

Tranzystory polowe

Część 21



Zgodnie z wcześniejszą zapowiedzią cykl o wzmacniaczach operacyjnych ukazuje się wymiennie z kolejnymi odcinkami na temat tranzystorów. W najbliższych odcinkach zawarte są wszystkie informacje o tranzystorach polowych potrzebne współczesnemu elektronikowi-hobbyście.

W podręcznikach można znaleźć opisy co najmniej sześciu podstawowych rodzajów tranzystorów polowych – zobacz **rysunek 1**. Nie musisz wiedzieć szczegółowo, jak są zbudowane. Takie informacje znajdziesz w szkolnych podręcznikach. Ja chciałbym Ci przedstawić jedynie zasady działania, najważniejsze parametry oraz podstawowe układy pracy. Przekonasz się, że tranzystory polowe mają wiele zalet, a zasady ich stosowania są bardzo proste. Jestem absolutnie pewny, iż polubisz te pożyteczne i popularne elementy.

Rys. 1

Tranzystory polowe					
złączone		z izolowaną bramką			
		z kanałem zubożonym		z kanałem wzbogacającym	
z kanałem typu n	z kanałem typu p	z kanałem typu n	z kanałem typu p	z kanałem typu n	z kanałem typu p

NAZWY. W literaturze tranzystor polowy określa się skrótem FET – Field Effect Transistor, dosłownie “tranzystor z efektem polowym”. Tranzystor polowy złączowy to JFET (J od junction – złącze). Drugi główny “gatunek” to tranzystory polowe z izolowaną bramką – MOSFET-y. MOS to skrót od Metal Oxide Semiconductor (metal-tlenek-półprzewodnik) wskazujący, że metalowa bramka izolowana jest (dwu)tlenkiem krzemu od półprzewodnikowego kanału wiodącego prąd.

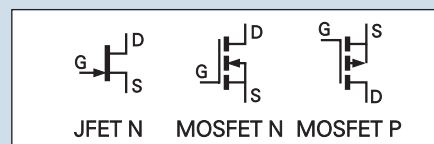
A oto pierwsza dobra wiadomość: nie wszystkie spośród sześciu wspomnianych rodzajów są wykorzystywane w praktyce. Spotkasz tylko trzy:

1. złączowe z kanałem n (**JFET N**),
2. z izolowaną bramką, tzw. wzbogacane, z kanałem n (**MOSFET N**),
3. z izolowaną bramką, tzw. wzbogacane, z kanałem p (**MOSFET P**).

Na **rysunku 2** znajdziesz symbole tych trzech rodzajów tranzystorów. Tylko te tranzystory musisz bliżej poznać i tylko te będziesz stosował. Natomiast MOSFET-y z kanałem zubożonym nie są dostępne na rynku. Zauważ, że symbole MOSFET-ów różnią się od tych z rysunku 1. Spotykane na rynku MOSFET-y mają trzy wyprowadzenia, a nie cztery.

To znaczy, że w normalnych warunkach w **obwodzie bramki nie płynie prąd**. Tranzystor jest otwierany i zamykany pod wpływem napięcia między bramką a źródłem (oznaczanego U_{GS}). Jeśli w obwodzie bramki prąd nie płynie, oznacza to, że rezystancja wejściowa wszelkich tranzystorów polowych jest bardzo, bardzo duża, zdecydowanie większa niż bipolarnych, nawet pracujących w roli wtórników emiterowych. I to jest jedna z głównych zalet wszelkich “polówek”.

Rys. 2



Tranzystory polowe złączowe

Praktycznie wszystkie spotykane dziś tranzystory polowe złączowe, w skrócie JFET (lub J-FET) mają kanał typu n (istnieją też złączowe “polówki” z kanałem p, jednak są używane bardzo rzadko, możesz o nich zapomnieć). Znane od lat są tranzystory o oznaczeniach BF245 (były produkowane w kraju), BF246, BF247.

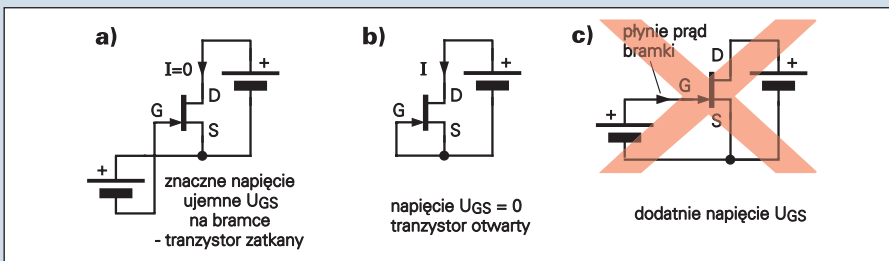
Być może na zasadzie analogii z tranzystorem bipolarnym intuicja podpowiada Ci, że przy zerowym napięciu bramka-źródło (U_{GS}) tranzystor polowy jest zatkany, a otwiera się przy zwiększaniu tego napięcia.

Tym razem intuicja Cię zawiodła. JFET-y to dziwaki. Zapamiętaj raz na zawsze, że **TRANZYSTORY ZŁĄCZOWE PRZY ZEROWYM NAPIĘCIU SĄ OTWARTE – PRZEWODZĄ** (podobnie

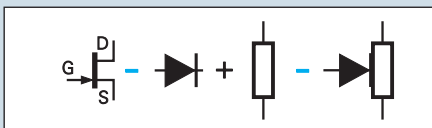
MOSFET-y z kanałem zubożonym) Aby je zatkać, trzeba między źródło a bramkę podać napięcie ujemne. Ilustruje to **rysunek 3**.

Gdybyś natomiast na bramkę JFET-a podał napięcie dodatnie względem źródła, to w obwodzie bramka-źródło zacznie płynąć prąd. Taki tryb pracy nie jest wykorzystywany w praktyce, dlatego rysunek 3c jest przekreślony. Tranzystor będzie się wtedy zachowywał tak, jakby między źródłem a bramką była włączona dioda. Wskazuje zresztą na to strzałka w obwodzie bramki. Rzeczywiście, jak wskazuje nazwa, tranzystory JFET posiadają złącze (diodowe), które podczas normalnej pracy jest spolaryzowane wstecznie - prąd wtedy nie płynie, a oporność wejściowa jest bardzo duża. Ilustruje to **rysunek 4**, gdzie obrazowo przedstawiono tranzystor JFET jako złożenie diody i rezystora. Nie jest to wyobrażenie błędne – tranzystor połowy w pierwszym przybliżeniu rzeczywiście można sobie wyobrazić jako rezystor sterowany napięciem.

Rys. 3



Rys. 4



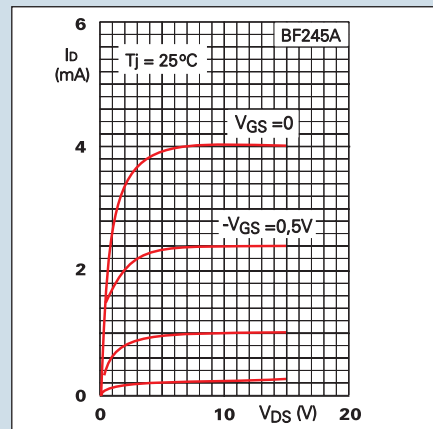
Podstawowe parametry

W zasadzie nie musisz znać szczegółowych charakterystyk tranzystorów polowych złączowych. Będziesz je stosował bardzo rzadko. W razie potrzeby wykorzystasz gotowy schemat z literatury albo jeden z układów podanych w dalszej części artykułu.

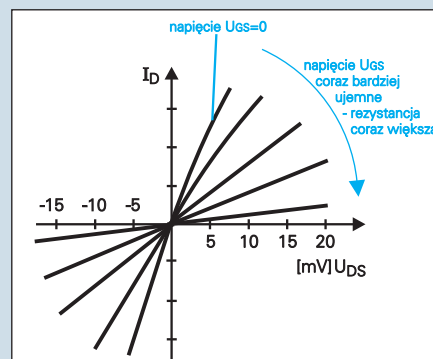
Proponuję jednak, żebyś przeanalizował charakterystyki popularnego tranzystora polowego BF245, pokazane na rysunkach 5 i 6.

Rysunek 5 pokazuje charakterystykę wyjściową, a **rysunek 6** charakterystyki przejściowe. Zwróć uwagę, że przy napięciach dren-źródło większych od 5V prąd drenu praktycznie nie zależy od napięcia drenu - charakterystyka na rysunku 5a przebiega poziomo. Jeśli przy zmianach napięcia prąd się zmienia bardzo mało, to znaczy, że obwód drenu ma właściwości źródła prądowego – ma bardzo dużą rezystancję dynamiczną, podobnie jak obwód kolektorowy zwykłego tranzystora.

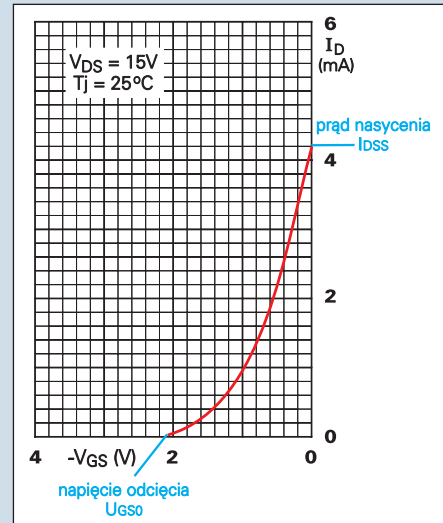
Natomiast w zakresie bardzo małych napięć dren-źródło, rzędu $\pm 20\text{mV}$ (czyli także dla małych napięć zmiennych), nachylenie zależy od napięcia U_{GS} – pokazuje to w powiększeniu rysunek 5b. A to nachylenie to nic innego jak... rezystancja. To znaczy, że dla małych sygnałów zmiennych **obwód dren-źródło jest opornikiem o rezystancji zależnej od napięcia U_{GS}** . **Rysunek 7** pokazuje tłumik sygnałów audio sterowany napięciem stałym U_{reg} . Połowe tranzystory złączowe bywają używane w obwodach, gdzie trzeba napięciowo regulować poziom niewielkich sygnałów zmiennych. Ponieważ zakres liniowej pracy "gołego" tranzystora jest niewielki ($\pm 10... \pm 20\text{mV}$), w praktyce zamiast prostego regulatora wg rysunku 7b stosuje się ulepszony układ ze sprzężeniem zwrotnym, pokazany na rysunku 7c, który umożliwia pracę z napięciami rzędu $\pm 50\text{mV}$, a nawet więcej (jednak czym większe napięcie, tym większe zniekształcenia nieliniowe). Ze względu na niedoskonałości tłumiki z FET-ami są obecnie skutecznie wypierane



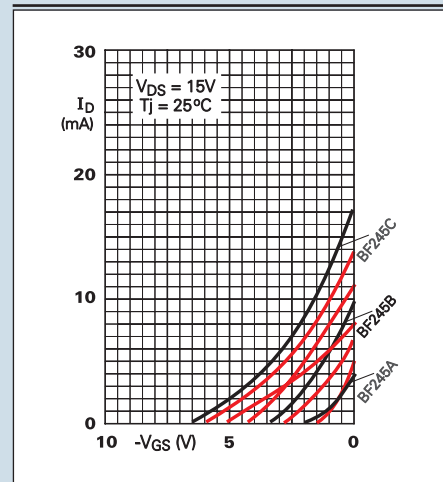
Rys. 5a



Rys. 5b



Rys. 6a



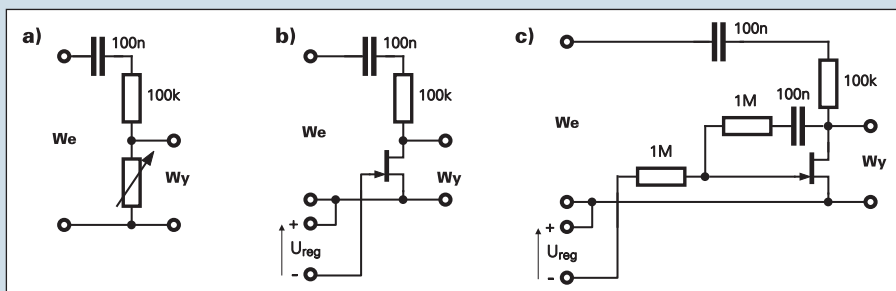
Rys. 6b

przez bardziej złożone regulatory scalone, w tym potencjometry elektroniczne.

Znacznie ważniejsze jest jednak, byś zrozumiał znaczenie charakterystyki z rysunku 6. W przypadku zwykłych, bipolarnych tranzystorów poszczególne egzemplarze różniły się przede wszystkim wartością wzmacnienia prądowego, natomiast napięcie baza-emiter, potrzebne do otwarcia tranzystora we wszystkich tranzystorach, jest praktycznie takie samo. Zupełnie inaczej jest w przypadku omawianych tranzystorów polowych. Tu napięcie, przy którym tranzystor zaczyna się otwierać, bardzo różni się dla poszczególnych egzemplarzy - zwróć uwagę, że na rysunku 6b zaznaczyłem kolorem czarnym **typowe** charakterystyki przejściowe tranzystorów BF245 z grup A, B, C oraz kolorem czerwonym charakterystyki jakichś pięciu konkretnych egzemplarzy tranzystorów JFET. Poszczególne egzemplarze różnią się zarówno napięciem U_{GS0} , przy którym zaczyna płynąć prąd, prądem drenu I_{DSS} (przy zerowym napięciu U_{GS}), jak też nachyleniem charakterystyki.

Jednym z podstawowych parametrów tranzystora polowego złączowego jest **napięcie bramka-źródło, przy którym zaczyna się on otwierać**. To napięcie progu otwierania (napięcie odcięcia) oznaczane jest w katalogach U_{GS0} i dla spotykanych na rynku tranzystorów JFET wynosi $-10V...-0,5V$. Napięcie to można bardzo łatwo zmierzyć w układzie z **rysunku 8**.

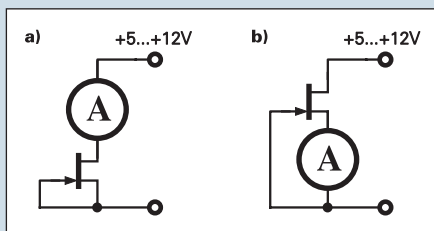
Rys. 7



Drugim istotnym parametrem tranzystorów złączowych jest **prąd nasycenia drenu przy zerowym napięciu U_{GS}** , czyli przy maksymalnym otwarciu tranzystora, oznaczany I_{DSS} . Jak widać z rysunku 6, również tu rozróżnienie między egzemplarzami jest duże.

Prąd nasycenia danego egzemplarza można zmierzyć w układzie według **rysunku 9a**, ale można także wg **rysunku 9b**. Różnica w układach pomiarowych z rysunków 8 i 9b polega na tym, że woltomierz ma bardzo dużą rezystancję wewnętrzną, np. $10M\Omega$, a płynący prąd jest bardzo mały, natomiast amperomierz ma mały, bliski zeru opór wewnętrzny, wobec czego źródło tranzystora jest praktycznie zwarte do masy (i nadal jest to układ z rysunku 3b). W praktyce znaczy to, że w tym samym układzie pomiarowym można zmierzyć oba kluczowe parametry JFET-a przełączając multimetr.

Rys. 9



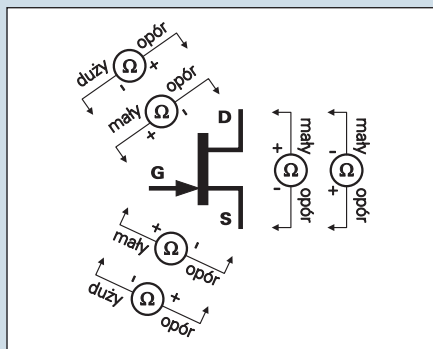
Rysunek 10 pomoże Ci w przypadku, gdybyś koniecznie chciał sprawdzać takie tranzystory za pomocą omiornika. Jak widzisz, między drenem a źródłem oporność jest w obu kierunkach mała, natomiast między bramką a drenem lub źródłem masz zwyczajną diodę, która przewodzi w jednym kierunku. Nie ra-

dzę Ci jednak sprawdzać złączowych polówek w ten sposób. Są to delikatne tranzystory i ładunki statyczne mogą je uszkodzić właśnie podczas takich prób. Złą sławą pod tym względem cieszyły się popularne BF245 krajowej produkcji. Przy nieostrożnym obchodzeniu się z nimi nawet połowa potrafiła się uszkodzić jeszcze przed wlotowaniem w układ. Przy wszelkich kontaktach z małymi polówkami zachowaj ostrożność: połóż na blacie stołu metalową uziemioną blachę, co ja-

kiś czas dotykaj rury wodociągowej (uziemia), żeby rozładować swe ciało; nie zaskadziliby też uziemienie grotu lutownicy.

Zwróć jeszcze uwagę na nachylenie charakterystyki przejściowej z rysunku 6. Wcześniej dowiedziałeś się, że nachylenie charakterystyki z rysunku 5 to jakiś rodzaj oporu – przecież na jednej osi miałeś napięcie dren-źródło, na drugiej prąd drenu. Stosunek napięcia do prądu to rezystancja – w tym wypadku jest to rezystancja wyjściowa lub inaczej rezystancja wewnętrzna tranzystora. Na rysunku 6 na jednej osi masz prąd drenu, na drugiej napięcie bramka-źródło. Czy można tu mówić o jakimś wzmocnieniu? W tranzystorze bipolarnym mamy, czyli stosunek **prądu kolektora do prądu bazy**. A tu? Stosunek prądu do napięcia...

Rys. 10



Zastanów się...

Zauważ, że **nachylenie określa przyrost prądu drenu pod wpływem przyrostu napięcia sterującego U_{GS}** . To nachylenie jest więc odpowiednikiem wzmocnienia prądowego ze zwykłych tranzystorów. Jednak nie nazywamy tego ani wzmocnieniem, ani czułością – jest to tak zwana (nie bój się!) **TRANS-KONDUKTANCJA**. Transkonduktancja wyrażana jest w miliamperach na volt (mA/V) lub

w amperach na volt (A/V), czyli w milisimensach (mS) lub siemensach (S). A że siemens to odwrotność oma (ohm), w literaturze często zamiast mA/V, mS czy S spotkasz dowcipny skrót mmho lub mho. Ogólnie biorąc, czym większa wartość transkonduktancji i wyższe napięcie odcięcia U_{GS0} , tym lepszy tranzystor.

W katalogach znajdziesz wartości transkonduktancji tranzystorów. Słusznie się domyślasz, że występuje tu duży rozróżnienie między egzemplarzami, nawet pochodzącymi z tej samej serii produkcyjnej. Zresztą często tranzystory JFET dzielone są na grupy, różniące się wartościami napięcia odcięcia i prądu nasycenia drenu. Przykładem jest popularny niegdyś BF245. Tranzystory są selekcyjonowane pod względem prądu I_{DSS}

BF245A: 2...6,5mA
BF245B: 6...15mA
BF245C: 12...25mA.

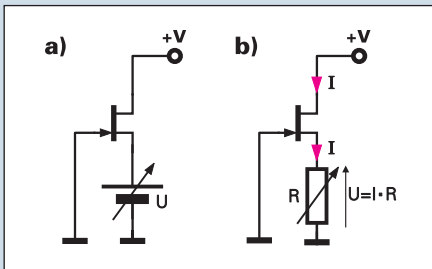
W katalogach znajdziesz też maksymalne napięcie dren-źródło, maksymalną moc strat, nie ma natomiast dopuszczalnego prądu drenu. Jeśli jeszcze tego nie zauważyłeś, zauważ teraz – w polówkach złączowych **nie można dowolnie zwiększyć prądu drenu**. Jest on ograniczony i przy zwarciu bramki ze źródłem ($U_{GS}=0$) przyjmuje maksymalną wartość równą I_{DSS} . Nie możesz go zwiększyć, bo podając dodatnie napięcie na bramkę spowodowałbyś przepływ prądu bramki i straciłbyś zalety tego tranzystora.

Jak wskazuje rysunek 6, w trakcie normalnej pracy napięcie bramka-źródło powinno być ujemne lub co najwyżej równe zero. Może to Ci się wydać dużym utrudnieniem, bo niaby skąd wziąć w prostym układzie, zasilanym z baterii, ujemne napięcie. Stop, nie tak szybko, znów intuicja Cię zwiodła. A kto mówi, że potrzebne jest ujemne napięcie zasilania?

Zamiast obniżać napięcie bramki, można przecież podwyższyć napięcie źródła, jak pokazuje **rysunek 11a**. Nie trzeba też stosować dodatkowego źródła – można sprytnie wykorzystać spadek napięcia na rezystorze, jak pokazuje **rysunek 11b**. Wartość tego rezystora ($0...10k\Omega$) wyznacza prąd płynący przez tranzystor. Taki sposób (auto)polaryzacji znany jest od wielu lat, kiedyś powszechnie stosowany był w układach lampowych. Przy okazji wyszło na jaw, że tranzystory polowe złączowe z kanałem n mają podobne właściwości jak lampy próżniowe (triody).

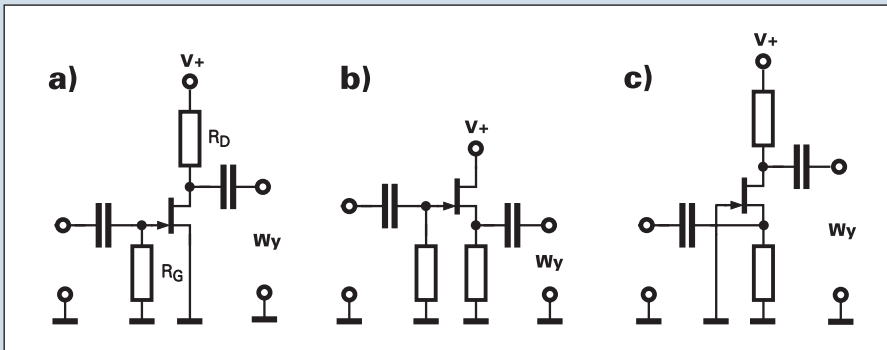
Tranzystory polowe także mogą pracować w układach ze wspólnym źródłem, wspólnym drenem i wspólną bramką, analogicznie jak zwykłe tranzystory pracują w układach ze wspólnym emiterem, wspólnym kolektorem i wspólną bazą – zobacz **rysunek 12**. Nie będziemy wgłębiać się w szczegóły, ponieważ nigdy Ci się to nie przyda. W praktyce bywają wykorzystywane proste układy z **rysunku 13**: źródło prądowe oraz wtórniki mające bardzo dużą rezystancję wejściową.

Rezystancja wejściowa układów jest równa rezystancji R_1 . R_1 może mieć wartość od $1k\Omega$... $100M\Omega$.

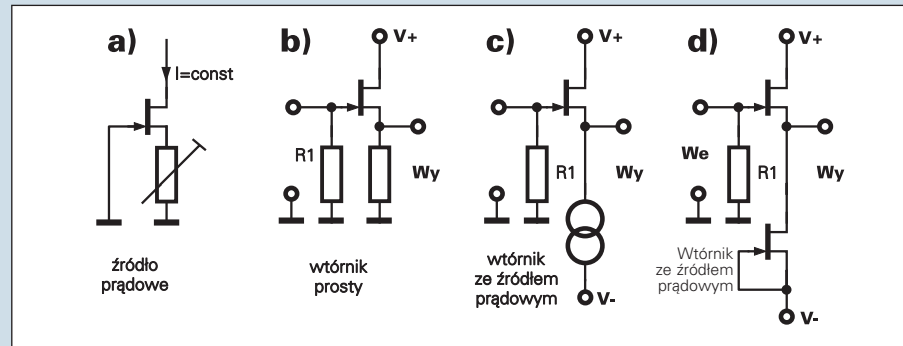


Rys. 11

Rys. 12



Szczególnie dobre właściwości (szerokie pasmo, jednakowe napięcie stałe na wejściu



Rys. 13

i wyjściu, stabilność cieplna) ma wtórnik z rysunku 13d pod warunkiem zastosowania

dwóch identycznych tranzystorów. Takie elementy, zawierające w jednej obudowie dwa bliźniacze tranzystory FET są dostępne. Prawie każdy oscyloskop ma na wejściu taki wtórnik.

I jeszcze jedna ważna uwaga - ze względu na swą specyficzną budowę, w tranzystorach złączowych można bezkarnie zamieniać miejscami końcówki drenu i źródła - właściwości układu będą takie same.

Tyle o tranzystorach polowych złączowych.

Piotr Górecki