

Kondensatorowa przetwornica + 12 V/–12 V do samochodowych wzmacniaczy mocy

Artykuły publikowane w Praktycznym Elektroniku czasami mogą stanowić „natchnienie” dla elektroników. Przykładem jest zamieszczony poniżej artykuł który został zainspirowany fragmentem układu generatora funkcyjnego. Artykuł zawiera opis prostej i taniej przetwornicy kondensatorowej przeznaczonej do zasilania wzmacniacza samochodowego. Dlaczego przetwornica kondensatorowa? Ano dla tego, że zdecydowana większość „nie lubi cewek i kłopotów z nimi związanych” jak pisze sam autor artykułu. Artykuł zawiera także wiele ciekawych informacji na temat tranzystorów MOSFET, które są przydatne w zabawach z elektroniką.

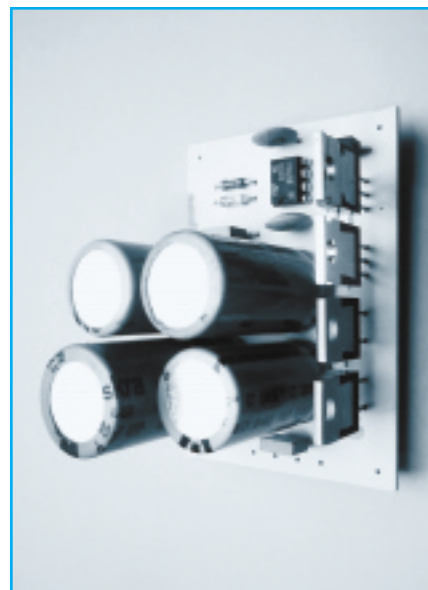
Przeglądając numery Praktycznego Elektronika znalazłem układ generatora funkcyjnego (PE 12/99), w którym zastosowano zasilanie +9 V. Ponieważ układ scalony generatora ICL 8038 wymaga napięcia zasilania ± 5 V w urządzeniu zastosowano prostą przetwornicę kondensatorową. Pomysł ten wydał mi się na tyle prosty i skuteczny, że postanowiłem zaprojektować i sprawdzić przetwornicę o znacznie większej mocy, zbudowaną także na kondensatorach. Przeznaczeniem tej przetwornicy był samochodowy wzmacniacz mocy napędzający subwoofer, czyli głośnik (zestaw) super niskotonowy. Oczywiście można ją wykorzystać także do innych celów.

Dlaczego przyjąłem takie nietypowe rozwiązanie? Pierwsze to niechęć do nawijania cewek i problemów z nimi związa-

nych. Drugie to próba maksymalnego ograniczenia kosztów wzmacniacza, gdyż wystarczająco dużym kosztem w instalacji nagłaśniającej samochodu są głośniki. O tym, że takie rozwiązanie jest realne przekonał mnie inny artykuł z PE w którym opisano monolityczne wzmacniacze mocy TDA 1562Q z pompą kondensatorową (PE 4/99). Wzmacniacze te są jednak bardzo drogie i wcale nie tak łatwo je kupić.

Przetwornice kondensatorowej dużej mocy można zbudować w prosty sposób dzięki dostępności i niskim cenom komplementarnych tranzystorów MOSFET o maksymalnych prądach drenu rzędu 20 i więcej Amperów. Zanim przystąpię do opisu układu, który jest naprawdę bardzo prosty, pragnę przekazać garść informacji o tranzystorach MOSFET, które są zapewne zagadką dla wielu Czytelników.

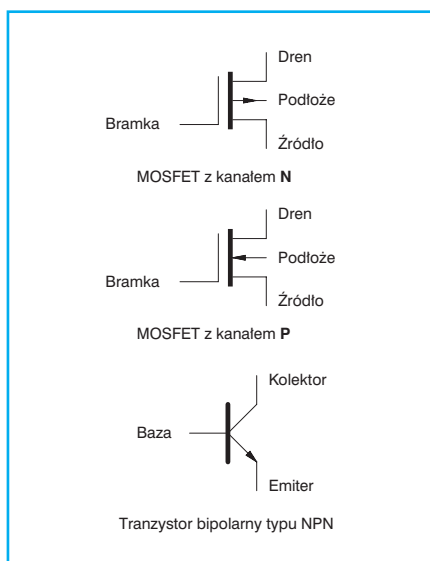
Tranzystory MOSFET (ang. Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor – Metal-Tlenek-Półprzewodnik Tranzystor z Efektem Polowym) zaliczają się do grupy tranzystorów polowych FET (ang. Field Effect Transistor – Tranzystor z Efektem Polowym). Podobnie jak tranzystory bipolarne (zwykle tranzystory znane zapewne każdemu elektronikowi) posiadają trzy końcówki. Wspólną cechą jest też spełniania przez nie funkcja wzmacniania sygnału. Na tym podobieństwa jednak się kończą. Tranzystory bipolarne pracują w oparciu o sterowanie prądowe. Wymuszenie niewielkiego prądu płynącego w obwodzie baza-emiter pociąga za sobą przepływ znacznie większego prądu pomiędzy kolektorem a emiterem. Jest to zatem sterowanie prądowe. Czyli klasyczny tranzystor bipolarny jest typowym



wzmacniaczem prądowym. Wzmocnienie napięciowe uzyskuje się dzięki umieszczeniu rezystorów w obwodzie bazy i kolektora, otrzymując w ten sposób wzmacniacz napięciowy. Nieco odmiennie sprawa wygląda w tranzystorach polowych, gdzie jak sama nazwa wskazuje sterowanie odbywa się przy pomocy pola elektrycznego. Elektroda sterująca nazywana jest bramką (odpowiednik bazy w tranzystorze bipolarnym) i do niej doprowadza się napięcie sterujące tranzystorem. Bramka pracuje bez przepływu prądu, napięcie doprowadzone do bramki sprawia, że w zależności od jego wartości zmienia się rezystancja kanału i związany z nią przepływ prądu w obwodzie dren-źródło (odpowiednik kolektora i emitera). Dren i źródło w tranzystorze polowym stanowią zakończenia kanału pośrodku którego umieszczona jest bramka.

W tranzystorze bipolarnym występują dwa złącza półprzewodnikowe: baza-emiter i baza-kolektor. W normalnym układzie pracy złącze baza-emiter jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia, zaś złącze baza-kolektor w kierunku zaporowym. Natomiast w tranzystorze polowym występuje tylko jedno złącze bramka-kanał spolaryzowane zaporowo. Kolektorowi w tranzystorze bipolarnym odpowiada dren w tranzystorze polowym, a emiterowi źródło (rys. 1).

Podobnie jak w przypadku tranzystorów bipolarnych występujących w odmianach n-p-n i p-n-p tranzystory polowe mogą posiadać kanał typu n lub typu p. Bramka tranzystora polowego może być wykonana jako klasyczne złącze półprzewodnikowe, są to polowe tranzystory złą-



Rys. 1 Symbole schematowe tranzystorów MOSFET i tranzystora bipolarnego.

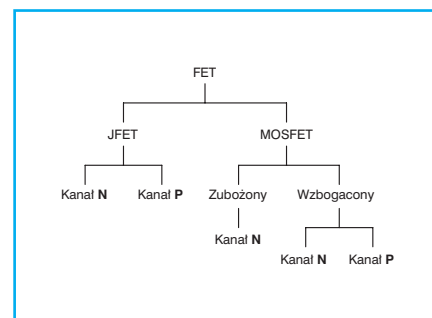
czowe JFET lub też bramka może być odizolowana elektrycznie od kanału przy pomocy cienkiej warstwy dielektryka jak to ma miejsce w tranzystorach MOSFET. Jak by jeszcze tego było mało tranzystory polowe mogą posiadać różne domieszkowanie półprzewodnika tworzącego kanał, mamy do czynienia w takim przypadku ze zubażaniem lub ze wzbogacaniem kanału.

Tranzystory polowe mają wiele zalet. Podstawowa jest praca bez prądu bramki. Dzięki temu rezystancja wejściowa tranzystora jest bardzo duża i wynosi w praktyce $10^{12} \div 10^{14} \Omega$. Tranzystory polowe stosowane są bardzo często w połączeniu z tranzystorami bipolarnymi. Przykładem takiego mariażu są wzmacniacze operacyjne w których stopień wejściowy wykonano z użyciem tranzystorów JFET, a w dalszych stopniach zastosowano tranzystory bipolarnie. Połączono w ten sposób zalety obu typów tranzystorów. Inną dziedziną w której znalazły zastosowanie tranzystory MOSFET są tranzystory mocy pełniące funkcję włączników, przełączające prądy rzędu kilkudziesięciu Amperów.

Do wad tranzystorów polowych należy zaliczyć dość duży produkcyjny rozrzut podstawowych parametrów takich jak napięcie progowe. Tranzystory MOSFET charakteryzują się także większym wpływem temperatury na parametry.

Ale dość wstępu, przejdźmy do opisu pracy tranzystorów polowych. Odpowiednikiem bipolarnego tranzystora n-p-

n jest tranzystor MOSFET ze wzbogacanym kanałem typu n. Podczas normalnej pracy dren (odpowiednik kolektora) jest na najwyższym potencjale dodatnim. Tak długo jak potencjał bramki (odpowiednik bazy) jest równy lub niższy potencjałowi źródła (odpowiednik emitera) przez tranzystor nie płynie żaden prąd, za wyjątkiem niewielkiego prądu upływu. Odpowiada to zatkaniu tranzystora. Gdy zaczniemy zwiększać napięcie bramki po przekroczeniu pewnej wartości zacznie płynąć prąd pomiędzy drenem a źródłem. Warto zauważyć, że wartości prądu drenu i źródła są identyczne z uwagi na brak prądu bramki, co różni tranzystor MOSFET od tranzystora bipolarnego w którym prąd emitera jest większy od prądu kolektora o prąd bazy. Na rysunku 2a przedstawiono zależność prądu drenu I_D od napięcia dren źródło U_{DS} dla różnych wartości napięć bramka-źródło U_{GS} . Dla porównania na rysunku 2b przedstawiono analogiczne charakterystyki dla tranzystora bipolarnego n-p-n. Można zauważyć, że charakterystyki dla obu typów tranzystorów są zbliżone. W tranzystorze MOSFET widać większą stałość prądu drenu w funkcji napięcia dren-źródło (oczywiście nie dotyczy to napięć zbliżonych do 0 V). Tak więc tranzystory MOSFET są bardziej zbliżone do ideału niż tranzystory bipolarnie. Ponadto sterowanie w tranzystorze polowym prądem drenu odbywa się przy pomocy napięcia bramki. War-



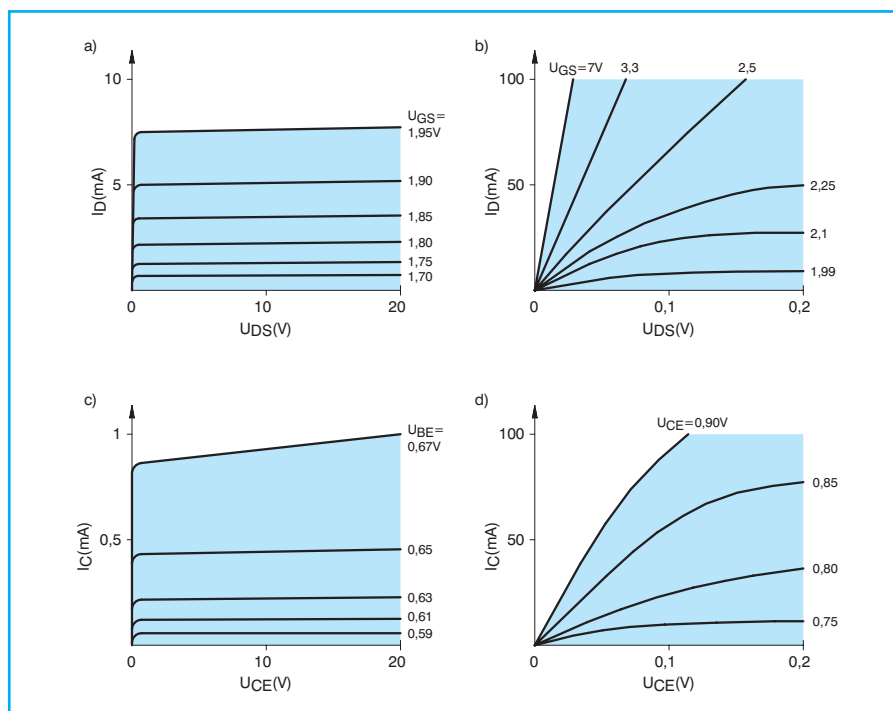
Rys. 3 Podział tranzystorów polowych

tość tego napięcia może zawierać się w granicach od 0 do 15 V. Przy czym prąd drenu zaczyna płynąć powyżej pewnej wartości napięcia progowego U_T , które zależy od typu tranzystora i wynosi najczęściej ok. 1,5 do 2,0 V. W tranzystorach bipolarnych napięcie „progowe” jest niższe, wynosi ono ok. 0,6 V dla praktycznie wszystkich typów tranzystorów.

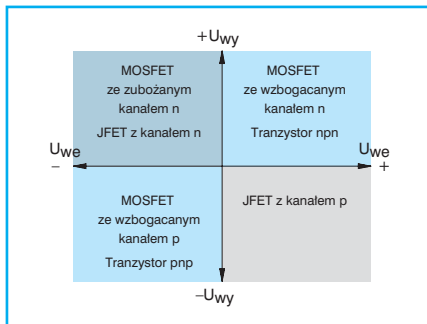
Większe różnice w charakterystykach występują dla małych napięć dren-źródło i kolektor emiter (rys. 2 a i 2b). Tranzystor MOSFET w obszarze liniowym (obszar niskich napięć dren-źródło) zachowuje się jak prawie idealny rezystor, którego rezystancja zależy od napięcia bramki. W tranzystorze bipolarnym zależność ta jest silnie nieliniowa.

Opisany powyżej tranzystor MOSFET z kanałem n był odpowiednikiem tranzystora bipolarnego n-p-n. Natomiast odpowiednikiem bipolarnego tranzystora p-n-p jest tranzystor MOSFET z kanałem p. Właściwie charakterystyki tego tranzystora są analogiczne do opisanych powyżej. Zmienia się tylko kierunek napięć, czyli dren będzie na potencjale najniższym, a źródło na potencjale najwyższym. Jeżeli napięcie bramki będzie równe napięciu źródła przez dren nie będzie płynął prąd. Natomiast gdy napięcie bramki spadnie poniżej progu odcięcia tranzystor zostanie włączony.

W tranzystorach bipolarnych parametry tranzystorów n-p-n i p-n-p są praktycznie porównywalne, natomiast w tranzystorach MOSFET tranzystory z kanałem typu p charakteryzują się zawsze gorszymi parametrami. Napięcie progowe przy którym tranzystor MOSFET z kanałem p włącza się jest zawsze wyższe niż w przypadku tranzystora z kanałem n. Tak samo rezystancja włączenia R_{ON} jest też nieco większa. Czynnikiem decydującym o gorszych parametrach tranzystorów z kanałem typu p jest fizyka, a dokładniej mówiąc większościowe nośniki ładunku. W przypadku tranzy-



Rys. 2 Porównanie charakterystyk wyjściowych tranzystora: a) MOSFET, b) bipolarnego



Rys. 4 Polaryzacja różnych typów tranzystorów

storów z kanałem n są to elektrony, a z kanałem p dziury, o mniejszej ruchliwości i krótszym czasie życia.

Na rysunku 3 przedstawiono „drzewo genealogiczne” tranzystorów polowych. Pierwszy stopień to podział na tranzystory złączowe JFET (ang. *Junction Field Effect Transistor* Złączowy Tranzystor z Efektem Polowym) i z izolowaną bramką MOSFET. Drugi szczebel drabiny to podział tranzystorów MOSFET na zubożone i wzbogacone. Oba te typy zostały omówione powyżej. Wypada teraz powiedzieć na czym polega wzbogacanie lub zubożanie, bo nie o pieniądze tutaj chodzi. Generalnie tranzystory z wzbogacającym kanałem typu n nie przewodzą prądu dla zerowego napięcia i ujemnego napięcia bramki względem źródła. Natomiast tranzystory z kanałem p nie przewodzą prądu dla zerowego i dodatniego napięcia bramki.

Produkuje się także tranzystory z kanałem typu n w których dzięki odpowiedniemu domieszkowaniu uzyskuje się efekt przewodzenia przy ujemnym napięciu bramki. Aby wprowadzić taki tranzystor w stan odcięcia (zatkania) do bramki należy przyłożyć ujemne napięcie o wartości kilku Voltów. Taki typ tranzystora MOSFET nazywa się tranzystorem z kanałem zubożonym. Charakterystyki tranzystorów z kanałem zubożonym są praktycznie takie same jak charakterystyki tranzystorów z kanałem wzbogacającym. Różnica polega tylko na innym napięciu progowym, które w przypadku zubażania ma wartość ujemną. Nie produkuje się natomiast tranzystorów ze zubożonym kanałem typu p. W praktyce tranzystory zubożone spotyka się dość rzadko.

Pewnym ułatwieniem w opanowaniu zawichości klasyfikacji tranzystorów MOSFET może być rysunek 4 na którym w czterech ćwiartkach umieszczono poszczególne typy tranzystorów. W pierw-

szej ćwiartce znajdują się tranzystory bipolarne n-p-n i tranzystory MOSFET z kanałem wzbogacającym. Na osi rzędnych (pionowej) umieszczono polaryzację napięć wyjściowych, a na osi odciętych (poziomej) polaryzację napięć wejściowych. Umieszczenie tranzystora w pierwszej ćwiartce oznacza, że wejście tranzystora (baza lub bramka) jest spolaryzowane dodatnio względem emitera lub źródła. Podobnie kolektor i dren spolaryzowane są napięciem dodatnim względem emitera lub źródła. Podobnie można przeanalizować napięcia na elektrodach dla pozostałych ćwiartek.

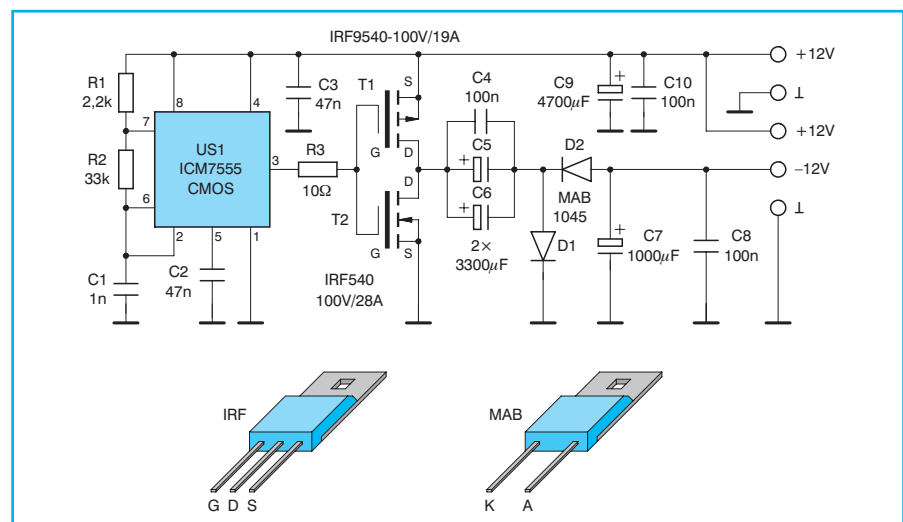
Na sam koniec trzeba jeszcze powiedzieć parę słów o podłożu. Tranzystor z kanałem n jest wykonywany na kawałku płytki krzemowej o typie przewodnictwa p nazywanej podłożem, na której poprzez domieszkowanie wytwarza się kanał typu n. Z kolei na kanale wykonywana jest izolacja w postaci tlenku krzemu (SiO_2) czyli zwykłego szkła. Na tą izolację nanosi się cienką warstwę metalową która tworzy odizolowaną elektrycznie bramkę. Ponieważ dren i źródło stanowią dwa zakończenia kanału typu n który umieszczony jest na płytce o przewodnictwie typu p powstaje pasożytnicze złącze p-n, które musi zostać spolaryzowane w kierunku zaporowym. W olbrzymiej większości tranzystorów podłoże łączy się ze źródłem wewnątrz obudowy. Zapewnia to ten sam potencjał na podłożu i źródle, uniemożliwiając przepływ prądu. W niektórych zastosowaniach podłoże wyprowadzane jest na zewnątrz jako odrębna elektroda.

Tranzystory MOSFET doskonale nadają się na przełączniki (klucze) o ma-

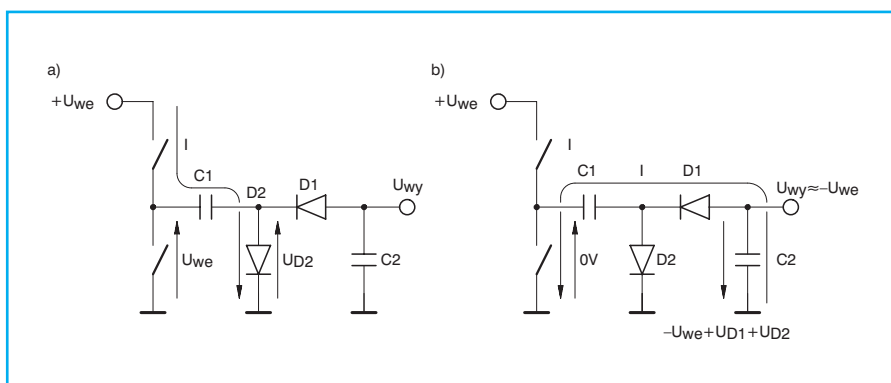
łej rezystancji i dużym prądzie obciążenia. Produkowane obecnie tranzystory osiągają rezystancje włączenia R_{ON} rzędu $0,05 \Omega$ przy prądach kilkudziesięciu Amperów. Drugą zaletą jest łatwość sterowania (włączania i wyłączania). Wydawać by się mogło, że do tego celu wystarczy prosty układ o niewielkim prądzie wyjściowym. Nic bardziej złudnego. Tranzystory mocy MOSFET wymagają specjalnego sterowania z uwagi na duże pojemności bramka-źródło. Wartość tej pojemności może wynieść nawet 1 nF.

Z tego też względu tranzystory te powinny być sterowane ze źródła o małej impedancji wewnętrznej. Umożliwia to szybkie rozładowanie i naładowanie tej pasożytniczej pojemności. Idealnie do tego celu nadają się układy przeciwsołbne.

Po długim wstępie można przejść do omówienia przetwornicy w której zastosowano komplementarne tranzystory MOSFET. Schemat przetwornicy zamieszczono na rysunku 5. Składa się ona z generatora w którym zastosowano popularny tajmer w wersji CMOS 7555. Wytwarza on przebieg prostokątny o częstotliwości ok. 20 kHz, a więc wyższej niż pasmo akustyczne. Dzięki temu ewentualne zakłócenia produkowane przez przetwornicę nie są słyszalne. Wypełnienie przebiegu zbliżone jest do 1/2. Bezpośrednio do wyjścia generatora podłączone są bramki tranzystorów przeciwsołbnego stopnia mocy w którym pracują tranzystory MOSFET T1 i T2. Pierwszy z nich to tranzystor z kanałem p a drugi to tranzystor z kanałem n. W czasie gdy na wyjściu generatora występuje stan niski włączony jest tranzystor T1 a T2 jest zatkany. W czasie trwania stanu wysokiego jest odwrotnie.



Rys. 5 Schemat ideowy przetwornicy



Rys. 6 Zasada działania układu odwracającego polaryzację napięcia

Rezystancja włączenia tranzystorów mocy R_{ON} jest niewielka i nie przekracza $0,15 \Omega$ dla T1 i $0,06 \Omega$ dla T2. Głównym źródłem strat mocy jest moment przełączania. Im trwa on krócej tym mniejsze straty mocy występują w tranzystorach. W praktyce należy dążyć do tego aby czas przełączania tranzystorów był krótszy niż $1 \mu s$. Z tego też względu zastosowano generator wykonany w wersji CMOS. Charakteryzuje się on nieco szybszym czasem narostu i opadania sygnału wyjściowego w sto-

sunku do wersji bipolarnej. Jednakże nie stoi na przeszkodzie aby zastosować wersję bipolarną generatora US1. Stopień wyjściowy generatora w obu przypadkach pracuje jako przeciwsobny zapewniając minimalną rezystancję wyjściową niezbędną do szybkiego rozładowywania pojemności wejściowych tranzystorów MOSFET. Rezystor R3 ogranicza udar prądowy wynikający z przenikania zakłóceń z wyjścia tranzystorów na ich wejście poprzez stosunkowo duże pojemności wewnętrzne bramka-kanal.

Do wyjścia stopnia mocy dołączony jest układ odwracania polaryzacji napięcia. W jego skład wchodzi kondensatory C4÷C6, C7 i diody D1 i D2. Zasada pracy tego układu przedstawiona jest na rysunku 6. W pierwszej fazie zwarty jest klucz K1, a klucz K2 pozostaje rozwarty. Kondensator C1 ładuje do wartości napięcia zasilania. Prąd ładowania zamyka się do masy przez diodę D2. W tej fazie dioda D1 spolaryzowana jest zaporowo. W drugiej fazie klucz K1 rozwiera się, a zamyka się klucz K2. Następuje wtedy rozładowanie kondensatora C1 przez diodę D1 i kondensator filtra wyjściowego C2. Powoduje to powstanie ujemnego względem masy napięcia na wyjściu.

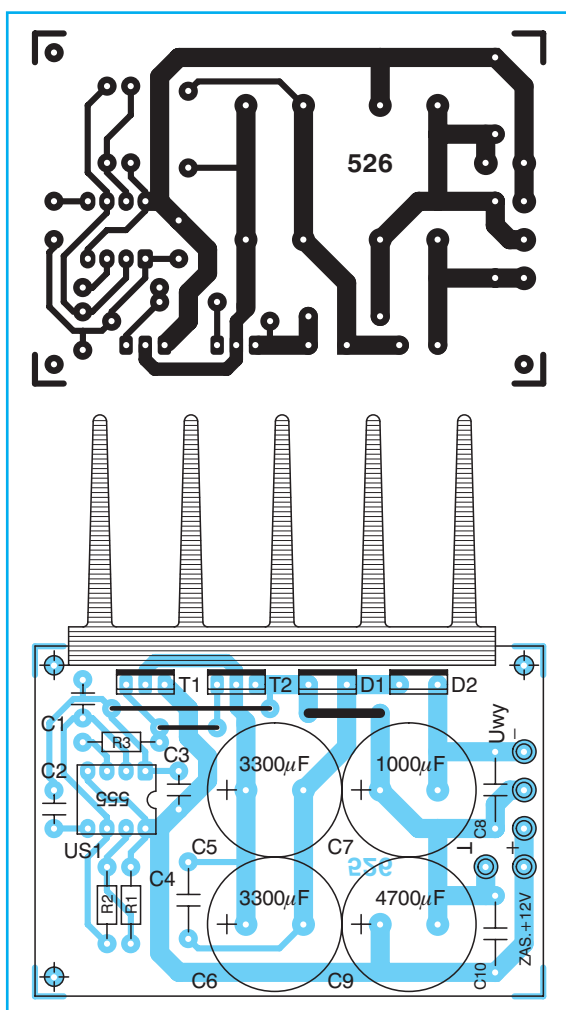
Głównym źródłem strat tego rodzaju przetwornicy jest spadek napięcia na przewodzących kluczach i diodach. O ile rezystancja tych pierwszych jest niewielka (rzędu setek miliomów) o tyle znaczenia nabiera spadek napięcia

na diodach D1 i D2. Z tego też względu powinny to być diody Schottky'ego.

Montaż i uruchomienie

Przetwornica mieści się na niewielkiej płytce drukowanej. Wszystkie elementy mocy umieszczono w jednym rzędzie, tak że można je zamocować do radiatora. Tranzystory T1 i T2 oraz diody D1 i D2 powinny być odizolowane elektrycznie od radiatora przy pomocy podkładek mikowych lub tworzywowych. Miejsca styku elementów należy posmarować pastą silikonową zmniejszającą rezystancję termiczną radiator-obudowa. Przetwornicę można zamocować na tym samym radiatorze co wzmacniacz mocy. Straty mocy w elementach przetwornicy są niewielkie i z tego względu jako radiator w zupełności wystarczy zwykła blaszka aluminiowa o grubości 2 mm i powierzchni ok. 100 cm^2 .

Układ jest w stanie dostarczyć nawet 4 A prądu przy napięciu wyjściowym ok. -10 V przy założeniu, że jest on zasilany napięciem $+12 \text{ V}$. Przy braku poboru prądu napięcie wyjściowe wynosi -12 V . Poprawnie zmontowana przetwornica nie wymaga żadnego uruchamiania i działa natychmiast po włączeniu.



Rys. 7 Płytkę drukowaną i rozmieszczenie elementów

Wykaz elementów

Półprzewodniki

US1	– ICM 7555 (CMOS) LM 755
T1	– IRF 9540
T2	– IRF 540
D1, D2	– MAB 1045 Schottky'ego

Rezystory

R3	– $10 \Omega/0,125 \text{ W}$
R1	– $2,2 \text{ k}\Omega/0,125 \text{ W}$
R2	– $33 \text{ k}\Omega/0,125 \text{ W}$

Kondensatory

C1	– $1 \text{ nF}/50 \text{ V}$ ceramiczny
C2, C3	– $47 \text{ nF}/50 \text{ V}$ ceramiczny
C4, C8, C10	– $100 \text{ nF}/50 \text{ V}$ MKSE-20
C7	– $1000 \mu\text{F}/16 \text{ V}$
C5, C6	– $3300 \mu\text{F}/16 \text{ V}$
C9	– $4700 \mu\text{F}/16 \text{ V}$

Inne

płytkę drukowaną numer 526

Płytki drukowane wysyłane są za zaliczeniem pocztowym. Płytki można zamawiać w redakcji PE.

Cena: płytkę numer 526 – 2,80 zł + koszty wysyłki.