

Fundamenty Elektroniki

Zaprojektowanie zasilacza impulsowego licznym elektronikom wydaje się niewyobrażalnie trudnym zadaniem. Wielu z nich pamięta przeprowadzane kiedyś w szkole obliczenia, których prawdopodobnie wcale nie rozumieli. Przy lekturze niektórych książek na temat zasilaczy impulsowych i przetwornic też odnosi się wrażenie, że autor nie starał się, żeby czytelnicy zrozumieli zagadnienie. Tymczasem obecnie na rynku dostępne są gotowe dławiki o znanych parametrach, dzięki czemu wykonanie prostej przetwornicy przestało być problemem. Niezbędne obliczenia wcale nie są trudne. Można zresztą pominąć obliczenia i dobrać parametry układu eksperymentalnie. Trzeba tylko dobrze rozumieć zasadę działania takich układów.

W jednym z najbliższych numerów EdW przedstawiony będzie układ służący do pomiaru cewek (dławików) do przetwornic. Znajdziesz tam wszystkie wskazówki potrzebne do doświadczalnego dobrania dławika do przetwornicy o dowolnych parametrach. Natomiast w kilku najbliższych Listach od Piotra szczegółowo i przystępnie omówione zostaną podstawowe rodzaje przetwornic.

Aby prawidłowo zaprojektować cewkę do przetwornicy indukcyjnej, albo dobrać taką cewkę eksperymentalnie, wystarczy znać kilka podstawowych zasad. Większość z nich była podana w poprzednich moich listach publikowanych w EdW mniej więcej przed rokiem. Ponieważ było to dość dawno, w telegraficznym skrócie przypomnę co najważniejsze. Przypomnę prosty przykład kondensatora i przetwornicy pojemnościowej (garnka z wodą stojącego pod kranem), a to dlatego, że działanie kondensatora (i garnka z wodą) rozumie i "czuje" każdy. Potem łatwo "przeskoczysz" do przetwornicy indukcyjnej.

Przetwornica pojemnościowa

Jeśli przez kondensator popłynie prąd stały o ustalonej wartości, to napięcie na tym kondensatorze będzie wzrastać liniowo. Tak samo garnek postawiony pod lekko odkręcony kran będzie się stopniowo wypełniał wodą. Szybkość narastania napięcia na kondensatorze (poziomu wody w garnku), będzie oczywiście wprost proporcjonalna do wartości płynącego prądu, a odwrotnie proporcjonalna do pojemności. W konkretnym kondensatorze (garnku) jednorazowo możemy zmagazynować co najwyżej określoną ilość ener-

Przetwornice impulsowe

Podstawowe konfiguracje - przetwornica zaporowa

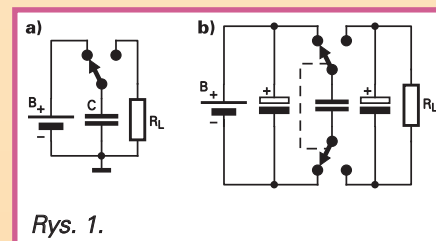
część 1

gii (wody), bo więcej "nie wejdzie". Napięcie (poziom wody) nie może rosnąć nieograniczenie, bo nastąpi przebiecie kondensatora (przelewanie czyli marnowanie wody). Dla każdego kondensatora możemy więc określić maksymalne napięcie (a dla garnka - maksymalny poziom wody). W naładowanym kondensatorze (napełnionym garnku) gromadzi się pewna ilość energii (wody). Energia ta jest proporcjonalna do pojemności i napięcia:

$$E = C \cdot U^2 / 2.$$

Naładowany w ten sposób kondensator dołączamy teraz do obciążenia np. do rezystora. Przez rezystor przez chwilę popłynie prąd - energia zgromadzona w kondensatorze zostaje przekazana do obciążenia. Za chwilę rozładowany kondensator znów ładujemy jak poprzednio, potem rozładowujemy przez rezystor obciążenia, itd. Przetwornica pojemnościowa pracuje.

Rysunek 1 pokazuje dwa przykłady realizacji "ręcznej" przetwornicy pojemnościowej. Generalną ideą jest gromadzenie energii w kondensatorze, a potem



Rys. 1.

przekazywanie jej do obciążenia.

W popularnym stwierdzeniu "z cewkami jest tak samo jak z kondensatorami, tylko na odwrot" nie ma przesady. Dla indukcyjności zasady są podobne jak dla pojemności, tylko napięcie i prąd niejako "zamieniają się miejscami". Cewkę podłączamy więc do źródła stałego napięcia, a nie jak poprzednio prądu. Napięcie na kondensatorze rosło liniowo, teraz w cewce liniowo rośnie prąd. Analogicznie jak poprzednio, prąd nie może rosnąć nieskończenie. Na pewno jego wartość ograniczy rezystancja uzwojenia rzeczywistej cewki ($I_{max} = U/R$), ale w praktyce już przy mniejszym prądzie I_p nasyci się rdzeń (o zjawisku nasycenia mówiliśmy

szeroko przed rokiem). Doszliśmy do kluczowej zasady: każda cewka, identycznie jak każdy kondensator, jednorazowo może zmagazynować co najwyżej pewną określoną ilość energii.

Maksymalna ilość energii, jaka jednorazowo może być zmagazynowana w danej cewce wynosi:

$$EL = L \cdot (I_p)^2 / 2$$

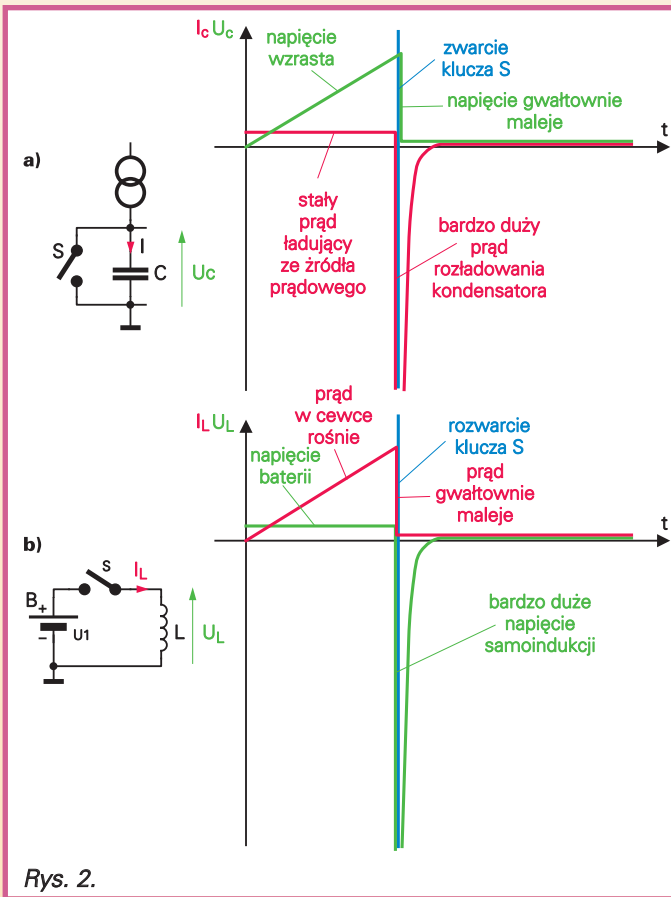
gdzie L to oczywiście indukcyjność, a I_p to maksymalny (szczytowy - ang. peak) prąd, nie powodujący nasycenia rdzenia. Jak pamiętasz, dalsze zwiększenie prądu nie zwiększy ilości zgromadzonej energii, ponieważ nasycenie rdzenia powoduje gwałtowne zmniejszenie indukcyjności. Wyjaśniałem Ci to obszernie przed rokiem i (ku Twej szczerzej radości) nie będziemy do tego wracać.

W każdym razie tak jak kluczowymi parametrami kondensatora jest pojemność i napięcie maksymalne, tak dla cewki są to indukcyjność i prąd maksymalny I_p (tuż przed progiem nasycenia), a dodatkowo rezystancja drutu uzwojenia.

Podobnie jak w przetwornicy pojemnościowej, ogólna zasada działania większości przetwornic indukcyjnych jest beznadziejnie prosta: indukcyjność jest na przemian ładowana ze źródła zasilania i rozładowywana w obwodzie obciążenia. Za chwilę omówimy różne przykłady realizacji przetwornic, ale najpierw fundamentalna zasada.

Kondensatory "nie lubią" szybkich zmian napięcia. Jeśli spróbujesz szybko zmienić napięcie na kondensatorze, to zareaguje on gwałtowną zmianą prądu. Ta szybka zmiana napięcia na kondensatorze to na przykład... zwarcie jego końcówek grubym drutem. Co się stanie? Popłynie przez chwilę prąd zwarcia o dużej wartości. Proste! Ilustruje to **rysunek 2a**.

To, że kondensatory reagują gwałtowną zmianą prądu jest zrozumiałe, ale nie dla wszystkich jest oczywiste, że cewki reagują gwałtowną zmianą napięcia. Ty musisz to bardzo dobrze rozumieć! Jeśli tego nie "poczujesz", nie poznasz zasady działania przetwornic indukcyjnych. Skoncentruj się! To wcale nie jest trudne! Cewki "nie znoszą" szybkich zmian



Rys. 2.

prądu i reagują na nie gwałtowną zmianą napięcia (lub pojawieniem się napięcia wskutek zjawiska samoindukcji).

Rysunek 2b pokazuje obwód ładowania cewki L ze źródła U_1 . Po zamknięciu przełącznika S prąd liniowo wzrasta i w cewce gromadzi się energia. W chwili otwarcia przełącznika S obwód prądu zostaje przerwany i prąd nagle maleje do zera (tak samo jak w kondensatorze przy zwarciu napięcie mała do zera). Kondensator zareagował gwałtowną zmianą prądu, cewka reaguje gwałtowną zmianą napięcia. Czy czujesz to podobieństwo między kondensatorem i cewką? Przemysł dokładnie przykłady z rysunku 2.

Ponieważ cewka "nie znosi" gwałtownych zmian prądu, "zrobi wszystko", by prąd płynął nadal w tym samym kierunku. To "zrobienie wszystkiego" to właśnie samoczynne powstanie napięcia o takim kierunku i biegunowości, by podtrzymać przepływ prądu.

W przypadku układu z rysunku 2b obwód jest przerywany definitywnie, więc cewka, choć wysila się jak może i wytwarza bardzo wysokie napięcie, nie podtrzyma przepływu prądu. W praktycznych układach przetwornic układ jest zaprojektowany tak, by po otwarciu klucza S prąd dalej płynął przez cewkę w tym samym kierunku, tylko zamykał się w innym obwodzie. Najprostszy przykład takiego układu znajdziesz na **rysunku 3**. Gdy klucz

jest zwarty, prąd liniowo wzrasta i cewka gromadzi energię. Po otwarciu klucza cewka chcąc podtrzymać przepływ prądu wytwarza napięcie samoindukcji. Na cewce zaindukuje się napięcie o takiej wartości i biegunowości, by podtrzymać ciągłość prądu.

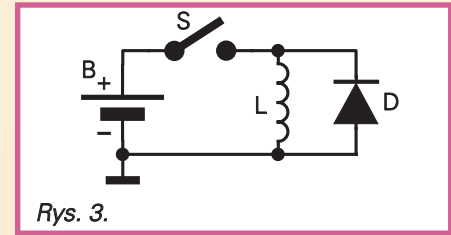
Początkujący zawsze w tym miejscu pytają: skąd cewka wie, jakie ma być na niej napięcie? Otóż cewka niczego nie musi "wiedzieć". Ona po prostu chce podtrzymać przepływ prądu. Żeby to uzyskać, wytwarza napięcie samoindukcji, ale napięcie samoindukcji powstaje tylko wtedy, gdy zmienia się prąd... Wytwarza się więc stan równowagi: prąd maleje dokładnie w takim tempie, by indukowane napięcie podtrzymywało jego przepływ. Prąd płynie, jego wartość stopniowo maleje - cewka oddaje zgromadzoną energię.

Hm... nie jesteś pierwszy, który pyta, co tu jest przyczyną, a co skutkiem. Na razie nie martw się tym - szczegóły wyjaśnią się za chwilę (a może już wiesz?). W tej chwili nie musisz tego rozumieć, wystarczy, że zrozumiesz prostą zależność między indukowanym napięciem wyjściowym a szybkością zaniku prądu - czym wyższe napięcie wyjściowe, tym prąd szybciej zanika i czas rozładowania jest krótszy.

I tu dochodzimy do kluczowej zależności, którą musisz sobie dobrze przyswoić. Wyrażają ją szkolny wzór $U = L \cdot (dI/dt)$, który w przypadku liniowych zmian prądu możemy napisać prościej $U = L \cdot (\Delta I/\Delta t)$, a nawet jeszcze prościej $U = L \cdot I / t$.

Uważaj - zależność ta obowiązuje zarówno przy ładowaniu, jak i przy jej rozładowaniu.

Z ładowaniem chyba nie masz problemów - napięcie zasilające wyznacza szybkość narastania prądu - czym większe napięcie baterii, tym szybciej rośnie prąd.



Rys. 3.

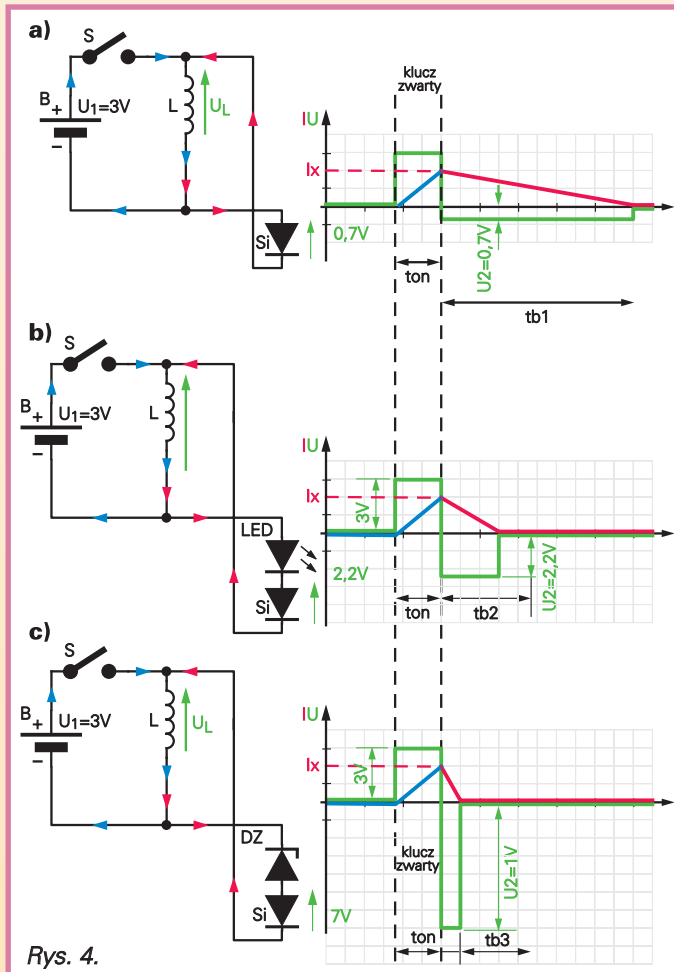
Analogicznie przy rozładowaniu: czym wyższe napięcie się indukuje, tym szybciej zanika prąd (albo inaczej: czym szybciej zanika prąd, tym wyższe napięcie się indukuje). Właśnie dlatego przy gwałtownym przerywaniu prądu, zgodnie ze wzorem $U = L \cdot I / t$, w cewce wytwarza się tak duże napięcie samoindukcji (rys. 2b).

W układzie z rysunku 3 i **4a** (typowy obwód ochronny przekąźnika), po przerywaniu prądu zaindukuje się napięcie równe jedynie spadkowi napięcia na przewodzącej diodzie, czyli około 0,6...0,7V. Właśnie tyle wystarczy, żeby podtrzymać przepływ prądu. Ponieważ wytworzone napięcie jest małe, prąd będzie małał powoli. W układzie z rysunku **4b** aby zachować ciągłość prądu, indukowane napięcie musi być większe. Jeśli indukowane napięcie jest większe, to prąd będzie szybciej zanikał. Analogicznie w układzie z rysunku **4c**, indukowane napięcie musi być jeszcze większe i prąd będzie szybko zanikał. Celowo narysowałem schematy trochę dziwnie - za chwilę przekonasz się dlaczego.

Może też jesteś trochę zdziwiony, dlaczego we wszystkich trzech przypadkach napięcie wyjściowe jest niezmiennie przez cały czas rozładowania. Decydują o tym właściwości obciążenia - diod, które w bardzo szerokim zakresie prądów mają prawie takie samo napięcie przewodzenia. Napięcie to nie jest wyznaczone przez cewkę - cewka "chce" jedynie, by przez obciążenie płynął prąd i wytwarza takie napięcie, by ten prąd płynął.

Zwróć uwagę, że w każdym z trzech przypadków szybkość narastania prądu (w czasie ton) jest taka sama. Jest ona wyznaczona przez przyłożone napięcie zasilania (3V) oraz indukcyjność cewki (wartość indukcyjności nie jest w tej chwili istotna), zgodnie ze znanym wzorem $U_1 = L \cdot I_x / t_{on}$. Szybkość zanikania prądu jest związana z indukowanym napięciem taką samą zależnością $U_2 = L \cdot I_x / t_{off}$.

Wszystko jest zgodne z intuicją: we wszystkich trzech przypadkach podczas ładowania prąd narownie do tej samej wartości I_x i w cewce zduży się zgromadzić taka sama porcja energii. Jeśli potem indukowane napięcie jest duże, to prądu "wystarczy" na krótko. Jeśli napięcie jest małe, to przy tej samej ilości zgromadzonej energii, prąd płynie przez czas dłuższy.



No i jak ci idzie? Jeśli za mną nadąszas, to właśnie uczyniłeś ważny krok naprzód! Poznałeś jedną z najważniejszych zależności. Teraz bierzemy się za podstawowe układy pracy przetwornic indukcyjnych. Zaczniemy od bodaj najprostszej - przetwornicy odwracającej.

Przetwornica odwracająca

Przetwornica odwracająca nazywana jest często zaporową (ang. flyback converter, buck-boost converter, inverting switching regulator). Uproszczony schemat takiej przetwornicy pokazany jest na **rysunku 5**.

Po zamknięciu (zwarciu) klucza S na czas t_{on} , przez dławik L płynie narastający prąd I_1 - w dławiku gromadzi się porcja energii. Po otwarciu klucza S w dławiku indukuje się napięcie o przeciwnej biegunowości (mówiliśmy, że cewki nie znoszą nagłych zmian prądu) i prąd nadal płynie w tym samym kierunku, zamykając się w obwodzie L, C1, R_L , D1. Prąd ten maleje, i zgromadzona porcja energii zostaje przekazana do kondensatora filtrującego C i dalej do obciążenia R_L . Załóżmy, że kondensator C1 już jest naładowany i na wyjściu panuje jakieś napięcie. Jeśli pojemność kondensatora filtrującego C1 będzie odpowiednio duża, to dostarczenie (niewielkiej) porcji ładunku z dławika

spowoduje bardzo niewielki przyrost napięcia na kondensatorze, czyli napięcia wyjściowego. Możemy przyjąć (co jest bardzo bliskie prawdy), że napięcie na kondensatorze C1 w czasie pracy jest niezmiennie, tak samo prąd płynący przez obciążenie R_L to najprawdziwszy prąd stały, a nie jakiś przebieg impulsowy. Niewielkie tętnienia napięcia U_2 pomijamy - będą tym mniejsze, im większa będzie pojemność C1. Podobnie możemy traktować kondensator C2 umieszczony na wejściu. Nie jest on niezbędny, ale dla lepszego pokazania zasady działania układu załóżmy (co w praktyce też jest bliskie prawdy), że kondensator ten jest źródłem zasilania

w chwili włączenia klucza S, czyli prąd ładowania cewki L1 płynie w obwodzie C2, S, L. Napięcie na kondensatorze C2 (o wielkiej pojemności) cały czas jest równe napięciu baterii (U_1). Tak rozumiejąc rolę kondensatora C2 możemy przyjąć, iż prąd I_B pobierany z baterii (podobnie jak prąd obciążenia I_L) jest najprawdziwszym prądem stałym, a nie jakimś przebiegiem impulsowym.

Odnotujmy, iż energia pobierana jest z kondensatora C2 gdy klucz S jest zamknięty, a przekazywana jest do kondensatora C1 i dalej do obciążenia w czasie, gdy klucz S jest otwarty. Ponieważ energia przekazywana jest przy rozwarciu klucza, przetwornica nazywana jest zaporową. Nie muszą chyba przypominać, że napięcie wyjściowe ma biegunowość odwrotną niż napięcie wejściowe. Stąd inna często spotykana nazwa - przetwornica odwracająca.

Spróbuj zrozumieć jej działanie, mając na uwadze przenoszoną moc. Na chwilę załóż-

my, że elementy przetwornicy są idealne i nie występują w nich żadne straty. Moc pobierana z baterii ($P=U_1 \cdot I_B$) w całości będzie dostarczana do obciążenia R_L . Na kondensatorze C1 oraz rezystancji obciążenia wystąpi napięcie stałe U_2 i popłynie stały prąd I_L . Moc wyjściowa wyniesie na pewno $P = U_2 \cdot I_L$.

Napięcia i prądy U_1 , U_2 , I_B , I_L są napięciami i prądami stałymi. Natomiast w przetwornicy występują napięcia i prądy o charakterze impulsowym, a energia przekazywana jest na wyjście porcjami. Przy założeniu, że w każdym cyklu cała zgromadzona w cewce energia jest przekazywana na wyjście, moc przetwornicy z rysunku 5 obliczamy z prostego wzoru $P = f \cdot E = f \cdot L \cdot I^2 / 2$, gdzie f - częstotliwość, I - szczytowa wartość prądu w cewce.

Przy danym napięciu zasilania U_1 i jakiejś indukcyjności L, prąd w cewce będzie narastał ze stałą prędkością i narownie po czasie t_{on} do wartości $I = U_1 \cdot t_{on} / L$.

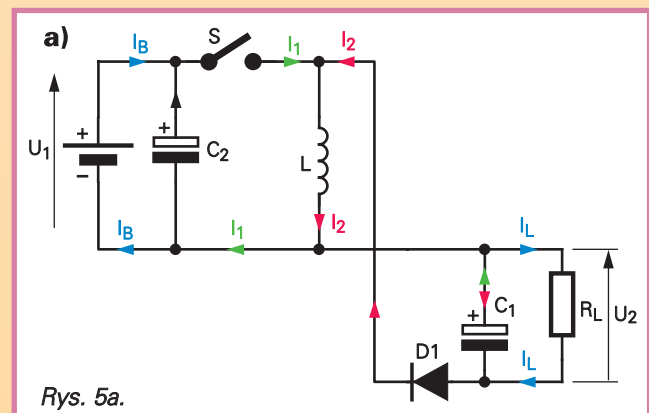
Po podstawieniu i przekształceniach: $P = [0,5f \cdot (U_1)^2 \cdot (t_{on})^2] / L$.

Jak wynika z wzoru, przy stałej częstotliwości f przenoszona moc zależy od czasu włączenia klucza, czyli inaczej mówiąc, od współczynnika wypełnienia impulsów sterujących. Nie musisz nawet analizować podanych wzorów, bo chyba czujesz to intuicyjnie - czym dłuższy czas włączenia, tym więcej energii zgromadzi się w cewce i tym większa moc zostanie przekazana do obciążenia. Ilustruje to **rysunek 5b**

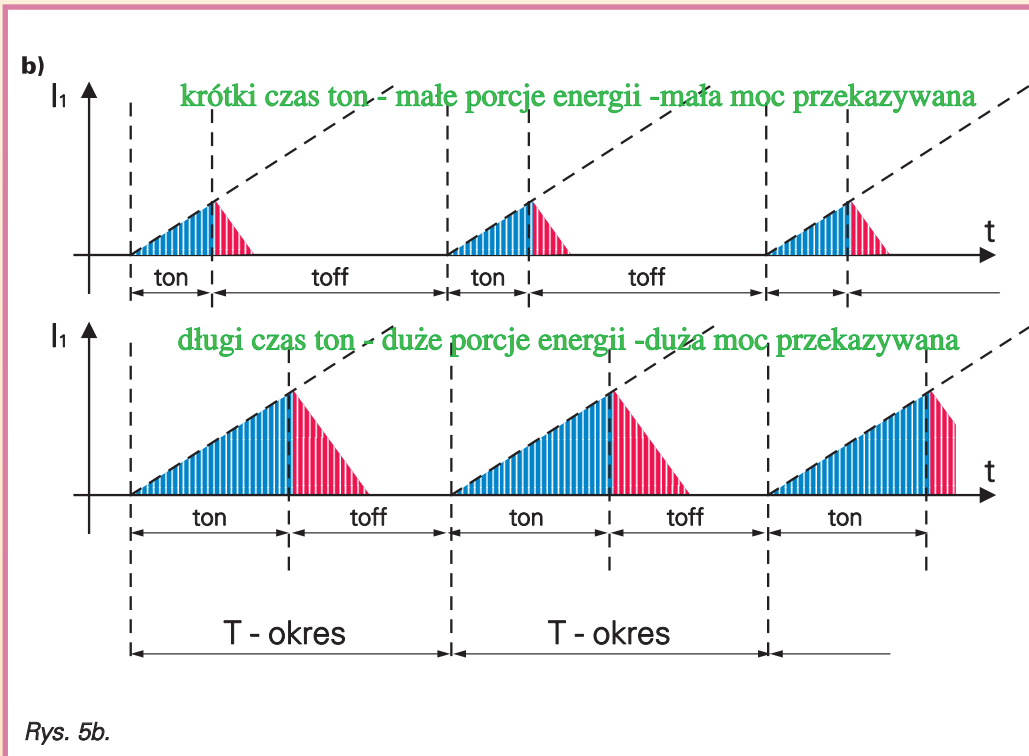
Z tą mocą chyba nie masz kłopotów. Ale jakie będzie napięcie wyjściowe?

Jak mówiliśmy przed chwilą, po rozwarciu klucza S na cewce może indukować się napięcie o różnej wartości. Może być ono mniejsze od napięcia wejściowego, albo od niego większe - wszystko zależy od obciążenia. W przypadkach z rysunku 4 było wyznaczone przez napięcie przewodzenia diod. A teraz, gdy obciążeniem jest rezystor?

Nie zapominaj, że na wyjściu włączony jest kondensator C1 o dużej pojemności,



Rys. 5a.



Niech na początek rezystancja obciążenia R_L ma, powiedzmy, $2k\Omega$. Najważniejsze przebiegi w układzie z rysunku 6a będą wyglądać jak na **rysunku 7**. Układ regulacyjny tak dobierze współczynnik wypełnienia impulsów, by napięcie indukowane na cewce po rozwarciu klucza wynosiło właśnie 20V (pomijamy tu napięcie przewodzenia diody D1 - w rzeczywistym układzie będzie to około $20V+0,7V$). Porcja energii będzie przekazywana do kondensatora C1 tylko w czasie zanikania prądu. Ale to wystarczy, bo kondensator zgromadzi tę energię i stopniowo będzie ją przekazywał do obciążenia R_L . Ustali się równowaga: w każdym cyklu pracy do kondensatora C1 będzie przekazana taka porcja energii, by przy rezystancji

który jest magazynem energii. Dzięki temu napięcie U_2 i prąd obciążenia I_L są stałe. Skoncentruj się - weź pod uwagę moc. Jeśli czas ton jest krótki i na wyjściu przekazywana jest niewielka moc P1, to stałe napięcie wyjściowe U_2 ustali się na takiej (niewielkiej) wartości, żeby $P1=U_2 \cdot I_L = (U_2)^2 / R_L$. Jeśli czas zwarcia klucza będzie dłuższy i przekazywana moc P2 będzie większa, to na wyjściu napięcie wzrośnie. Wzrośnie też prąd wyjściowy I_L by $P2=U_2 \cdot I_L$.

Już chyba zauważyłeś, że stałe napięcie wyjściowe na rezystancji R_L możemy regulować w bardzo prosty sposób, zmieniając czas ton, czyli współczynnik wypełnienia impulsów sterujących pracą klucza (porównaj rys. 5b). Zwiększając współczynnik wypełnienia zwiększysz moc przenoszoną, a tym samym napięcie na rezystancji obciążenia wzrośnie.

W praktyce chodzi nam raczej o utrzymanie stałej wartości napięcia wyjściowego U_2 , także wtedy, gdy obciążenie będzie się zmieniać i gdy napięcie wejściowe będzie się wahać. Prześledźmy teraz, jak zmieniają się przebiegi w przetwornicy w takich sytuacjach. Zastosujemy przetwornicę zbudowaną według **rysunku 6a**. W roli klucza zastosujemy najzwyklejszy tranzystor PNP. Założmy, że napięcie zasilające wynosi 10V, a nam potrzebne jest napięcie wyjściowe 20V.

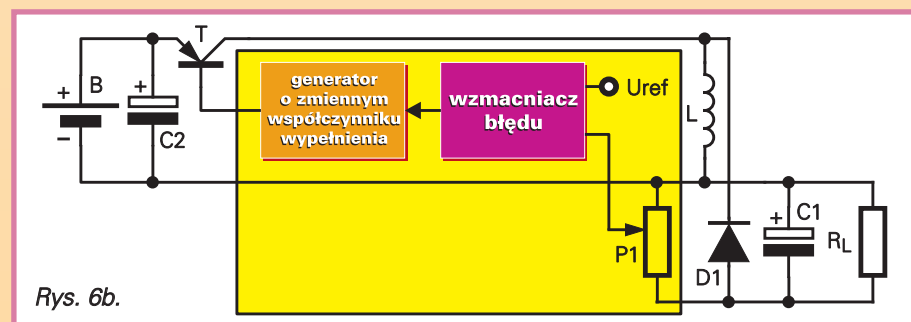
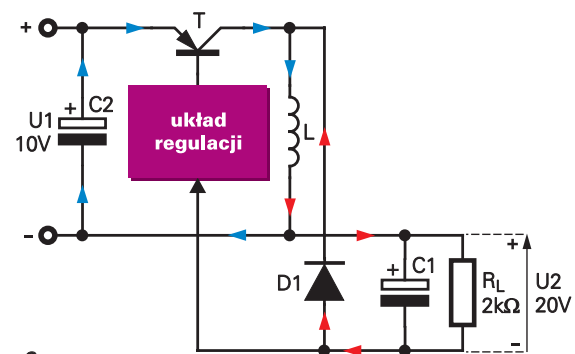
Może masz wątpliwości dotyczące obwodów regulacji napięcia wyjściowego. Nie, tu nie ma żadnej pułapki. W zasadzie moglibyśmy tu zastosować generator przebiegu prostokątnego o stałej częstotliwości i współczynniku wypełnienia

zmienianym ręcznie za pomocą potencjometru. My jednak od razu zautomatyzujemy przetwornicę. **Rysunek 6b** pokazuje z grubsza, jak może być zbudowany taki blok. Wzmacniacz błędów porównuje napięcie wyjściowe (zmniejszone w dzielniku z potencjometrem P1) ze stabilnym napięciem odniesienia U_{ref} . Jeśli napięcie wyjściowe U_2 zmniejsza się, współczynnik wypełnienia impulsów jest zwiększany. Jeśli napięcie wyjściowe rośnie - współczynnik wypełnienia jest

z m n i e j s z a n y. Szczegóły realizacji takiego układu nie są w tej chwili istotne. W każdym razie ostateczną wartość napięcia wyjściowego ustala się po prostu potencjometrem P1. Teraz wracamy do rysunku 6a.

$R_L=2k\Omega$ napięcie na wyjściu cały czas miało wartość 20V.

Jeśli w układzie z rysunku 6a przy tym samym obciążeniu $R_L=2k\Omega$ zwiększymy napięcie zasilania do powiedzmy 20V, to zwiększy się szybkość narastania prądu. Jeśli prąd w cewce będzie narastał szybciej, energia będzie się gromadzić szybciej. Gdyby po zwiększeniu napięcia wejściowego współczynnik wypełnienia impulsów sterujących pozostał taki sam, napięcie wyjściowe i prąd zwiększyłyby się.



Ale na wyjściu nadal ma być napięcie 20V i nadal potrzebna jest ta sama moc, więc układ regulacyjny zmniejszy czas włączania klucza, by porcje energii były takie jak poprzednio (taki sam prąd maksymalny) i by utrzymać na wyjściu nasze 20V. Układ i przebiegi pokazane są na **rysunku 8**.

Jeśli natomiast napięcie wejściowe zmniejszy się do, powiedzmy, 5V, to szybkość ładowania zmniejszy się i obwód regulacji zwiększy współczynnik wypełnienia, by utrzymać na wyjściu te nasze 20V - ilustruje to **rysunek 9**. Porównaj rysunki 7, 8, 9 i zobacz, że przy zmianach napięcia wejściowego (i stałym obciążeniu) zmienia się szybkość narastania prądu ładującego, natomiast po rozwarciu klucza cały czas indukuje się takie samo napięcie, a prąd zmniejsza się z taką samą szybkością.

Teraz przy napięciu wejściowym 10V zmniejszamy napięcie wyjściowe do powiedzmy 15V. Obecnie w cewce ma się indukować napięcie 15V (znów pomijamy napięcie przewodzenia diody D1). Przy stałej rezystancji obciążenia (2kΩ) potrzeba teraz mniej mocy. Zmieniamy ustawienie suwaka potencjometru umieszczonego w układzie regulacji. Układ regulacji zmniejsza współczynnik wypełnienia i napięcie wyjściowe zmniejsza się - przebiegi pokazuje **rysunek 10**.

Jeśli z kolei napięcie na wyjściu ma być wyższe, na przykład 25V, szybkość opadania prądu musi być większa. Ilustruje to **rysunek 11**.

Sprawdź, iż zarówno w fazie ładowania, jak i rozładowania cewki wszystko jest zgodnie ze wzorem

$$U=L \cdot I / t.$$

Czym większe napięcie, tym szybciej wzrasta (lub zmniejsza się) prąd.

Podsumowanie

A teraz sprawdź, czy dobrze rozumiałeś jak zmieniają się przebiegi przy zmianach napięć wejściowego i wyjściowego. Przy napięciu wejściowym równym 10V i wyjściowym 20V zmieniamy rezystor obciążenia z 2kΩ do 20kΩ. Czy potrafisz samodzielnie narysować przebiegi prądu i napięcia?

Napięcie wejściowe i wyjściowe są takie same jak na rysunku 7, więc zgodnie ze wzorem

$$U=L \cdot I / t.$$

szybkości narastania i opadania prądu też muszą być takie same jak na rysunku 7. Ponieważ jednak potrzebna moc jest mniejsza, blok regulacji zdecydowanie zmniejszy czas włączenia klucza. Przebiegi będą wyglądać mniej więcej tak, jak na **rysunku 12**.

I kolejny eksperyment - zamiast stałego rezystora obciążenia włączamy poten-

ciometr i stopniowo zmniejszamy jego rezystancję. Napięcie wejściowe nadal wynosi 10V, a blok regulacji ma trzymać napięcie wyjściowe równe 20V. Przy dużej rezystancji potencjometru przebiegi wyglądają jak na rysunku 12, przy mniejszej rezystancji jak na rysunku 7, a przy dalszym zmniejszaniu rezystancji kluczek będzie włączany na coraz dłużej.

Pamiętaj, że szybkość narastania i opadania prądu będą cały czas takie same. Przy jakiejś niewielkiej rezystancji obciążenia przebiegi osiągną kształt taki jak na **rysunku 13**.

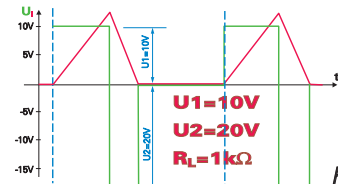
Część przetwornic spotykanych w praktyce pracuje w opisany właśnie sposób, a przebiegi wyglądają jak na rysunkach 7...13. Nie przejmuj się, że rezystancja R_L ma dużą wartość i przenoszona moc jest mała (mniej niż 1W). To tylko przykład do ćwiczeń. W praktyce będziesz budował przetwornice o znacznie większej mocy.

Mam nadzieję, że cały czas za mną nadążasz. Jeśli nie, przeanalizuj jeszcze raz dokładnie cały odcinek. A jeśli wszystko jest jasne, spróbuj odpowiedzieć na bardzo ważne pytanie: **co się stanie, jeśli w sytuacji z rysunku 13 jeszcze bardziej zmniejszymy rezystancję obciążenia?** Aby utrzymać napięcie wyjściowe na poziomie 20V potrzebna jest większa moc, czyli przy stałej częstotliwości w każdym cyklu trzeba przekazać większą porcję energii.

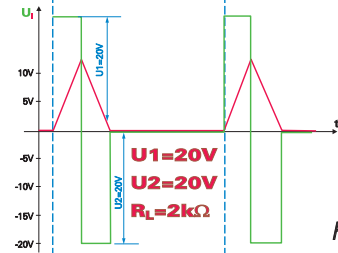
Czy to możliwe? Czy przetwornica nadal może poprawnie pracować? Czy po dalszym zmniejszeniu rezystancji napięcie wyjściowe spadnie? Czy kluczowym problemem i wąskim gardłem okaże się ograniczona szybkość narastania i opadania prądu, która w danym przypadku nie może być inna, bo jest wyznaczona przez indukcyjność L i napięcia wejściowe i wyjściowe? Czy jedynym sposobem poprawy sytuacji byłoby zwiększenie napięcia wejściowego? A może zmniejszyć częstotliwość? Czy przypadkiem prąd nie będzie rósł aż do nasycenia rdzenia? A może będzie jeszcze inaczej?

Kluczem do tej zagadki okaże się odpowiedź na pytanie: czy w każdym cyklu cewka musi oddać do obciążenia całą zgromadzoną energię? Tą sprawą zajmiemy się w następnym odcinku. Gorąco zachęcam Cię jednak, żebyś do tego czasu sam przemyślał ten problem i spróbował samodzielnie znaleźć rozwiązanie.

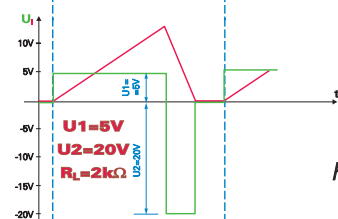
Piotr Górecki



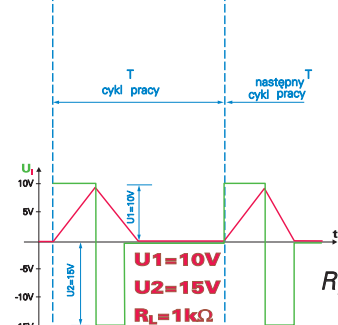
Rys. 7



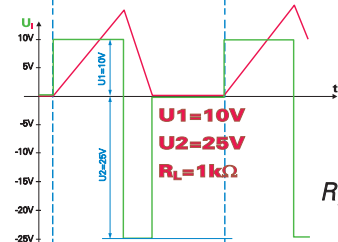
Rys. 8



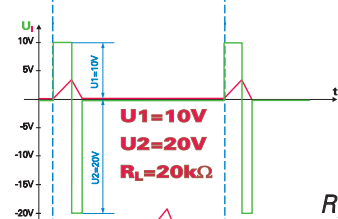
Rys. 9



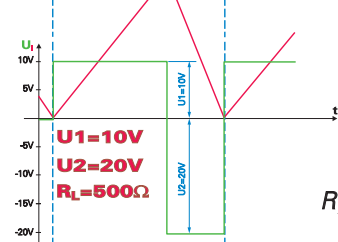
Rys. 10



Rys. 11



Rys. 12



Rys. 13