



**Piotr SP9LVZ**

## **Przełącznikowe tranzystory MOSFET we wzmacniaczach CW QRP HF pracujące w klasie D**

na podstawie fragmentów opracowania „The Handiman’s Guide  
to MOSFET Switched Mode Amplifiers” by Paul Harden, NA5N  
oraz  
na bazie doświadczenia przy uruchamianiu transceivera DOB-80

Celem niniejszej publikacji jest przybliżenie problematyki stosowania tranzystorów serii IRF510-530 w stopniach końcowych wzmacniaczy mocy nadajników CW QRP. Zakres przestawionych wiadomości nie wyczerpuje całości poruszanego zagadnienia oraz skomplikowanych zagadnień teoretycznych. Przykłady zastosowań przedmiotowych tranzystorów w urządzeniach SSB były już publikowane w krajowej prasie „radiowej” i tych zagadnień nie będę poruszał.

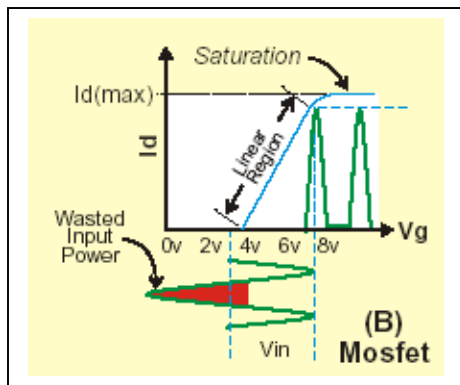
Tranzystory MOSFET są od lat wykorzystywane w konstrukcjach nadajników krótkofalowych w tym w stopniach mocy nadajników. Chcąc rozważyć temat pracy tranzystorów mosfet w stopniach końcowych nadajników musimy zrobić podział tych tranzystorów na dwie grupy: mosfety „liniowe” RF oraz mosfety przełącznikowe. W pierwszej grupie są tranzystory pracujące bardzo dobrze we wzmacniaczach liniowych HF, VHF i UHF np. SD2933, które są stosowane w sprzęcie fabrycznym i są bardzo drogie. Do zastosowań amatorskich najczęściej wykorzystywane są mosfety przełącznikowe np. typu IRF 510, których najlepszą cechą jest dostępność i niska cena.

Kilka lat temu składając transceiver „Antek”, który miał w stopniu końcowym tranzystor IRF520 nie przekonałem się do ich stosowania w konstrukcjach SSB. Co prawda moje pierwsze porażki z tymi tranzystorami nie tylko wynikały z ich innego przeznaczenia niż do liniowych wzmacniaczy SSB, ale również z pewnych niedociągnięć w konstrukcji transceivera, które później zostały wyeliminowane w kolejnych wersjach „Antka”. Kolejne doświadczenie na dziś – to transceiver telegraficzny DOB-80 w którym został zastosowany IRF-510 ze znakomitym skutkiem. Co jest więc z tymi tranzystorami?..

Analizując pracę i możliwości stosowania tranzystorów przełącznikowych w stopniach mocy nadajników transceiverów amatorskich trzeba brać pod uwagę co najmniej trzy czynniki:

- o napięcie bramki  $V_{gs}$ , przy której następuje otwarcie tranzystora oraz napięcie przy którym następuje stan nasycenia prądu tranzystora ( $I_{d\ max}$ ),
- o pojemności pomiędzy bramką a pozostałymi elektrodami,
- o możliwości odprowadzenia ciepła z tranzystora w stanach przejściowych pomiędzy stanem nie przewodzenia, a stanem otwarcia.

Tranzystor IRF 510 wg. danych katalogowych ma napięcie otwarcia  $V_{gs}$  w granicach 3-4V, a stan nasycenia prądu kanału (drenu) o wartości około 4 A osiąga przy napięciu bramki około 7-8V.



Pojemności pomiędzy bramką, a pozostałymi elektrodami przybierają w tranzystorach typu mosfet wartości od setek pikofaradów do pojedynczych nanofaradów. Dla IRF 510 pojemność wejściowa wynosi 120-180 pF, a wyjściowa około 120 pF. W przypadku stosowania tych tranzystorów w układach przełącznikowych o małych częstotliwościach pracy (rzędu setek Herców) nie ma to znaczenia. W takim przypadku, impedancja wejściowa tranzystora jest bardzo wysoka, taka – jaką znamy

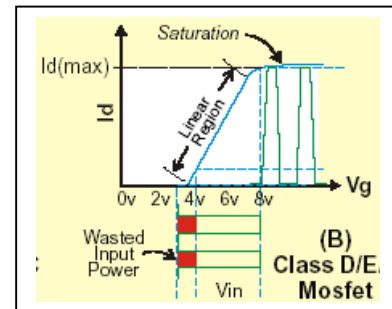
z teorii tranzystora polowego. Tranzystor mosfet z kanałem wzbogaconym działa podobnie jak tranzystor bipolarny - przy niepodawaniu dodatniego napięcia na bramkę nie przewodzi. Bramka jest elektrodą izolowaną od przewodzącego prąd kanału za pomocą dwutlenku krzemu, co powoduje że pomiędzy bramką a kanałem tworzy się kondensator. Obwód bramki nie pobiera więc prądu (słuszne dla stanów statycznych) i w takim przypadku mamy doczynienia ze sterowaniem napięciowym. Tranzystory typu mosfet są bardzo szybkie, dzięki czemu możemy je wykorzystać do w.cz. W przypadku jednak, gdy zaczynamy stosować te tranzystory w układach wysokich częstotliwości (lub będziemy dostarczać bardzo wąskie impulsy sterujące) pojemność między elektrodowa zaczyna przybierać coraz większe znaczenie – maleje wtedy znacznie impedancja wejściowa tranzystora. Dla przykładu oddziaływania pojemności wejścia można podać, że przy wąskich impulsach już o częstotliwości 100 kHz bramka może się w ogóle nie otworzyć, jeśli będziemy ją sterować ze źródła o dużej rezystancji wyjściowej (duża stała czasowa). W przypadku mosfetów liniowych RF w pasmach VHF impedancje wejściowe tranzystora przybierają wartości rzędu pojedynczych omów. Pozbycie się tego problemu tkwi w szczególnym rozwiązaniu układów dopasowujących obwodów sterujących (poprzedzających) do impedancji wejścia tranzystora. Z rozważań teoretycznych wynika zatem, że przy pracy tranzystorów typu mosfet na bardzo wysokich częstotliwościach obwody sterujące powinny mieć jak największą wydajność prądową!, co jest w pewnej niezgodzie z teorią o wysokiej oporności wejściowej i napięciowym sterowaniu tranzystorów polowych (słuszne dla stanów statycznych).

W przypadku stosowania tranzystorów przełącznikowych w stopniach końcowych małej mocy nadajników HF do pracy telegraficznej tranzystory serii IRF510 do 530 okazują się wystarczająco dobre. Najniższą pojemność wejściową ma IRF 510. Pojemność bramki może stanowić problem, ale sama w sobie nie jest jeszcze najważniejszym ograniczeniem. Dobrym przykładem jest np. tranzystor nadawczy BLF177 czy MRF151. Pojemność bramki wynosi w nich prawie 750pF, a jednak są one używane nawet do 175MHz. Pozbycie się tego problemu, to oczywiście sposób ich dopasowania.

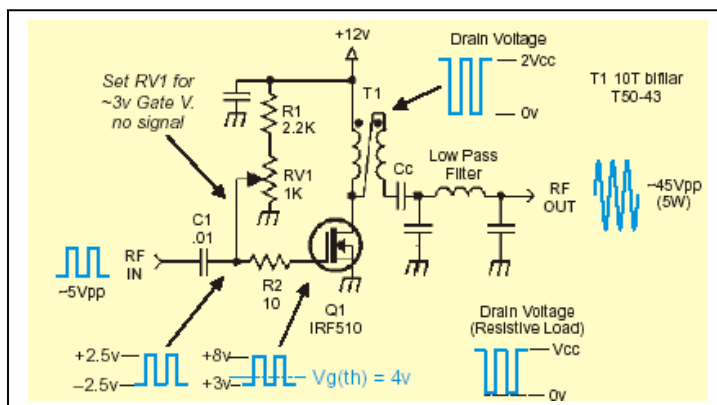
Kolejny problem, to możliwości odprowadzenie ciepła z tranzystora w stanach przejściowych. Tranzystory przełącznikowe są przystosowane do pracy w dwóch stanach – stan nie przewodzenia i stan przewodzenia. W stanie nie przewodzenia moc strat w tranzystorze się nie wydziela, bo praktycznie nie płynie przez niego prąd (rzędu  $\mu A$ ). W stanie przewodzenia wydzielana moc strat jest stosunkowo niewielka i łatwo możemy wyliczyć. Przykładowo dla IRF 510 rezystancja kanału w stanie otwarcie  $R_{ds(on)} = 0,54 \text{ Ohm}$ . Zakładając prąd nasycenie 4 A, moc strat będzie wynosić około 8-9W. Tranzystor IRF510 ma maksymalną moc rozproszenia 43W, mamy więc zatem spory zapas. Jednakże w stanach przejściowych w tranzystorze wydzielają się znaczne moce strat,

co powoduje że występują kłopoty z odprowadzaniem ciepła we wzmacniaczach pracujących w klasach AB dostosowanych do emisji SSB (przykład opisu wzmacniacza do Kajmana na tranzystorach IRF520), zwłaszcza przy podnoszeniu napięcia zasilania (bo moc = napięcie x prąd).

Problem ten jest praktycznie niezauważalny przy wykorzystaniu tranzystorów mosfet jako wzmacniacze do nadajników telegraficznych pracujących w klasie D. W klasie D wzmacniacza sterowanie tranzystora jest realizowane napięciem prostokątnym ze scalonych układów cyfrowych. Przy takim sterowaniu tranzystor jest przełączany ze stanu nie przewodzenia do stanu otwarcia przy maksymalnym prądzie szczytowym 4 A. Tu zwracam uwagę na informację o koniecznej wydajności prądowej zasilacza = 4 A! a dlaczego, o tym za chwilę. Pojemności wewnętrzne



tranzystora powodują, że prąd przez niego płynący nie ma w rzeczywistości przebiegu prostokątnego, lecz łagodne nachylenie. W takiej klasie pracy tranzystora moc wyjściowa będzie zależna od napięcia „przedpięcia” tranzystora oraz od szerokości wypełnienia sygnału cyfrowego, bo amplituda napięcia prostokątnego z układów cyfrowych jest prosto stała, zależna od napięcia zasilania układów (np. 5V). Napięcie „przedpięcia” mosfeta powinno być tak ustawione, by tranzystor pracował w obszarze wyłączony - załączony. Jeśli będziemy tranzystor sterować z układów cyfrowych zasilanych napięciem 5V, to przy napięciu „przedpięcia” 3 V otrzymamy



maksymalne napięcie bramki 8 V, czyli wystarczające do uzyskania otwarcia kanału i uzyskania impulsów prądu o wartości 4 A. Jeśli założymy, że wypełnienie sygnału sterującego jest 50% to jak tranzystor będzie pracował?

Jaki będzie bilans energetyczny i moc wyjściowa?

Uśredniona wartość prądu przy 50% wypełnieniu:  $I_{d(eq)} = r I_{d(max)} = 50\% \times 4A = 2A$

Wartość skuteczna prądu:  $I_{d(avg)} = 0.637 I_{d(eq)} = 0.637 \times 2A = 1.3A$

Wartość prądu przetwarzana na moc wyjściową  $I_{rms} = 0.707 I_{d(avg)} = 0.707 \times 1.3A = 0.9A$

Moc wyjściowa:  $P_o = I_{rms} V_{dd} = 0.9A \times 12V \times 80\% = 8.8W$  (co potwierdzają mierniki)

Na tranzystorze wydzielili się około 6,8 W mocy strat ( $12V \times 1.3 A - 8.8W$ ), czyli sprawność mało imponująca. Tranzystor wymaga niewielkiego radiatora, a zasilacz wydajności prądowej 4A.

Pojemności wewnętrzne tranzystora wraz z obwodem w drenie oraz wyjściowy filtr dolnoprzepustowy skutecznie „zamieniają” prostokątny sygnał wejściowy na sinusoidę.

W takim zastosowaniu IRF510 możliwe jest uzyskanie 8W mocy wyjściowej CW, czyli QRP z zapasem. Przykładem jest stopień mocy nadajnika w transceiverze CW DOB-80. Moc wyjściowa jest płynnie regulowana stałym napięciem bramki poprzez potencjometr montażowy i bez problemu można ustawić 5 W output do pracy QRP lub mniej do QRPP.

*Opracowanie Piotr Faltus SP9LVZ, ostatnie dni grudnia, 2007*