

Kontynuujemy cykl artykułów o szumach elementów elektronicznych.



Szumy, część 6

Diody

W diodach spolaryzowanych w kierunku zaporowym występują głównie szumy lawinowe. Wykorzystywane jest to w generatorach szumu.

W przewodzących diodach możemy mówić o szumie śrutowym wynikającym z przepływu prądu.

W praktyce rzadko analizuje się szum pojedynczych diod.

Ponieważ diody nie są stosowane w newralgicznych obwodach wzmacniaczy niskoszumnych, więc nie zagłębialiśmy się w ten temat.

Tranzystory

W tranzystorach produkowanych różnymi, mniej lub bardziej dopracowanymi technologiami, występują rezystancje i pływ prądu. Mamy więc co najmniej trzy mechanizmy szumów tranzystora: szumy strukturalne związane z niedoskonałością technologii produkcji, szumy termiczne i szumy śrutowe.

Konstruktor nie interesują poszczególne składniki, tylko szum wypadkowy, z jakim trzeba się liczyć w rzeczywistym układzie. Znając szum wzmacniacza (zwykle odniesiony do wejścia) oraz poziom sygnału z jakim będzie on pracował, bez trudu można obliczyć najważniejszy parametr - stosunek sygnał/szum.

Często można spotkać obiegowe opinie, że najmniejsze szumy można uzyskać we wzmacniaczach z tranzystorami, a nie z układami scalonymi. Jest w tym rzeczywistość sporo prawdy. Z drugiej strony, pewnie na palcach można policzyć amatorów- elektroników, którym udało się zbudować prawdziwie niskoszumny wzmacniacz na tranzystorach. Do niedawna wszyscy mogliśmy mieć kompleks na tym punkcie

- najbardziej niskoszumne elementy ze względu na izolację naszego kraju i obłądny stosunek cen do zarobków były zupełnie niedostępne dla hobbystów. Obecnie prawie każdy może sobie pozwolić na sprowadzenie tych wymarzonych podzespołów na swoje biurko. Nasuwa się jednak podstawowe pytanie: jakie podzespoły warto stosować w praktyce, żeby uzyskać zadowalający stosunek jakości do ceny?

W tej części naszych rozważań przybliżymy sposoby obliczania szumów tranzystorów, a następnie wrócimy do postawionego właśnie pytania i przedstawimy występujące tu nieprzekraczalne bariery i ograniczenia. Postaramy się bowiem udowodnić twierdzenie, które brzmi jak herezja: w wielu przypadkach nie ma sensu dążyć za wszelką cenę do zbudowania wzmacniacza o jak najmniejszych szumach własnych!

Powróćmy do naszych parametrów. Poszczególne firmy w odmienny sposób przedstawiają parametry szumowe swoich tranzystorów. Wielu elektroników takie zamieszanie skutecznie odstrasza od tematu szumów. Postaramy się, aby nasi Czytelnicy przy odrobinie cierpliwości i uwagi zrozumieli rzeczywisty sens parametrów katalogowych. Zwrócimy przy tym uwagę, co te dane naprawdę przedstawiają, a czego w nich nie ma.

Na początek musimy przyswoić sobie podstawową ogólną prawdę: szumy tranzystorów zależą przede wszystkim od rezystancji (a ściślej impedancji) źródła sygnału oraz od prądu pracy.

Tranzystory bipolarne

W katalogach parametry szumowe przedstawia się w rozmaitej formie. Najprostsze w interpretacji, ale nie niosące pełnej informacji są wykresy takie jak na **rysunku 14**. Wykres 14a przed-

stawia zależność współczynnika szumów F (lub NF) od prądu kolektora i rezystancji źródła sygnału. Jak pamiętamy z poprzedniego odcinka, współczynnik szumów jest miarą pogorszenia stosunku sygnał/szum po przejściu przez wzmacniacz, a jak wynika ze wzoru (25) jest to stosunek mocy szumów całkowitych do mocy szumu termicznego.

Interpretacja jest bardzo prosta: korzystną wartość współczynnika szumów uzyskamy przy rezystancji źródła sygnału co najmniej kilkaset omów i przy prądach kolektora nie przekraczających 2mA. Najmniejszy współczynnik szumów uzyskamy w obszarze pracy ograniczonym krzywą $F = 1,75\text{dB}$. W świetle tego wykresu ewidentnym błędem byłaby na przykład praca z prądem kolektora powyżej 10mA.

W poprzednim odcinku przestrzegaliśmy też przed bezkrytycznym posługiwaniem się współczynnikiem szumu. Obliczmy teraz napięcie szumów przy rezystancji źródła $R_s = 200\Omega$ i prądzie kolektora $I_c = 1\text{mA}$ (na rys. 14a punkt X) oraz przy $R_s = 20\text{k}\Omega$ i $I_c = 0,5\text{mA}$.

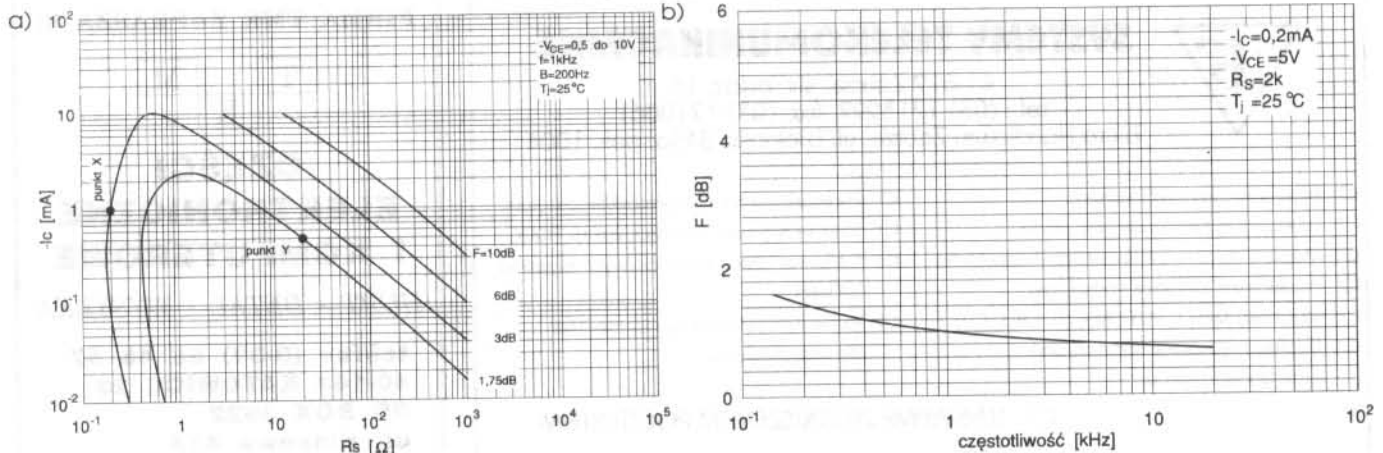
Wiemy już, że współczynnik szumów jest to stosunek mocy szumu całkowitego do szumu termicznego związanego ze źródłem sygnału. Nie będziemy się męczyć z wyprowadzaniem wzorów, z analizy zależności (22)...(25) otrzymamy:

$$NF = 20\log(U_{nwe} / U_t)$$

gdzie U_{nwe} - całkowite napięcie szumów odniesione do wejścia, U_t - napięcie szumów termicznych rezystancji źródła sygnału.

Z rysunku 14a odczytujemy wartość współczynnika szumu:

- dla pierwszego przykładu (punkt X) $NF = 3\text{dB}$
- dla drugiego (punkt Y) $NF = 1,75\text{dB}$.



Rys. 14.

Obliczamy według wzoru (14) lub z rys. 4 dla obu przypadków gęstość napięcia szumów termicznych rezystancji źródła:

- dla 200Ω - $1,82nV/\sqrt{Hz}$
- dla $20k\Omega$ - $18,2nV/\sqrt{Hz}$

Dla pasma $20kHz$ daje to:

- $0,256\mu V$
- $2,56\mu V$

Przy rezystancji źródła 200Ω nasz tranzystor ma współczynnik szumów $NF = 3dB$ co daje dla napięć wartość $F = 1,41x$. Odpowiednio $NF = 1,75$ odpowiada $F = 1,22x$.

Uwzględniając to otrzymujemy całkowite napięcie szumów odniesione do wejścia odpowiednio:

- $0,361\mu V$
- $3,12\mu V$

Jeśli w obydwu przypadkach sygnał użyteczny ma wartość, powiedzmy $5mV$, to uzyskamy stosunek sygnał/szum odpowiednio:

- $S/N = 82,8dB$
- $S/N = 64,1dB$

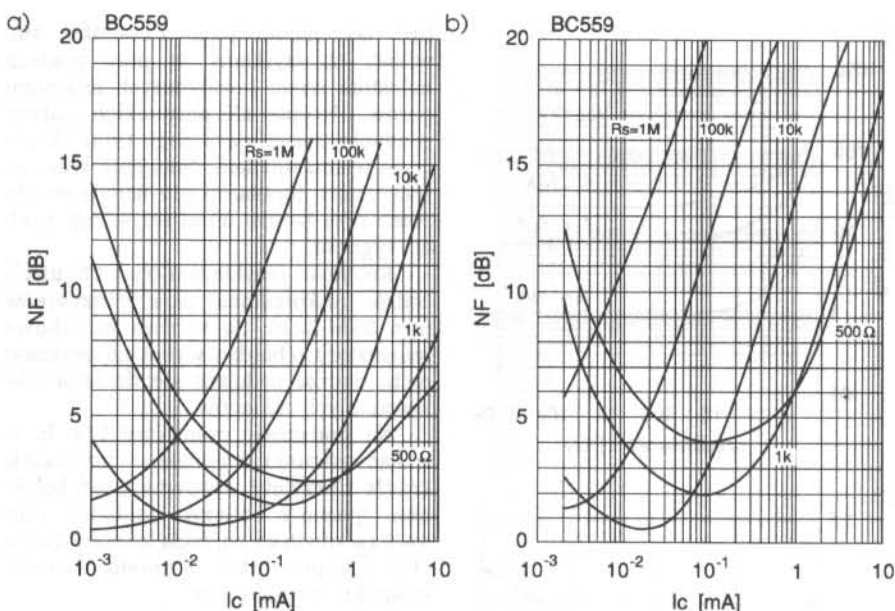
W drugim przypadku (punkt Y), pomimo mniejszej wartości współczynnika szumów, uzyskaliśmy zdecydowanie gorsze wyniki końcowe.

Podany przykład jest może trochę sztuczny, bo zwykle przy dużej rezystancji źródła otrzymujemy większy sygnał, niemniej jednak znowu widzimy, że sama znajomość współczynnika NF to za mało do określenia właściwości rzeczywistego wzmacniacza.

Przy dokonywaniu powyższych obliczeń pozwoliliśmy też sobie na daleko idące uproszczenia. Zauważmy, że wykres z rysunku 14a dotyczy częstotliwości $1kHz$, a my liczyliśmy szumy w pasmie $20kHz$. Tymczasem, jak wiadomo, przy mniejszych częstotliwościach szumy rosną. Orientacyjne zmiany w tym zakresie pokazuje rysunek 14b. Nie daje nam on zbyt wielu informacji, bo dotyczy sytuacji gdy $I_c = 0,2mA$ i $R_s = 2k\Omega$.

W katalogu znajdziemy często jeszcze jeden wykres, podobny do rys. 14a, dotyczący innej częstotliwości, np. $10kHz$. Tak podane informacje pozwolą wstępnie określić szumy i dobrać warunki pracy tranzystora, nie potrafimy natomiast na podstawie takich danych katalogowych przeprowadzić dokładniejszych obliczeń...

Popatrzmy teraz na **rysunek 15**. Pochodzi on z katalogu innej firmy, a dotyczy takiego samego tranzystora, jak rysunek 14. Zależność współczynnika szumów od prądu kolektora i rezystancji źródła przedstawiono tu w zupełnie inny sposób, niemniej sens jest ten sam. Znając rezystancję źródła łatwo możemy określić właściwy prąd kolektora i przybliżoną wartość współczynnika szumów. Zauważmy jednak, że rysunki 15a i 15b dotyczą częstotliwości odpowiednio $120kHz$ i $1Hz$. Znowu, do potrzebnych nam obliczeń w zakresie



Rys. 15.

pasma akustycznego mamy tylko dane przybliżone. Dobre i to - w praktyce powinno nam wystarczyć.

Kolejny przykład znajdziemy na **ryśunku 16**. Dotyczy on tranzystorów 2N5086 i 2N5087. W katalogu zamieszczono pięć wykresów, my wybraliśmy trzy; pozostałe są takie jak rysunek 16c, a dotyczą wąskiego pasma częstotliwości w zakresie $100Hz$ i $1kHz$.

Wykresy 16a i 16b przedstawiają zależność napięcia i prądu szumów w pasmie $1Hz$ w funkcji częstotliwości dla różnych prądów kolektora. Zauważmy, że na osi pionowej zaznaczono tu napięcie i prąd, a nie znane nam z rysunków 6 i 7 widmowe gęstości napięcia i prądu szumów wyrażone w nanowoltach i pikoamperach na pierwiastek z herca. Ponieważ jednak wielkości te dotyczą pasma $1Hz$, więc jest to praktycznie to samo.

Z kolei rysunek 16c przedstawia to samo, co rysunek 14a, tyle że zamieniono tu osie układu współrzędnych. Odnotujmy też, że dotyczy on nie pojedynczej częstotliwości, tylko całego użytecznego pasma akustycznego.

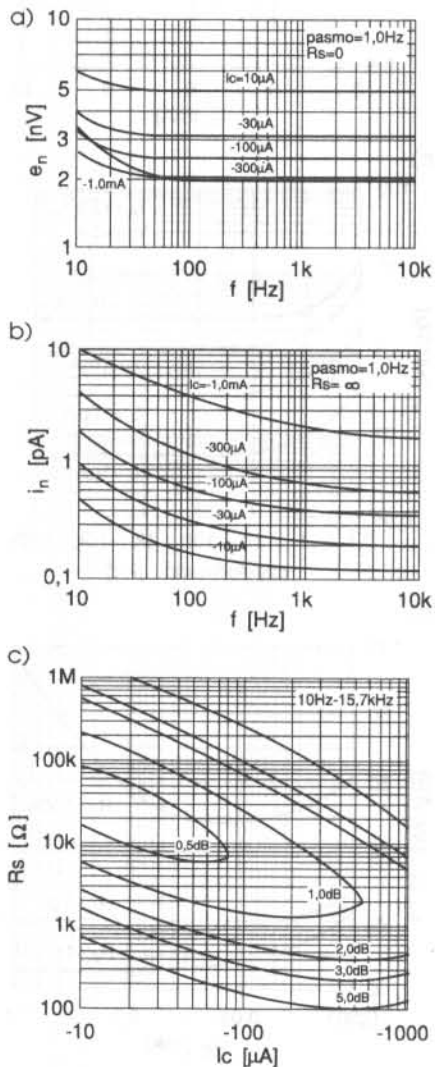
Taki zestaw danych jest już pełniejszy. Przede wszystkim z rysunku 16c możemy przy danej rezystancji źródła określić właściwy prąd pracy. Następnie dla wybranego prądu pracy obliczyć dokładnie na podstawie rysunków 16a i b całkowite napięcie szumów na wejściu i stosunek sygnał/szum.

Dopiero tu jasno widać, że w tranzystorach gęstość napięcia szumów maleje ze wzrostem prądu kolektora, a odwrotnie jest z gęstością prądu szumów.

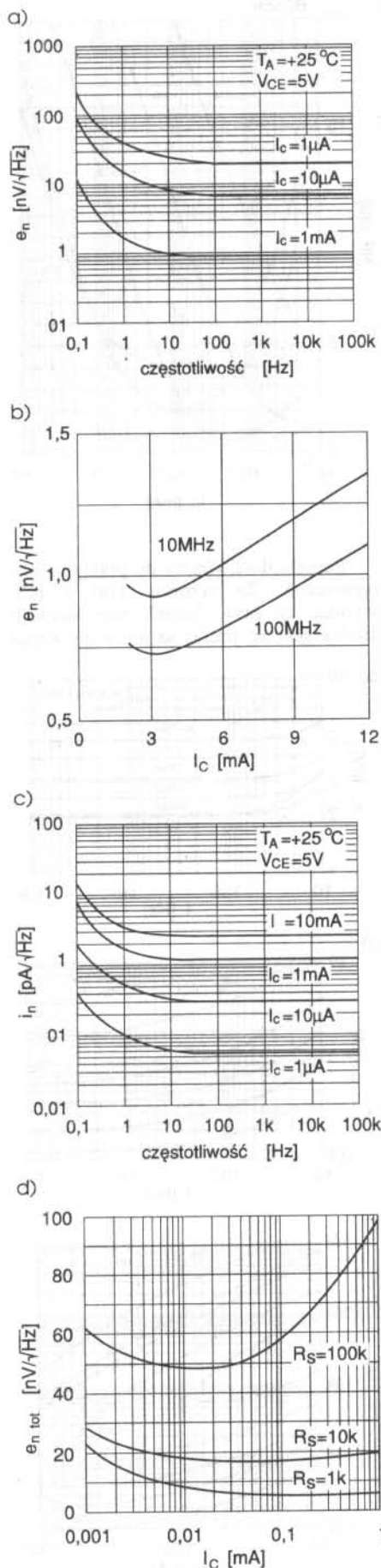
W zależności od rezystancji źródła dobieramy tak prąd kolektora, aby uzyskać najmniejszy szum całkowity.

Pomocą jest gotowy rysunek 16c, do dokładniejszych obliczeń potrzebne będą wzory (12), (17), (18), (19).

Pomału dochodzimy do praktycznych ograniczeń. Ze wzorów (19) i (18) wynika, że przy dużych rezystancjach źródła gęstość prądu szumów powinna



Rys. 16.



być jak najmniejsza; z rysunku 16b widać, iż uzyskamy to przy prądach kolektora rzędu pojedynczych mikroamperów... No tak, ale przy takich małych prądach występują innego typu kłopoty ze wzmocnieniem. Notujemy więc, że tranzystory bipolarne nie nadają się do pracy przy bardzo dużej rezystancji źródła sygnału.

Kolejnym przykładem (rys. 17) niech będzie niskoszumna para tranzystorów npn SSM-2210. Są to dwa jednakowe tranzystory o bardzo wysokich parametrach, dobrze nadające się do superniskoszumnych układów.

Na podstawie rysunków 17a, b, c, znając warunki wejściowe: rezystancję źródła i przyjęty stosowny prąd kolektora, możemy obliczyć dokładne wartości całkowitego napięcia szumów (wzór (19) i poprzednie), a potem wartość stosunku sygnał/szum.

W katalogu nie znajdziemy tym razem gotowego rysunku wyrażającego zależność współczynnika szumów NF od prądu kolektora i rezystancji źródła. W zamian mamy niosący podobną treść wykres z rysunku 17d przedstawiający całkowitą gęstość napięcia szumów w zależności od prądu kolektora i rezystancji źródła. Wprowadzamy tu nowe pojęcie: całkowita gęstość napięcia szumów - oznaczmy ją $e_{n,tot}$. Jest to wygodna miara, dotyczy konkretnego

wzmacniacza. Na rys. 17d przedstawiono ją w funkcji prądu kolektora, a parametrem jest rezystancja źródła sygnału. W tej całkowitej gęstości napięcia szumów (oczywiście odniesionej do wejścia) zawierają się oprócz znanej nam gęstości napięcia szumów e_n , także gęstość prądu szumów i_n (uwzględniliśmy konkretną wartość rezystancji źródła R_s) oraz gęstość szumu termicznego.

Możemy śmiało posługiwać się taką wielkością, choć w zasadzie nie uwzględniamy tu wzrostu szumów przy małych częstotliwościach, co w nowoczesnych półprzewodnikach nie ma większego znaczenia ze względu na niskie częstotliwości „kolana” charakterystyk szumowych f_{cu} , f_{ci} - wystarczy porównać rysunki 6 i 7 z rysunkami 17a i 17c.

Może to wszystko wydaje się trochę skomplikowane, ale jest to naprawdę wygodna miara szumów konkretnego układu wzmacniacza.

Korzystając z pojęcia całkowitej gęstości napięcia szumów, w następnym odcinku przejdziemy łagodnie od szumów tranzystora do szumów wzmacniacza. Dojdziemy wtedy do bardzo ciekawych wniosków praktycznych, które sownie wynagrodzą cierpliwym Czytelnikom trud przeczycania poprzednich sześciu odcinków.

Piotr Górecki