

P

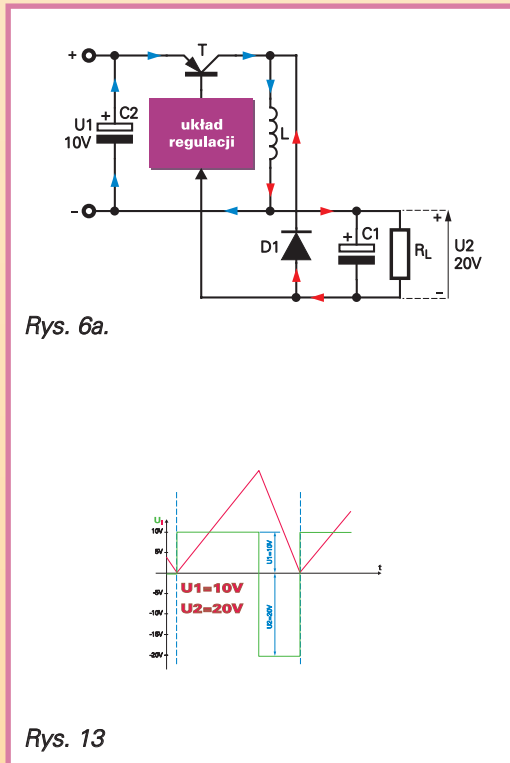
rzetwornice impulsowe

Podstawowe konfiguracje - przetwornica zaporowa

część 2

W poprzednim odcinku zaczęliśmy omawiać pracę przetwornicy odwracającej. Podane tam informacje nie wyczerpały zagadnienia. Najważniejsze jeszcze przed Tobą.

Do tej pory analizowaliśmy sytuację, gdy obciążenie przetwornicy było niewielkie. Okazało się, że przy dużych rezystancjach obciążenia, prąd w cewce płynął tylko przez część cyklu. W pozostałej części cyklu prąd przez cewkę nie płynął, czyli cewka była wolna od energii. Rozstaliśmy się pytaniem, co się stanie, gdy w sytuacji pokazanej na **rysunku 13** jeszcze bardziej zmniejszymy rezystancję obciążenia R_L .



Rys. 6a.

Rys. 13

Odpowiedź na to pytanie jest bardzo ważna. Jeśli to dobrze zrozumiesz, świat przetwornic stanie przed Tobą otworem.

Ponieważ napięcie wyjściowe U_2 ma zostać takie same, a rezystancja obciążenia R_L zmniejszy się, więc wyjściowy prąd obciążenia I_L musi wzrosnąć i na pewno moc przekazywana do obciążenia

musi być większa. Częstotliwość jest stała, więc zwiększyć się musi porcja energii przekazywana na wyjście w każdym cyklu. Czy to możliwe?

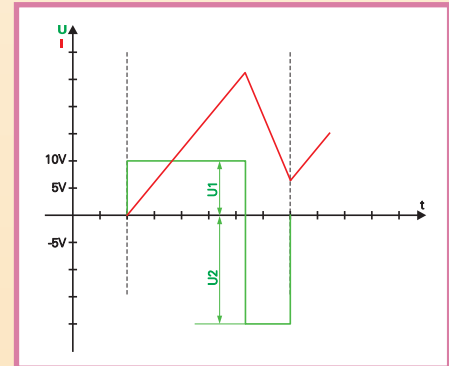
Jeśli przy stałej częstotliwości zwiększymy nieco czas włączenia klucza, to co prawda zwiększymy ilość energii zgromadzonej w rdzeniu, ale jednocześnie skrócimy czas rozładowania cewki, więc cewka nie zdąży się rozładować.

I co? Trudne, prawda?

Zastanówmy się jednak, jak zachowa się układ, gdy blok regulacyjny nieco zwiększy współczynnik wypełnienia impulsów. Popatrz na **rysunek 14**. Napięcie wyjściowe U_1 nadal wynosi 10V, a więc szybkość narastania prądu będzie taka sama jak na **rysunku 13**, bo przecież jest wyznaczona przez napięcie wejściowe [$U=L \cdot (\Delta I/\Delta t)$].

Na chwilę założymy, że napięcie wyjściowe U_2 nie zmieniło się, więc szybkość opadania nadal jest taka jak na **rysunku 13**. Ponieważ czas zwarcia klucza i czas ładowania cewki został zwiększony kosztem czasu rozładowania, więc cewka w czasie jednego cyklu zgromadzi więcej energii, ale niestety nie zdąży tej energii oddać. We wszystkich przypadkach z **rysunków 7-13** prąd na końcu cyklu pracy był równy zero. Teraz wygląda na to, że do końca cyklu pracy cewka nie zdąży się uwolnić od energii i na koniec cyklu będzie przez nią płynął jakiś prąd. W następnym cyklu prąd znów zacznie rosnąć i znów cewka zgromadzi jeszcze więcej energii, i znów do końca cyklu nie zdąży się jej pozbyć. Sytuacja będzie wyglądać mniej więcej tak jak na **rysunku 15**.

Może obawiasz się tu jakiegoś podstępu, bo ry-



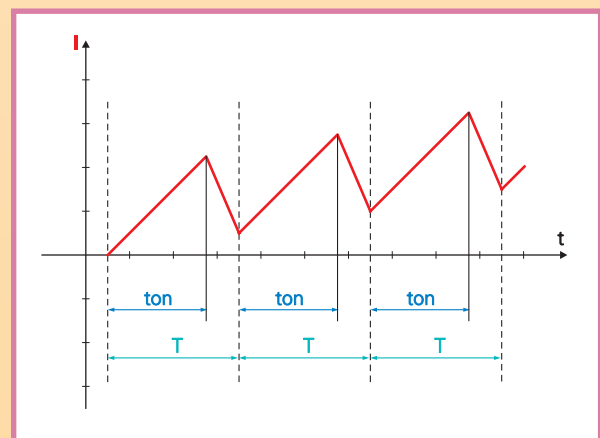
Rys. 14

sunki 14 i 15 pokazują hipotetyczną sytuację, gdy napięcie wyjściowe (i szybkość opadania prądu) są podobne jak na wcześniejszych **rysunkach 6-13**, a tymczasem wygląda na to, że przetwornica „nie wyrabia się”, więc ilość przekazywanej energii (moc) jest za mała i chyba napięcie wyjściowe powinno się zmniejszyć. Słusznie!

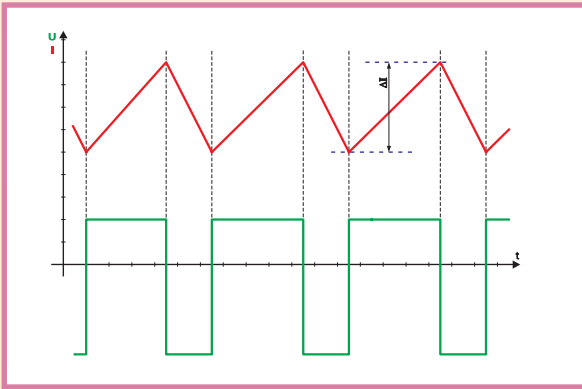
Ale to niczego nie zmienia. Jeśli napięcie wyjściowe jest mniejsze, to...

no właśnie – zmniejsza się szybkość opadania prądu, na koniec cyklu prąd jest jeszcze większy i w rdzeniu pozostaje jeszcze więcej energii. Mam nadzieję, że nadążasz...

Teraz kluczowe pytanie: czy to dobrze, czy źle, że prąd w cewce rośnie jak pokazują **rysunki 14 i 15**?



Rys. 15



Rys. 16

Na pierwszy rzut oka wygląda, że właśnie weszliśmy w beznadziejną sytuację i przetwornica przestała pełnić swoje funkcje, bo nie można przekazać na wyjście potrzebnej ilości energii, a prąd rośnie...

Czy zgodzisz się z wnioskiem, że prąd będzie rósł, aż rdzeń wejdzie w nasycenie, co jeszcze bardziej pogorszy sytuację? A może w pewnej chwili prąd przestanie rosnąć i ustabilizuje się na jakiejś wartości, jak pokazuje **rysunek 16**? Ale niby dlaczego miałby przestać rosnąć?

Jeśli rysunek 16 pokazuje rzeczywiste przebiegi, znaczyłoby to, że przy większym prądzie wytworzy się stan równowagi. Czas ładowania (włączenia klucza) i czas rozładowania byłyby takie same jak na rysunku 13. Jednak ilość energii przekazywana z wejścia na wyjście w każdym cyklu musiałaby być teraz większa, niż w sytuacji z rysunku 13. Zauważ jednak, że szybkość wzrostu i opadania prądu musiałaby być takie same jak na rysunku 13, bo przecież są wyznaczone przez napięcia: wejściowe i wyjściowe. Także amplituda zmian prądu (ΔI) miałaby być taka sama jak na rysunku 13. Czyli w sytuacji z rysunku 16 podczas każdego cyklu prąd wzrastałby o tyle samo, co w sytuacji z rysunku 13, zgodnie z wzorem

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

Co o tym sądzisz?

Jeśli przyrost prądu w cewce ΔI w obu przypadkach jest taki sam, to co z ilością gromadzonej przy tym energii? Czy w obu wypadkach ilość przekazywanej na wyjście energii jest taka sama? Przekonaj się sam.

Czy na przykład przy wzroście prądu w cewce z 0 do 1 ampera zgromadzona w cewce energia zwiększy się o tyle samo, co przy wzroście z 9 do 10 amperów? W obu przypadkach przyrost prądu jest taki sam i wynosi 1 amper...

Już zatrzybiłeś?

No właśnie! Wszystko wyjaśnia wzór $E = (L \cdot I^2) / 2 = 0,5L \cdot I^2$

W pierwszym przypadku w cewce o jakiejś indukcyjności L przy prądzie 0 amperów nie ma energii. Wzrost prądu do 1A spowoduje zgromadzenie się w każdym cyklu energii (jednostki nie są w tej chwili ważne):

$$E_1 = 0,5L \cdot 1^2 = 0,5L \cdot 1$$

I taka porcja energii może być przekazana na wyjście.

Natomiast w drugim przypadku przy prądzie 9A na początku cyklu jest już zgromadzona energia:

$$E_9 = 0,5L \cdot 9^2 = 0,5L \cdot 81$$

Wzrasta ona do

$$E_{10} = 0,5L \cdot 10^2 = 0,5L \cdot 100$$

czyli o

$$0,5L \cdot 100 - 0,5L \cdot 81 = 0,5L \cdot 19$$

Mimo, że zmiany prądu ΔI wynoszą też 1A, jest to 9-krotnie więcej niż w pierwszym przypadku! Czyli w drugim przypadku na wyjście może być przekazana 9-krotnie większa porcja energii (i moc).

Mamy więc rozwiązanie zagadki.

Okazało się, że w naszej przetwornicy przy ustalonych napięciach wejściowym

i wyjściowym, przy zmniejszaniu rezystancji obciążenia przebiegi będą zmieniać się, jak pokazuje to **rysunek 17**. Dokładnie przeanalizuj przebiegi i zastanów się, czy wszystko jest jasne.

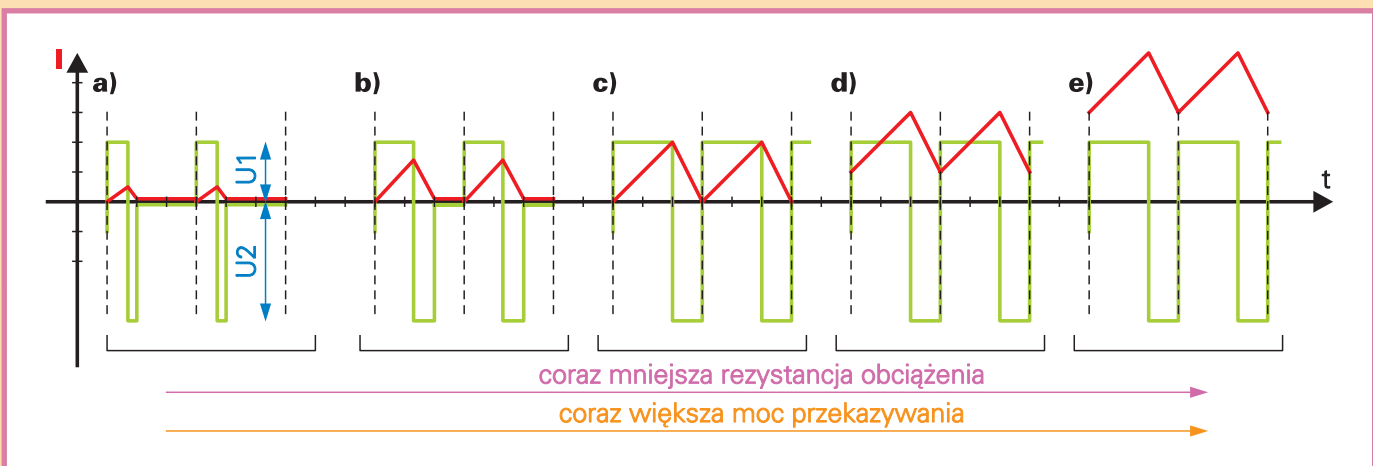
Może jednak papierowe wyliczenia do Ciebie nie przemawiają i nadal nie czujesz tego intuicyjnie (zwłaszcza sytuacji na rysunku 17d i 17e). Nie dziwię Ci się! Gdyby to było takie oczywiste, przetwornice nie byłyby otoczone aurą tajemniczości.

Dlatego poświęćmy tej sprawie więcej uwagi.

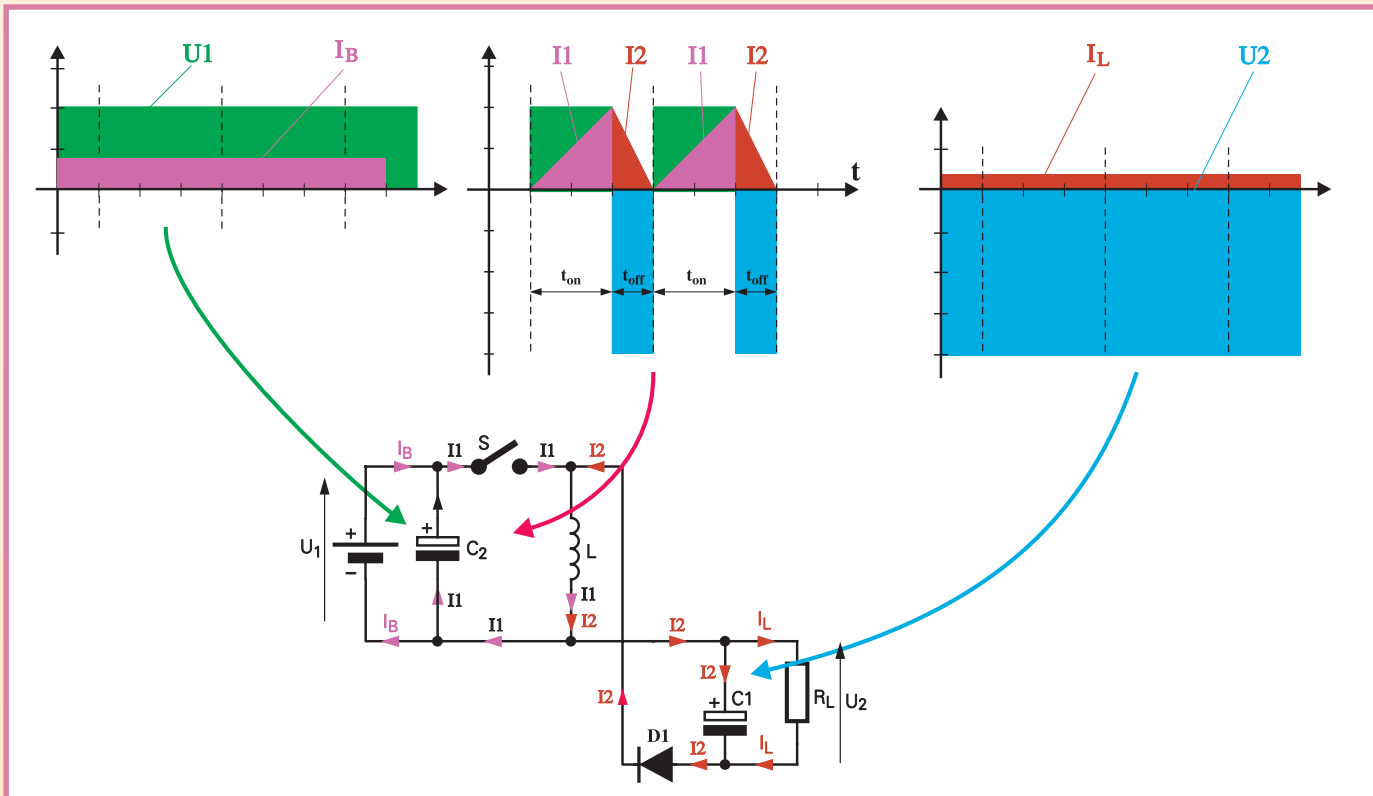
Kiedyś porównałem pracę przetwornicy do przelewania wody z jednego dużego naczynia do drugiego za pomocą butelki. W najprostszym przypadku, podczas każdego cyklu nabieramy jakąś ilość wody i całą tę wodę przelewamy do drugiego naczynia. Na koniec cyklu butelka jest pusta. Teraz wyszło na jaw, że nie warto za każdym razem wylewać z butelki wszystkiej wody. Oplaci się pozostawić część tej wody w butelce, a za to zwiększyć ilość cykli. Okazało się, że ta „butelka” w przetwornicy indukcyjnej ma dziwne właściwości, nie do końca znajdujące odpowiednik hydrauliczny. Mianowicie jeśli butelka (cewka) zawiera dużo wody (energii), to nalewanie i wylewanie tej wody następuje zdecydowanie szybciej niż w przypadku, gdy butelka jest prawie pusta. Niestety, analogia hydrauliczna okazała się zbyt prosta, żeby wyjaśnić szczegóły. Przy analizie pracy przetwornicy musimy uwzględnić, że liniowy wzrost prądu powoduje zwiększenie energii w cewce proporcjonalne do drugiej potęgi prądu.

Prąd i moc

Ponieważ rzeczywiście nie jest to łatwe do intuicyjnego pojęcia, a nie nasuwa mi się żadna prosta i dokładna analogia, jeszcze raz wróc do rysunków 17 i 13. Cały czas rozważamy tu idealną sytu-



Rys. 17



Rys. 18

ację teoretyczną, nie zastanawiając się nad rezystancją uzwojenia cewki (pomijamy ją) i sposobem realizacji klucza (w praktyce jest to jakiś tranzystor). Gdyby cewka i klucz były idealne, a na diodzie nie występowałby spadek napięcia, wtedy przetwornica miałaby sprawność 100% - cała energia (moc) pobrana ze źródła zasilania byłaby przekazana do obciążenia. Praktyczne przetwornice nie mają oczywiście sprawności 100%, ale często sprawność przekracza 90%, co jest świetnym wynikiem. Na razie kwestię sprawności pomijamy, bo chcemy zgłębić jedynie podstawowe zależności. Rozważamy hipotetyczną przetwornicę z idealnymi elementami. Bez żadnych strat. W takiej przetwornicy moc pobrana ze źródła zostaje w całości dostarczona do obciążenia. Moc pobierana ze źródła to $P1 = U1 \cdot I_B$ gdzie I_B to średni prąd pobierany z baterii. Moc dostarczona do obciążenia to $P2 = U2 \cdot I_L$. W przetwornicy idealnej $P1 = U1 \cdot I_B = U2 \cdot I_L = P2$.

Jeśli rezystancja R_L się zmniejsza, to do obciążenia trzeba dostarczyć większą moc, czyli przy ustalonym napięciu wyjściowym $U2$ musi rosnąć prąd wyjściowy I_L . Oczywiście jednocześnie będzie rósł prąd wejściowy I_B (przy stałym napięciu wejściowym $U1$). **Rysunek 18** pokazuje trasy prądów i miejsca występowania napięć (nadal pomijamy spadek napięcia na diodzie D1). Fioletowym kolorem zazna- czyłem ci prąd wejściowy, czerwonym prąd wyjściowy. Na górze rysunku 18 za-

znaczone są przykładowe przebiegi. Prąd płynący przez cewkę możemy podzielić na dwa prądy: ładowania ($I1$) i rozładowania ($I2$). Mają one charakter impulsowy i oczywiście interesuje nas nie szczytowa wartość prądu, tylko wartość średnia. Co oczywiste, wypadkowa wartość tego impulsowego prądu ładowania ($I1$) musi być równa średniej wartości prądu pobieranego z baterii (I_B). Analogicznie wypadkowa wartość impulsowego prądu rozładowania $I2$ musi być równa prądowi stałemu płynącemu przez rezystor R_L .

Ktoś mógłby zaprotestować, że przecież przez cewkę płynie „prąd wspólny”, czyli prąd wejściowy $I1$ musi być równy prądowi wyjściowemu $I2$. Takie wyobrażenie jest błędne i prowadzi do fałszywych wniosków.

Choć rzeczywiście wartości prądu na początku i końcu ładowania oraz rozładowania są takie same (ciągłość prądu w cewce), nas interesuje uśredniona wartość prądu w dłuższym okresie czasu. Pamiętaj, że prąd wejściowy zamyka się w innym obwodzie niż prąd wyjściowy. Pokazuje to rysunek 18. Jeśli masz wątpliwości, dodatkowo narysujemy oddzielne prądy ładowania i rozładowania (**rysunek 19**), to już nie możesz mieć wątpliwości, że prąd I_B jest równy średniej wartości prądu ładującego $I1$, a prąd obciążenia I_L jest równy średniej wartości impulsowego prądu rozładowania $I2$. Tym samym prądy I_B oraz I_L nie muszą być równe. Zauważ, że równe są tu tylko moce ($P1=P2$). Zazwyczaj $U1$ nie równa się $U2$

i tym samym prąd $I1$ nie jest równy $I2$. Zgadza się?

Oczywiście cały czas zakładamy, że przetwornica pracuje bez żadnych strat i $P1 = P2$.

Transformator prądu stałego?

Uważaj teraz! Rysunki 18 i 19 udowadniają, że omawiana przetwornica jest swego rodzaju „transformatorem prądu stałego”. W (idealnym) transformatorze prądu zmiennego także równe są moce pierwotna i wtórna, a stosunek napięć i prądów zależy od przekładni transformatora. Dla idealnego transformatora obowiązują zależności

$$P1 = U1 \cdot I1 = U2 \cdot I2 = P2$$

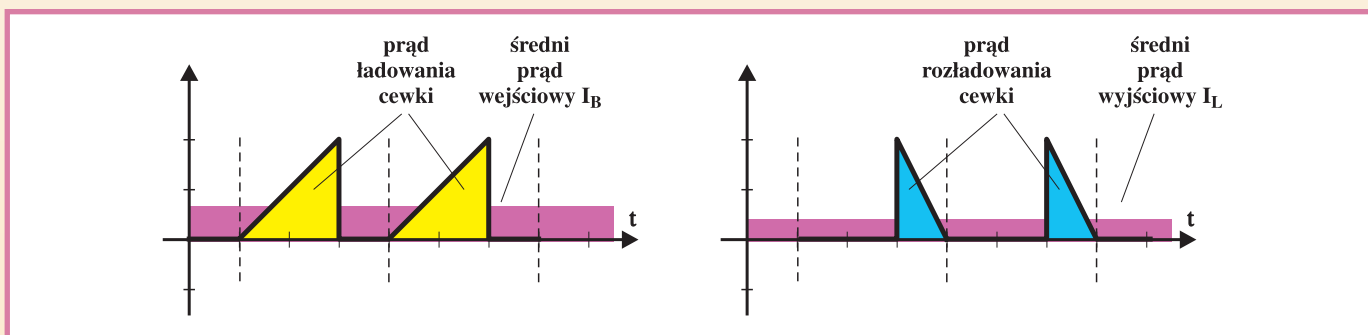
co można zapisać:

$$U1/U2 = I2/I1$$

O dziwo, podobnie jest w (idealnej) przetwornicy! W klasycznym transformatorze przekładnia wyznaczona jest stosunkiem liczby zwojów uzwojenia pierwotnego i wtórnego. Czy już widzisz, tak to jest z „przekładnią” przetwornicy zaparowej?

Nie?

Rysunek 17 wskazuje, że przy małych prądach obciążenia (przebiegi a, b) napięcie wyjściowe regulowane jest współczynnikiem wypełnienia impulsów kluczujących. **Jednak przy większych prądach obciążenia (przebiegi c, d, e) współczynnik wypełnienia jest stały!** Prąd rośnie, amplituda jego wahań nie rośnie,



Rys. 19

napięcia są takie same, a współczynnik wypełnienia nie zmienia się.

Nadążasz? Nie?

To jeszcze raz wróć do rysunku 17. Zwróć uwagę na bardzo ważną zależność. Nieprzypadkowo w tym odcinku i w poprzednim do zbudowania powtarzałem Ci, że szybkości narastania i opadania prądu wyznaczone są przez napięcia wejściowe i wyjściowe zgodnie ze wzorem $U=L \cdot (\Delta I/\Delta t)$, który w pewnych sytuacjach możemy uprościć do postaci $U=L \cdot I / t$. Przy ustalonych wartościach napięć U_1 i U_2 stosunek czasu ładowania do czasu rozładowania zawsze jest stały i nie zależy od wartości prądu obciążenia. Sprawdź to na rysunku 17 oraz wcześniejszych rysunkach 7...13.

Jaki to ma być współczynnik wypełnienia? Pomyśl chwilę...

Tak jest! Współczynnik wypełnienia w trybie z rysunku 17bcd wyznaczony jest nie przez potrzebny prąd czy moc, tylko przez stosunek napięć wejściowego i wyjściowego. I oto masz „przekładnię” przetwornicy zaporowej!

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

Jeśli chciałbyś wyliczyć to matematycznie, samodzielnie rozpisz i przekształć wzór na zmianę wartości prądu w cewce ΔI w czasie t_{on} i t_{off} .

Czy wzór na „przekładnię” przetwornicy odwracającej to tylko ciekawostka? Nie! Do tej pory wydawało Ci się, że w każdej przetwornicy niezbędny jest blok płynnej regulacji współczynnika wypełnienia impulsów sterujących. Teraz okazało się, że jeśli mielibyśmy stabilizowane napięcie wejściowe, a chcielibyśmy uzyskać stabilne napięcie wyjściowe, to wcale nie musielibyśmy stosować bloku regulacji współczynnika wypełnienia impulsów, takiego jak na rysunku 7 (w poprzednim odcinku)! Wystarczyłoby zastosować generator o stałym współczynniku wypełnienia! Ale uważaj z jednym zastrzeżeniem: taka prosta przetwornica „o stałej przekładni” nie mogłaby prawidłowo pracować przy małych prądach wyjściowych.

Czy to do Ciebie naprawdę dotarło? Przeanalizuj to jeszcze raz samodzielnie,

rozważ różne przypadki i sprawdź, czy rzeczywiście wszystko „trzyma się kupy”. Przy okazji znajdziesz wyjaśnienie, dlaczego w licznych źródłach omawiających temat przetwornic mówi się o minimalnym prądzie obciążenia (bądź o minimalnej indukcyjności). Teraz już rozumiesz, że w zasadzie dotyczy to prostych przetwornic „o stałej przekładni”, nie wyposażonych w układ regulacji współczynnika wypełnienia wg rysunku 6b. Piszę „w zasadzie”, bo sprawa jest bardziej złożona. Napięcie wejściowe (napięcie akumulatora czy wyprostowane napięcie sieci) nie jest stabilne i zmienia się w granicach nawet kilkudziesięciu procent, więc przy stałej „przekładni” (czyli stałym współczynniku wypełnienia) napięcie wyjściowe również wahałoby się w takich samych granicach. Już z tego względu trzeba stosować blok płynnej regulacji porównujący napięcie wyjściowe z jakimś stabilnym napięciem odniesienia. Przy obecnym stanie techniki nic nie stoi na przeszkodzie, by stosować układy elektroniczne regulujące płynnie współczynnik wypełnienia impulsów sterujących kluczem (tranzystorem). Umożliwia to poprawną pracę zarówno w trybie z całkowitym uwalnianiem

z energii

(rys 17a, b), jak i w trybie, w którym prąd i energia nie zmniejszają się do zera (rys. 17c, d, e)

Z pewnych względów konstruktorzy preferują przetwornice, w których w normalnych warunkach pracy prąd cewki nie maleje do zera. Wtedy bowiem niektóre właściwości przetwornicy są lepsze niż w sytuacji, gdy prąd i energia cewki maleją do zera. W następnym odcinku przyjrzemy się tej sprawie z jeszcze innej strony.

Piotr Górecki