

Szumy, część 3



W tej części zajmiemy się nieco bliżej omówieniem stosowanych w praktyce parametrów szumowych układów, ze szczególnym uwzględnieniem urządzeń elektroakustycznych. Co prawda w wielu książkach podaje się odpowiednie definicje, jednak nie wszyscy dobrze rozumieją sens tych parametrów. A niestety, w ofertach handlowych i opisach układów często wręcz żongluje się parametrami szumowymi tak, aby urządzenie wyglądało na lepsze niż jest w rzeczywistości.

Wejściowe napięcie szumów

W poprzednich odcinkach doszliśmy do wniosku, że wszystkie źródła szumów wzmacniacza mogą być z dobrym przybliżeniem zsumowane i przedstawione w postaci tylko dwóch źródeł szumu: napięciowego i prądowego. Można i trzeba też sobie wyobrazić, że te zastępcze źródła szumu występują na wejściu wzmacniacza. Do obliczenia całkowitego napięcia szumów odniesionego do wejścia trzeba znać szerokość pasma wzmacniacza oraz impedancję źródła sygnału. Parametr „napięcie szumów odniesione do wejścia”

Napięcie szumów odniesione do wejścia jest jednym z najważniejszych parametrów wzmacniacza. Nie zależy ono od wzmocnienia, przy określonej rezystancji źródła sygnału i szerokości pasma jest wielkością stałą.

jest bardzo istotnym i obiektywnym parametrem wszelkich wzmacniaczy, nie zależy bowiem od wzmocnienia, a w określonych warunkach dla danej szerokości pasma i jakiejś rezystancji źródła sygnału jest wielkością stałą. Dla innej rezystancji źródła sygnału napięcie szumów wejściowych będzie oczywiście inne. Brak ogólnych ustaleń w tym zakresie może spowodować pewne niejasności, dlatego przy podawaniu napięcia szumów wejściowych powinno być podane pasmo (a jak się jeszcze okaże, także ewentualnie użyte filtry) oraz rezystancja źródła.

Stosunek sygnał/szum

Obliczenie napięcia szumów na wejściu pozwoli określić kolejny, w zasadzie najważniejszy i najczęściej podawany parametr - stosunek sygnał/szum. Stosunek sygnał/szum oznaczany S/N wyrażany jest najczęściej w decybelach:

$$S/N = 20 \log (U_s/U_n) \quad (20)$$

gdzie U_s to napięcie sygnału, U_n - napięcie szumów.

Ponieważ w praktycznych warunkach na wyjściu mierzymy nie napięcie

samego sygnału, ale zawsze napięcie sygnału i szumu, więc ściśle rzecz biorąc nie mierzymy parametru S/N tylko (S+N)/N. Nie ma to jednak znaczenia gdy tylko $S/N > 20\text{dB}$.

Zasadniczo interesuje nas stosunek sygnał/szum na wyjściu wzmacniacza, ale jeśli wcześniej uwzględniliśmy szumy wnoszone przez wzmacniacz i poziom szumów odnieśliśmy do wejścia, to i teraz możemy mówić o stosunku sygnał/szum odniesionym do wejścia, a właściwie po prostu o stosunku sygnał/szum całego wzmacniacza.

Odnotujmy wyraźnie, że uwzględniamy tu wszystkie występujące źródła szumów; co ciekawe, wzmocnienie wzmacniacza nie gra tu roli (o ile tylko sygnały mieszczą się w liniowym obszarze pracy).

W wielu zastosowaniach stosunek sygnał/szum oblicza się dla mocy, a nie napięcia, co nie zmienia istoty sprawy.

Przybliżmy to za pomocą przykładu:

Jeśli mamy dwa źródła sygnału o równych rezystancjach wewnętrznych i różnych napięciach (powiedzmy, 1mV i 100mV), to gdy podamy je na wejście tego samego wzmacniacza o napięciu szumów wejściowych 1μV (oczywiście w tym jednym mikrowoltie uwzględnione są też szumy wynikające z rezystancji wewnętrznej tych źródeł), wtedy aktualny stosunek sygnał/szum dla obu przypadków - odpowiednio 60dB i 100dB - będzie różnił się o niebotyczną wartość 40dB!

Notujemy więc kolejny ważny wniosek: stosunek sygnał/szum nie jest stały dla danego wzmacniacza, zależy bowiem od wielkości użytecznego sygnału wejściowego.

Przykładowo, dla wzmacniaczy mocy podaje się niekiedy w katalogach napięcia szumów na wejściu, ale częściej - stosunek sygnał/szum (S/N bądź (S+N)/N) dla jakiejś mocy wyjściowej. Trzeba przyznać, że poważne firmy, choćby Philips, dla wzmacniacza o dużej mocy (znanego nam już TDA1514A), podają stosunek S/N równy typowo 83dB (min. 80dB) przy mocy wyjściowej 50mW (!), choć

moc maksymalna wynosi 50W. Moc 50mW na obciążeniu 8Ω oznacza napięcie około 0,63V, 83dB równa się 14000x, więc napięcie szumów wejściowych wynosi około 45μV. Jeśli tę wartość odniesiemy do pełnej mocy 50W ($U = 20\text{V}$) otrzymamy stosunek sygnał/szum, a właściwie dynamikę ponad 110dB! Jednak bliższa praktyki jest wartość 83dB, ponieważ bardzo często słuchamy muzyki i innych programów przy małej sile dźwięku i interesujące są parametry szumowe w takich warunkach.

Jednak w katalogach mikserów i wzmacniaczy często podaje się dynamikę, czyli stosunek największego dopuszczalnego sygnału do szumu.

Zdecydowanie bardziej obiektywnym sposobem określenia właściwości produktu byłoby podanie wartości szumów odniesionych do wejścia.

Dynamika w zasadzie nic nie mówi o szumach, aczkolwiek jest bardzo ważna w niektórych rodzajach wzmacniaczy (np. telewizyjny wzmacniacz antenowy) ze względu na zniekształcenia silnych sygnałów wejściowych.

I znów posłużymy się przykładem: Przyznamy, że ładnie wygląda w ofercie handlowej zapis: dynamika 120dB!. Nie dajmy się na to nabrać. Taką dynamikę ma bowiem dobry przedwzmacniacz mikrofonowy o napięciu szumów na wejściu 0,5μV (przy typowej rezystancji mikrofonu - 200Ω) i maksymalnym sygnale 0,5V, jak też wejście mikrofonowe zupełnie kiepskiego rzemieślniczego miksera z szumami 5μV i maksymalnym sygnałem wejściowym (nie wiadomo po co) aż 5V. W rzeczywistości sprawa jest nieco bardziej złożona, bo przedwzmacniacze mają często regulowane wzmocnienie (w kanale miksera górne pokrętło GAIN) i dynamikę podaje się dla najmniejszego wzmocnienia, co, jeszcze bardziej zaciemnia obraz.

Gdy więc sygnał z mikrofonu będzie miał napięcie około 5mV, to stosunek sygnał/szum wyniesie dla pierwszego urządzenia 80dB, dla drugiego 60dB. A przecież różnica 20dB ma ogromne znaczenie!

Dla tego samego wzmacniacza inny będzie stosunek sygnał/szum przy głośnym śpiewie wokalisty wprost do mikrofonu z odległości kilku centymetrów (sygnał mikrofonu może mieć

wtedy napięcie rzędu stu i więcej miliwoltów), a inny, gdy spokojny mówca oddalony będzie 30cm od mikrofonu i otrzymany sygnał użyteczny będzie na poziomie miliwolta.

Nie dajmy się więc nabrać na rewelacyjnie duży stosunek sygnał/szum lub wspaniałą dynamikę. Może to być - choć, jak pokazaliśmy na przykładach, nie musi - zwykły chwyt reklamowy. Należy więc sprawdzić, w stosunku do jakiego poziomu sygnału określano te parametry.

Uff!

Ale to jeszcze nie koniec pułapek. W powszechnym użyciu jest kolejny parametr wzmacniaczy...

Współczynnik szumów

Wielu elektroników ma problemy ze zrozumieniem sensu tego parametru. Sprawa jest naprawdę bardzo prosta, a przyczyną kłopotów jest nieco zawiła definicja. Współczynnik szumów jest po prostu miarą pogorszenia stosunku sygnał/szum po przejściu sygnału przez wzmacniacz.

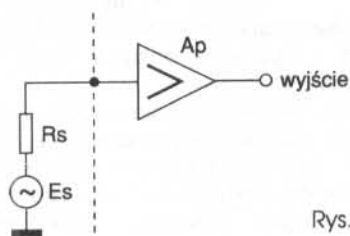
Dlaczego mówimy o pogorszeniu? Spróbujmy to wytłumaczyć w sposób uproszczony, ale zachowujący sens.

Dołączamy do wzmacniacza źródło sygnału: układ wygląda teraz jak na rysunku 9. Jeśli nawet założymy, że samo źródło sygnału E_s jest bezszumne, to tak naprawdę, w związku z występowaniem nieodłącznej rezystancji wewnętrznej R_s , każde źródło sygnału szumi - jak mówiliśmy - "samo z siebie", i to niezależnie od tego, czy dołączymy do niego jakiś wzmacniacz, czy nie! Możemy więc mówić o stosunku sygnał/szum także dla samego źródła (bez wzmacniacza) - tym razem niech dotyczy on mocy. Będzie to po prostu:

$$(S/N)_{we} = \frac{P_s}{P_t} \quad (21)$$

gdzie P_s oznacza całkowitą moc sygnału (wraz z własnymi szumami termicznymi), P_t - moc szumów termicznych.

Mamy tu stosunek sygnał/szum na wejściu wzmacniacza, ale dotyczący samego tylko źródła. To jest zupełnie coś innego niż omawiany wcześniej stosunek sygnał/szum odniesiony do wejścia (mówiliśmy o nim, że jest taki sam na wejściu i na wyjściu). Wcześniej uwzględnialiśmy źródła szumów wzmacniacza, teraz mówimy o stosunku sygnał/szum „gołego” źródła sygnału.



Rys. 9.

Jeśli źródło to dołączymy do naszego wzmacniacza o wzmacnieniu mocy równym A_p , to na wyjściu moc sygnału będzie wzmacniona A_p razy. Jeśli nasz wzmacniacz byłby bezszumny, to na wyjściu otrzymalibyśmy zarówno sygnał jak i szum termiczny źródła, wzmacnione A_p razy. Stosunek sygnał/szum na wyjściu wzmacniacza byłby taki sam jak stosunek sygnał/szum samego źródła. W rzeczywistym wzmacniaczu szum na wyjściu będzie większy niż wynikałoby to ze wzmacnienia szumu termicznego. Przecież A_p -krotnie zostaną wzmacnione nie tylko szumy termiczne, ale też szumy własne wzmacniacza reprezentowane w szumowym układzie zastępczym przez źródła napięciowe E_n i prądowe I_n .

Możemy więc napisać:

$$(S/N)_{wy} = \frac{(A_p \cdot P_s)}{P_{nwy}} \quad (22)$$

gdzie $(S/N)_{wy}$ jest stosunkiem sygnał/szum na wyjściu, P_{nwy} - mocą szumów na wyjściu (wzmacniony A_p -krotnie szum termiczny i wzmacnione szumy własne wzmacniacza).

Naturalnie, we wszystkich rzeczywistych wzmacniaczach stosunek sygnał/szum będzie gorszy na wyjściu niż na wejściu. Mamy więc kolejny parametr - miarę tego pogorszenia. Jest to współczynnik szumów (inaczej liczba szumów - noise figure):

$$F = \frac{(S/N)_{we}}{(S/N)_{wy}} \quad (23)$$

Dla wzmacniacza bezszumnego F równa się 1, w praktyce - zawsze $F > 1$.

Współczynnik ten wyraża się zazwyczaj w mierze decybelowej i wtedy oznacza się go NF (noise factor):

$$\begin{aligned} NF &= 10 \log F = \\ &= 10 \log \frac{(S/N)_{we}}{(S/N)_{wy}} \end{aligned} \quad (24)$$

NF dla wzmacniacza bezszumnego wynosi oczywiście 0dB. W praktyce określenia „noise figure” i „noise factor”

często używane są wymiennie (często obydwa są tłumaczone na polski jako „współczynnik szumów”), należy więc zwrócić uwagę, czy podaje się $F = 1,1$ czy $NF = 1,1\text{dB}$, bo to spora różnica.

Czym mniejsza wartość F i NF , tym mniej szumów wnosi wzmacniacz do wzmacnianego sygnału.

Mamy więc kolejne dwa parametry szumowe: F i NF , których sens fizyczny jest już jasny - jest to miara pogorszenia stosunku sygnał/szum po przejściu sygnału przez wzmacniacz. Parametry te są też bardzo wygodne w użyciu i często stosowane.

Właśnie ten parametr jest idealny, jeśli mamy określoną stałą wartość rezystancji źródła, dlatego jest powszechnie stosowany do charakteryzowania elementów i urządzeń w technice w.c.z., gdzie stosuje się typowe rezystancje 50Ω i 75Ω .

Ale nie ma róży bez kolców - mieliśmy mówić o pułapkach. Taką pułapką, w którą niektórym zdarzyło się wpaść, jest dążenie za wszelką cenę do obniżenia współczynnika szumów.

Jeżeli zapomnimy, że praktycznym celem jest uzyskanie największego możliwego stosunku sygnał/szum na wyjściu wzmacniacza, a skupimy się na zmniejszeniu współczynnika szumów, to możemy popełnić duże błędy.

Projektując na przykład wzmacniacz mikrofonowy ze wzmacniaczem operacyjnym z wejściami J-FET, który ma bardzo małą gęstość prądu szumów i_n , możemy uzyskać bardzo mały współczynnik szumów przy dużej rezystancji źródła sygnału. Ktoś wpadnie więc na pomysł, aby na przykład w szereg z mikrofonem włączyć dodatkowy rezystor o dużej wartości. Jeśli rezystancja wejściowa wzmacniacza będzie bardzo duża (o co nie trudno), to wzmacnienie praktycznie się nie zmieni.

Ponieważ wtedy we wzorze (25) składnik $4 \cdot k \cdot T \cdot R_s$ będzie duży, przy czym I_n jest bardzo małe, to uzyskany współczynnik szumów F będzie niewiele więk-

Tylko dla dociekliwych:

Spróbujemy wyrazić wzór na F za pomocą wcześniej poznanych pojęć. Możemy podstawić do wzoru (23) zależności (21) i (22) a następnie uwzględnić (11) oraz (19).

W naszym uproszczonym rozumowaniu nie wchodzimy w szczegóły, ale wynikiem jest wzór:

$$\begin{aligned} F &= \frac{4 \cdot k \cdot T \cdot R_s + E_n^2 + I_n^2 \cdot R_s^2}{4 \cdot k \cdot T \cdot R_s} = \\ &= 1 + \frac{E_n^2 + I_n^2 \cdot R_s^2}{4 \cdot k \cdot T \cdot R_s} \end{aligned} \quad (25)$$

Zauważmy, że we wzorze (25) nie

występuje P_s - współczynnik szumów nie zależy od poziomu sygnału, ze wzoru zniknęła też szerokość pasma B (ale jakby nie do końca, bo jednak E_n oraz I_n zależą od częstotliwości).

Powracając do definicji współczynnika szumów i patrząc na wzór (25) powiemy, że chodzi tu po prostu o związek szumów własnych wzmacniacza z szumami termicznymi źródła sygnału. Współczynnik szumów jest to więc stosunek wartości szumu całkowitego do szumu termicznego związane go ze źródłem sygnału.

szy od jedności, czyli wydawałoby się, że zbliżyliśmy się do ideału.

Niby tak, ale sztucznie zwiększona rezystancja źródła oznacza duże szumy termiczne - współczynnik szumów F wzmacniacza będzie bardzo mały, ale przecież wystąpi dodatkowy duży szum termiczny włączanego rezystora, zostanie on wzmocniony i stosunek sygnał/szum na wyjściu będzie wręcz fatalny!

Praktyczny przykład w tym zakresie podamy jeszcze przy omawianiu tranzystorów - przecież w katalogach tranzystorów często spotykamy parametr F.

Tak więc miejmy się na baczności przed uleganiem urokowi współczynnika szumu.

Podsumowanie wiadomości o parametrach szumowych

Parametry szumowe nieprzypadkowo omówiliśmy w określonej kolejności.

Niejako najbardziej pierwotne jest całkowite napięcie szumów odniesione do wejścia. Dla konkretnego wzmacniacza zależy ono tylko od impedancji źródła sygnału i szerokości pasma. Z kolei do obliczenia stosunku sygnał/szum potrzebna jest dodatkowo znajomość poziomu sygnału użytecznego. Także współczynnik szumów zależy od rezystancji źródła.

Wszystkie podane parametry są użyteczne pod warunkiem właściwego ich rozumienia, ale niestety żaden z nich

nie charakteryzuje w pełni właściwości szumowych układu. Dlatego, jeśli w katalogach elementów półprzewodnikowych czy kompletnych urządzeń znajdziemy podane wejściowe napięcie szumów, stosunek sygnał/szum lub współczynnik szumów, to nie możemy ich bezkrytycznie używać do obliczeń - zostały one określone dla konkretnych warunków, które prawdopodobnie są inne niż w naszym zastosowaniu (w danych katalogowych wartość rezystancji źródła wynosi zwykle 50 lub 600Ω, a pasma 10kHz).

Tematowi temu poświęcimy jeszcze trochę uwagi w następnych odcinkach przy omawianiu fizjologicznej czułości ucha ludzkiego.

Kartkówka

Po lekturze dotychczasowych odcinków poświęconych szumom proponujemy teraz krótki test sprawdzający. Wszyscy uważni Czytelnicy powinni umieć odpowiedzieć na następujące pytania:

- jak się mają do siebie wartość skuteczna i wartość międzyszczytowa napięcia szumów?
- co to jest widmowa gęstość mocy, napięcia lub prądu szumów?
- co to jest szum biały?
- co to jest szum różowy?
- jak obliczać moc i napięcie szumu białego w interesującym nas pasmie

częstotliwości?

- jak przeprowadzać obliczenia przy dawaniu kilku szumów składowych?
- skąd się bierze szum termiczny i jak się oblicza jego wielkość?
- czym różni się szum śrutowy od szumu termicznego?
- co nazywamy szumami migotania, jaką mają charakterystykę spektralną?
- dlaczego stosujemy pojęcie zastępczych źródeł szumu: napięciowego i prądowego?
- dlaczego używamy pojęcia szumów odniesionych do wejścia?
- jakie dwa źródła szumów trzeba uwzględnić przy praktycznym obliczaniu szumów całkowitych wzmacniacza?
- jak obliczyć całkowite napięcie szumów wzmacniacza na podstawie katalogowych charakterystyk widmowych zastępczych źródeł szumu?
- co oznacza określenie S/N?
- jaki jest sens pojęcia "współczynnik szumów"?
- dlaczego nie można bezkrytycznie przyjmować wartości napięcia i współczynnika szumów podawanych niekiedy w katalogach?

W następnym odcinku omówimy parametry szumowe rezystorów, kondensatorów, cewek i diod z punktu widzenia praktyka-konstruktora.

Piotr Górecki