

W poprzednim odcinku omówiliśmy podstawowe mechanizmy powstawania szumów. Zrozumienie tych podstaw jest potrzebne każdemu szanującemu się elektronikowi, w praktyce jednak nie analizuje się wszystkich składowych szumów oddzielnie. Niskoszumny układ scalony (najczęściej wzmacniacz operacyjny), będący obecnie podstawą budowy większości przedwzmacniaczy, składa się z kilkudziesięciu elementów, z których każdy ma po kilka źródeł szumu, a więc szczegółowa analiza elementów składowych byłaby kłopotliwa i pracochłonna. Nas interesuje przede wszystkim napięcie szumów na wyjściu. Jak je obliczyć na podstawie parametrów katalogowych?



Szumy, część 3

Do pytania wrócimy, najpierw dowiedzmy się jakie parametry znajdziemy w katalogach, jak je rozumieć i jak z nich korzystać.

Wyobraźmy sobie w tym celu, choćby jako czarną skrzynkę, wzmacniacz mający wzmocnienie napięciowe powiedzmy A_u i pasmo B. Jeżeli wejście takiego wzmacniacza zostanie zwarte do masy, to na wyjściu mimo wszystko pojawi się szum. Będzie to oczywiście szum własny tego wzmacniacza, bo wejście jest zwarte. Jeśli skuteczną wartość napięcia tego szumu podzielimy przez wartość wzmocnienia, to otrzymamy napięcie szumów odniesione do wejścia - wyrazimy je zwykle w mikrowoltach i będzie dotyczyć pasma o szerokości B.

Odniesienie szumów do wejścia jest celowe i bardzo wygodne przy późniejszych obliczeniach - aby obliczyć szum wyjściowy przy innym wzmocnieniu wystarczy pomnożyć to napięcie szumów wejściowych przez aktualną wartość wzmocnienia.

Nasz wzmacniacz możemy więc przedstawić w postaci jak na **rysunku 5a**, gdzie składa się on z bezszumnego wzmacniacza i źródła napięcia szumów E_n .

Jeżeli próby te przeprowadzimy umieszczając na wyjściu wzmacniacza przesłany filtr o wąskim pasmie np. 1Hz to okaże się, iż przy najniższych częstotliwościach szumy są większe.

Uwzględniając szerokość pasma, a właściwie pierwiastek z pasma użytego filtru, możemy więc dla konkretnego elementu wzmacniającego określić w ten sposób widmową gęstość napięcia szumów odniesionych do wejścia, a wyrażoną w znanych nam już nanowoltach na pierwiastek z herca. Taki też wykres znajdziemy na **rysunku 6**.

I tu wreszcie doszliśmy do czegoś naprawdę praktycznego - rysunek 6 przedstawia gęstość zwarciovego napięcia szumów odniesionych do wejścia (oznaczenie e_n) popularnego układu $\mu A741$. Pełna angielska nazwa tego parametru brzmi: „equivalent short-circuit input noise voltage density”, w katalogach spotkamy jednak określenia „(input) noise voltage”, „voltage noise density”, a niekiedy „mean square noise voltage” wyrażone w V^2/Hz .

Jeśli teraz do wejścia naszego przykładowego wzmacniacza dołączymy rezystor R, to szumy na wyjściu wzrosną - na pewno będzie to skutkiem dodania szumów (termicznych) rezystora wejściowego. Ale szumy wyjściowe wzrosną więcej, niż wynikałoby z prostego dodania i wzmocnienia szumów rezystora

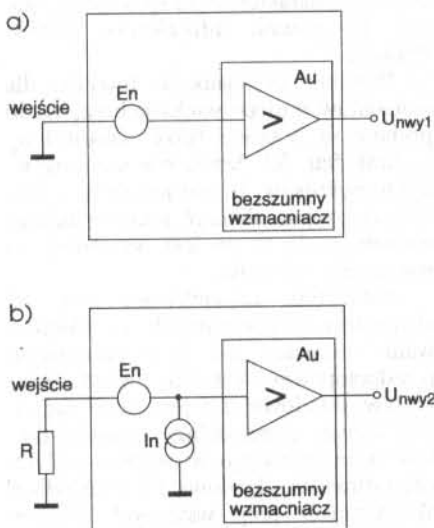
- okazuje się, że po dołączeniu do wejścia rezystora, wzrosły szumy samego wzmacniacza! Mało tego, jeśli do wejścia dołączymy niewielki kondensator (który przecież nie szumi) mający w interesującym nas pasmie częstotliwości reaktancję pojemnościową X, to wzrost szumów będzie proporcjonalny do wartości tej reaktancji!

Wygląda na to, że pojawiło się dodatkowe źródło szumów. Jak to wyjaśnić?

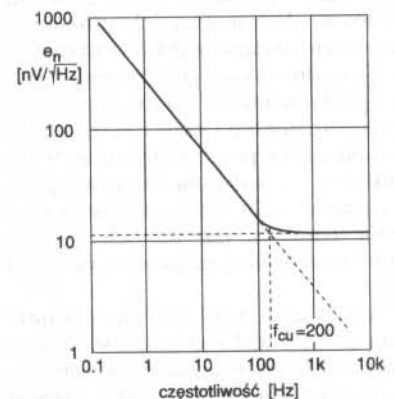
Otóż źródła szumów naszego układu scalonego mają różną naturę, jedne z nich przypominają źródła napięcia, inne są źródłami prądowymi. Jak wiemy, jeśli do źródła prądowego dołączymy rezystancję, a dokładniej mówiąc: impedancję, to napięcie przy jednakowym prądzie będzie wprost proporcjonalne do wartości tej impedancji. I taką właśnie sytuację mamy na wejściu naszego wzmacniacza, szumowy schemat zastępczy którego jest pokazany na **rysunku 5b** - przy zwarciu wejścia zastępcze prądowe źródło szumów nie wnosi swojego wkładu w szum całkowity.

Wartość prądu szumów wzmacniacza I_n możemy ustalić na podstawie doświadczeń znając wartość wzmocnienia oraz całkowite napięcie szumów z rezystorem R (U_{nwy2}), zmierzone wcześniej napięcie szumów przy zwarciu wejścia (U_{nwy1}) oraz obliczone szumy dołączonego rezystora. To co wyjdzie z wycień jest napięciem szumów, jakie powstało wskutek przepływu prądu szumów I_n przez rezystancję R. Otrzymane napięcie podzielimy więc przez wartość R i otrzymujemy poszukiwany prąd szumów wzmacniacza odniesiony do wejścia (I_n). Tak mniej więcej robi się to w praktyce, tyle że przy użyciu odpowiednich filtrów.

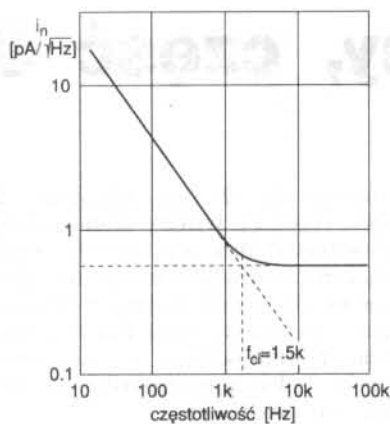
Oczywiście, po uwzględnieniu szeroko-



Rys. 5. Szumowy schemat zastępczy wzmacniacza



Rys. 6. Wykres gęstości widmowej wejściowego napięcia szumów na przykładzie układu $\mu A741$



Rys. 7. Wykres widmowej gęstości prądu szumów na przykładzie układu $\mu A741$

kości pasma, podobnie jak przy napięciu, dojdziemy do widmowej gęstości prądu szumów odniesionych do wejścia (i_n). Wyrzucimy je w pikoamperach na pierwiastek z herca.

Rysunek 7 przedstawia widmową gęstość prądu szumów wzmacniacza $\mu A741$.

Wprowadziliśmy oto nowe pojęcie, na pewno proste, ale o fundamentalnym znaczeniu praktycznym - szumowy układ zastępczy rzeczywistego wzmacniacza. Stosowny schemat znajdziemy na rysunku 5b: na wejściu bezszumnego wzmacniacza mamy zastępcze napięciowe źródło szumów E_n , oraz zastępcze prądowe źródło szumów I_n .

Doszliśmy tu do ważnej konkluzji. Do praktycznych obliczeń przyjmuje się uproszczone modele elementów, gdzie wszystkie występujące w danym elemencie źródła szumów są niejako zsumowane i przedstawione w postaci dwóch zastępczych źródeł szumów - napięciowego i prądowego.

Dodajmy jeszcze, że w literaturze same źródła napięcia i prądu szumów (na naszych rysunkach: E_n oraz I_n) oznaczane są często na schematach małymi literami e_n, i_n ; tak samo zapisuje się napięcia i prądy szumów generowane przez te źródła w określonym pasmie częstotliwości (żeby pokazać, iż są to szумы składowe). Nie można ich utożsamiać z poznanymi wcześniej (także oznaczanymi e_n, i_n) widmowymi gęstościami napięcia i prądu szumów. Często prowadzi to do nieporozumień i żeby uniknąć takiego zamieszania, przypominamy, że w tym artykule e_n, i_n oznaczają widmowe gęstości szumów, a E_n, I_n to zarówno same źródła szumów, jak też ich napięcie i prąd w określonym pasmie częstotliwości.

Rozumiemy już dokładnie sprawę zastępczych źródeł szumu, ale w praktyce zazwyczaj nie robimy takich eksperymentów ze wzmacniaczem, a wprost przeciwnie - w katalogu znajdujemy gotowe charakterystyki gęstości prądu i napięcia szumów. Chcemy na podstawie da-

nych katalogowych obliczyć szum wyjściowy praktycznego układu. Przekonaliśmy się już, że ze względów praktycznych korzystniej jest przeprowadzać obliczenia dla szumów odniesionych do wejścia. Jak zatem obliczyć całkowite napięcie szumów wejściowych?

Szum ten składa się z trzech składników (patrz rys. 8):

- szumu termicznego U_t generowanego przez rezystancję wewnętrzną źródła sygnału R_s (w rzeczywistym układzie zawsze występuje R_s);
- szumu pochodzącego ze źródła napięcia E_n
- szumu wynikającego z przepływu prądu szumów I_n przez rezystancję R_s .

Poradzimy sobie z szumem termicznym korzystając z wzoru (12) lub (13).

W katalogach znajdziemy wykresy podobne do naszych rysunków 6 i 7 przedstawiające gęstość widmową zastępczego prądowego i napięciowego źródła szumów - widać jednak, że nie mamy tu do czynienia z szumem białym. Jest to natomiast złożenie szumu białego (szумы termiczne i śrutowe) oraz szumu różowego (szумы migotania).

Jak obliczyć napięcie czy prąd takiego szumu w danym pasmie?

W tym celu wprowadzamy następnym parametrem - f_c - charakterystyczną częstotliwość zwaną po angielsku corner frequency (częstotliwość narożna, częstotliwość załamania, częstotliwość kolana). Jest to częstotliwość, przy której wielkość szumu białego i różowego są sobie równe. Częstotliwości te zaznaczono na rysunkach 6 i 7 - zauważmy, iż są to częstotliwości odpowiednio 200Hz i 1500Hz. Powyżej tych częstotliwości gęstość napięcia i prądu szumów jest stała i równa podawanej w katalogach wartości - dla $\mu A741$ jest to $40nV/\sqrt{Hz}$ i $0,25pA/\sqrt{Hz}$. Poniżej tych częstotliwości gęstość widmowa wzrasta ze stałym nachyleniem.

Nie wchodząc w szczegółowe wyjaśnienia podajemy końcowe wzory na obliczenie napięcia i prądu szumów w danym pasmie dla szumu o takiej charakterystyce:

$$E_n = e_n \sqrt{f_{cu} \cdot \ln(f_g / f_{fd}) + (f_g - f_{fd})} \quad (17)$$

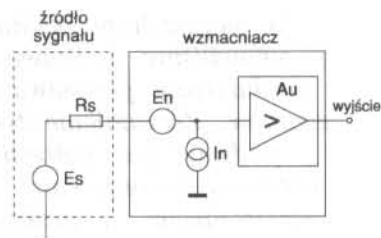
gdzie:

- e_n - katalogowa wartość gęstości napięcia szumów
- f_g, f_{fd} - częstotliwości górna i dolna interesującego pasma częstotliwości
- f_{cu} - częstotliwość załamania charakterystyki napięciowej
- \ln - logarytm naturalny.

Wzór (17) jest podobny do wzoru (6), widzimy więc które składniki wzoru (17) dotyczą szumu białego, a które różowego.

Dla prądu jest podobnie:

$$I_n = i_n \sqrt{f_{cu} \cdot \ln(f_g / f_{fd}) + (f_g - f_{fd})} \quad (18)$$



Rys. 8. Szumowy schemat zastępczy wzmacniacza z rzeczywistym źródłem sygnału

W tym miejscu zniknął też koszmarny pierwiastek z herca. Ponadto analizując wzory (17) i (18) widzimy jasno, że elementy niskoszumne powinny mieć jak najmniejsze wartości e_n, i_n , jak też możliwie niskie, najlepiej poniżej pasma akustycznego częstotliwości f_{cu}, f_{ci} .

Wróćmy na chwilę do pytania o sposób korzystania z parametrów katalogowych. Dla większości elementów niskoszumnych podane są wykresy takie jak na rysunkach 6 i 7, przedstawiające gęstość widmową napięcia i prądu szumów w funkcji częstotliwości. Choć dokładność rysunków w katalogach poszczególnych firm bywa różna, na pewno możemy z nich wyznaczyć cztery potrzebne parametry: gęstości składowych szumu białego e_n, i_n (reprezentowane przez poziome części charakterystyk) oraz częstotliwości „kolana” charakterystyki f_{cu}, f_{ci} .

W niektórych katalogach nie ma wykresów, ale w tabeli podaje się te cztery parametry - oba sposoby są jednakowo dobre.

Spotyka się też po dwie wartości e_n, i_n . Jedna dotyczy zwykle częstotliwości 1kHz, druga 10Hz. Pierwsza jest omawianą wcześniej gęstością szumu białego, którą w artykule oznaczamy e_n oraz i_n . Z drugiej pośrednio wynika częstotliwość „kolana”, można by ją zresztą wyliczyć uwzględniając stałe nachylenie charakterystyki spektralnej szumu 1/f równe 3dB/oktawę (10dB/dekadę).

W wielu przypadkach (zwykle dla elementów o nieco większych szumach) podane są w tabeli tylko wartości e_n, i_n , brak f_{cu}, f_{ci} . Jeżeli nie ma stosownych wykresów, to nie jesteśmy w stanie precyzyjnie obliczyć szumów takiego elementu, ale to co jest wystarczy do wstępnych obliczeń.

Poza tym częstotliwości f_{cu}, f_{ci} elementów niskoszumnych są zdecydowanie mniejsze niż w przykładowym przedpotopowym układzie $\mu A741$, więc wpływ składowej 1/f jest dużo mniejszy. Dlatego uwzględniając mniejszą czułość ucha ludzkiego w zakresie niskich częstotliwości, składową 1/f w układach akustycznych przy wstępnych obliczeniach często się pomija.