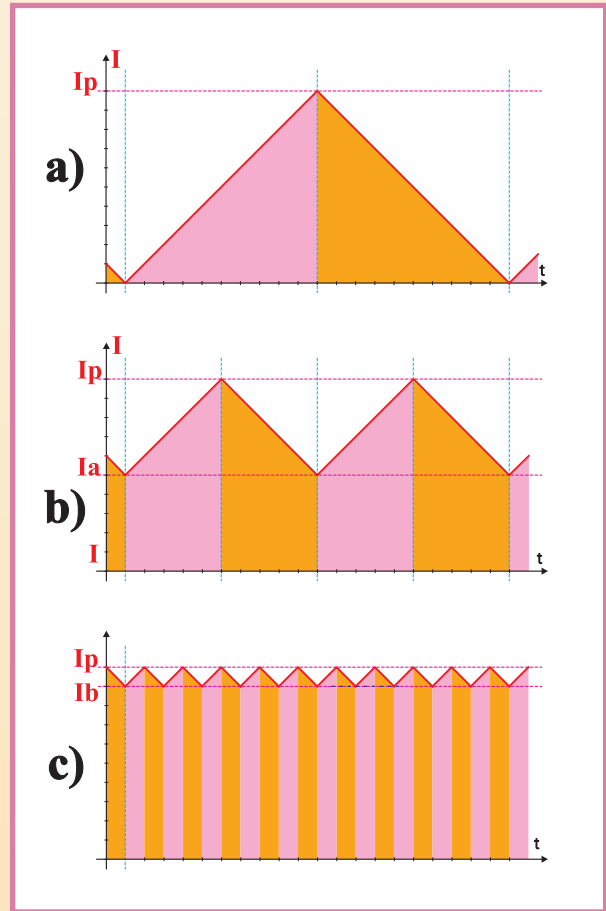
Może jednak przeprowadzone właśnie obliczenia były odrobinę za trudne. Do takich samych wniosków dojdiesz na drodze bardziej intuicyjnej. Na **rysunku 23** czerwonym kolorem wyróżniłem przebieg prądu ładowania dla częstotliwości f_{min} i 4f_{min}. Jaka jest średnia wartość prądu ładowania na rysunku 23a, a jaka na rysunkach 23b?

Pomyśl chwilę. Oczywiście! W przypadku **a** średni prąd ładujący jest znacznie mniejszy niż w przypadku **b**. Jeśli średni prąd jest mniejszy, to mniejsza też jest moc. Do takich samych wniosków dojdiesz analizując rysunek 22, gdzie różnymi kolorami zaznaczyłem prąd ładowania.

Inaczej mówiąc, oploti się pracować przy prądzie bliskim I_p i przy jak najmniejszych zmianach prądu. Jeśli zrozumiałeś tę zależność może zamiast zwiększania częstotliwości zaproponujesz radykalne zwiększenie indukcyjności? Rzeczywiście, jak pokazuje **rysunek 24**, uzyskasz podobny efekt (porównaj rysunki 22b, c). Zawsze jednak nie jest to najlepszy pomysł. Czym większa indukcyjność, tym większa liczba zwojów i większa rezystancja uzwojenia. Przy tym samym prądzie wystąpią większe straty na rezystancji uzwojenia i sprawność przetwornicy będzie mniejsza. Poza tym w cewkach o większej indukcyjności dopuszczalny prąd I_p jest mniejszy niż w cewkach z takim samym rdzeniem o mniejszej indukcyjności.

Przy okazji jeszcze jedna sprawa: czy i jak moc maksymalna przetwornicy zależy od stosunku napięć U_1/U_2 ? Niestety zależy! Pamiętaj, że ten stosunek napięć jest wyznaczony przez „przekładnię” przetwornicy, czyli stosunek t_{off}/t_{on} . Na **rysunku 25** znajdziesz dwa przebiegi prądu w cewce przetwornicy. W przypadku a napięcie wyjściowe U_2 jest znacznie mniejsze niż wejściowe U_1 , a więc czas rozładowania t_{off} jest znacznie dłuższy niż czas ładowania t_{on} . W przypadku b jest odwrotnie. Znow fioletowym kolorem wyróżniłem prąd ładowania. Zauważ, że średnia wartość prądu ładowania w przypadku a jest znacznie mniejsza niż w przypadku b. Dokładnie tak samo jest z przenoszoną mocą ($P = U_1 * I_{sr}$). To oznacza (uwaga!), że **moc maksymalna przenoszona przez przetwornicę zaporową zależy od stosunku napięć U_1/U_2** .

Gdyby chciał Ci się podstawić do wzoru $P = U_1 * I_{sr}$ zależność I_{sr} od czasów t_{on} , t_{off} oraz U_1 , U_2 i przekształcić, uzyskalbyś wzór, pokazujący jaką teoretyczną moc maksymalną mógłbyś „wyci-



Rys. 22

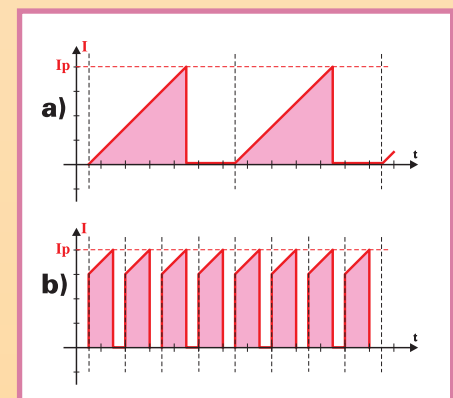
snąć” z cewki o prądzie granicznym I_p przy bardzo dużej częstotliwości pracy

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

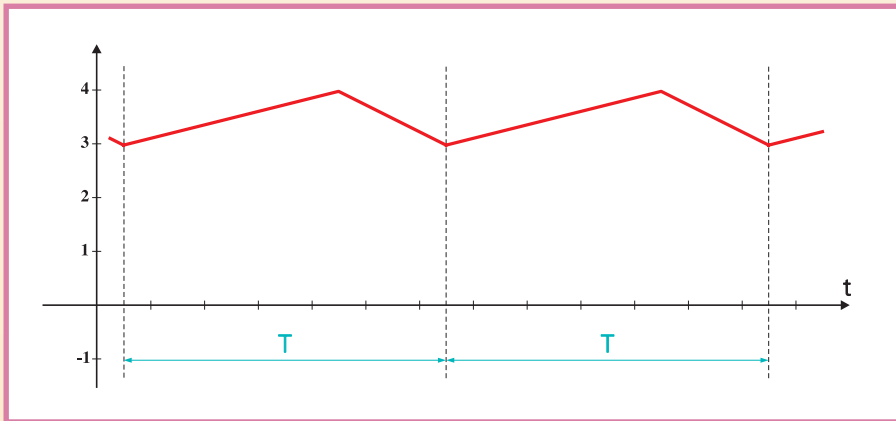
Przy częstotliwości f_{min} moc będzie dwukrotnie mniejsza.

Wszystko to wskazuje, że przetwornicy zaporowej nie oplota się stosować, gdy napięcie wyjściowe U_2 ma być znacznie mniejsze od napięcia wejściowego U_1 (wtedy warto zastosować przetwornicę przepustową, z którą zapoznam Cię już niedługo).

I jeszcze jedna ważna sprawa. W roli przełącznika-kłucza w praktyce stosujemy jakiś tranzystor. Jakie będzie minimal-



Rys. 23



Rys. 24

ne i maksymalne napięcie na tym tranzystorze? Tu chyba nie masz kłopotów?

Gdy klucz przewodzi, napięcie na nim powinno być jak najmniejsze, bliskie zeru. Jest to napięcie przewodzenia tranzystora. Natomiast gdy tranzystor nie przewodzi, maksymalne napięcie na nim jest równe sumie napięć U_1 i U_2 . Pamiętaj o tym, gdy będziesz budował przetwornicę zaporową, dającą wysokie napięcie wyjściowe. Musisz wtedy zastosować tranzystor o odpowiednio dużym napięciu pracy.

Podsumowanie

Z przeprowadzonego rozumowania wynikają następujące wnioski.

Mając cewkę o indukcyjności L i prądzie maksymalnym I_p , znając największe spodziewane napięcie wejściowe U_1 oraz potrzebne napięcie wyjściowe U_2 , musisz obliczyć minimalną częstotliwość pracy.

W tym celu najpierw obliczysz maksymalny czas ładowania t_{onmax} .

Potem obliczysz wymagany czas t_{off} wynikający ze stosunku napięć U_1/U_2 .

Suma czasów t_{onmax} i t_{off} jest maksymalną długością cyklu pracy, czyli określa minimalną częstotliwość.

Możesz pracować przy częstotliwości f_{min} , ale przy większych częstotliwościach z tej samej przetwornicy „wyduśisz” prawie dwukrotnie większą moc.

Zwiększaj więc...

Stop! Nie za szybko!

Przed rokiem wgłębialiśmy się w rozważania dotyczące właściwości materiałów magnetycznych. Mówiliśmy o zjawisku nasycenia, o pętli histerezy, stratach w elementach przełączających i innych „paskudztwach”. Teraz w dwóch odcinkach sprawnie zapoznałeś się z działaniem przetwornicy, a ja ani razu nie nadmieniałem o histerezie i stratach w tranzystorach przełączających.

Jeśli chciałbyś rzetelnie od początku do końca zaprojektować przetwornicę na

papierze, to musiałbyś uwzględnić nie tylko histerezę i nasycenie, ale także szereg innych zjawisk. Jeśli właśnie jesteś (albo będziesz) studentem, to prawdopodobnie będą Cię katować takimi obliczeniami. Nie są to obliczenia łatwe. Na dodatek różne źródła podają odmienne sposoby obliczeń i uzyskiwane wyniki nie pokrywają się ze sobą. Pisałem Ci o tym przed rokiem. Nie będziemy się w to wgłębiać.

W niniejszym artykule pokazałem Ci tylko podstawowe zasady i zależności.

Dobierając cewkę (albo częściej sprawdzając, co się da „wycisnąć” z danej cewki) nie musisz wgłębiać się w zawite obliczenia. Ale musisz pamiętać o ograniczeniach.

Co prawda zwiększenie częstotliwości pozwoliłoby zwiększyć moc przetwornicy. Nie zapominaj jednak o histerezie i stratach w tranzystorach (i diodzie) podczas przełączania. Obecność pętli histerezy wiąże się ze stratami. Czym większa częstotliwość pracy, tym większe te straty histerezy i przełączania. Ponadto zwiększenie częstotliwości zwiększa ryzyko przenikania zakłóceń do innych obwodów. Być może przetwornicę trzeba będzie zaekranować, by nie zrobić z niej nadajnika. Przy nieumiejętnym zaprojektowaniu przetwornica stanie się po prostu nadajnikiem fal elektromagnetycznych - przecież już 225kHz to częstotliwość nadawania

pierwszego programu Polskiego Radia na falach długich.

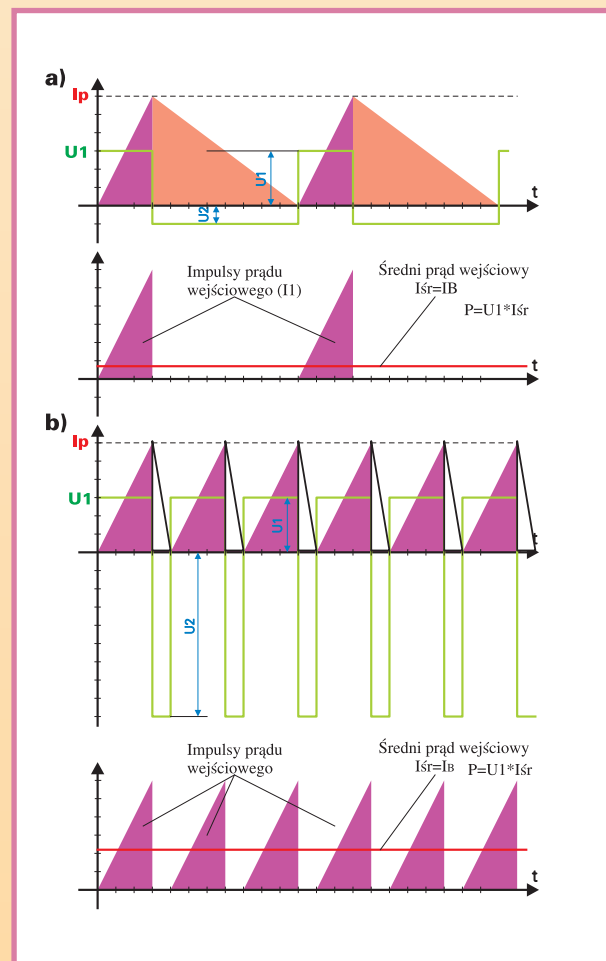
Cóż więc znaczy to nieprecyzyjne określenie „nadmierne zwiększanie częstotliwości”?

Nie bój się! Choć w zasadzie należałoby tu wykonać skomplikowane obliczenia i przeprowadzić bilans zysków i strat, jak to często w życiu bywa, nie ma tu ściśle wyznaczonej granicy. W praktyce należy po prostu przeprowadzić próby przy większych częstotliwościach pracy i sprawdzić, czy cewka się zanadto nie grzeje (rdzeń nie powinien mieć więcej niż $+100^{\circ}\text{C}$) i czy układ nie zakłóca pracy innych urządzeń.

Jeśli nie zgubiłeś się po drodze i szczęśliwie dotarłeś ze mną aż do tego miejsca, masz niekłamana satysfakcję, że wreszcie rozumiesz działanie podstawowej przetwornicy. Gratuluję!

W następnym odcinku zapoznam Cię z pozostałymi dwoma głównymi rodzajami przetwornic. Całą potrzebną wiedzę do zrozumienia ich działania właśnie posiadłeś. Uściślimy tylko szczegóły.

Piotr Górecki



Rys. 25