

Kontynuujemy rozpoczęte w poprzednim numerze EP rozważania na temat szumów.



# Szumy, część 2

## Rodzaje i źródła szumów

### Szumy zewnętrzne

Szumy zewnętrzne mają swoje źródło poza układem, ale mogą oddziaływać na nasz układ. Szumy zewnętrzne i zakłócenia mogą być pochodzenia naturalnego (zorza polarna, wylądowania atmosferyczne, aktywność słońca). Najczęściej są spowodowane przez człowieka (silniki komutatorowe, wszelkie styki, układy zapłonowe itp.). Do zakłóceń zaliczymy też wpływy sieci energetycznej. Sposoby walki z zakłóceniami opiszemy w jednej z następnych części. W tym artykule szumy zewnętrzne i zakłócenia traktować będziemy jednakowo i dla odróżnienia od szumów wewnętrznych będziemy je nazywać zakłóceniami.

### Szumy wewnętrzne

W każdym rzeczywistym elemencie elektronicznym i układzie występują szumy. Powstają one samoistnie w elementach układu. Nie jest możliwa całkowita likwidacja szumów, można je tylko zmniejszać do pewnych granic - elektronika-praktyka interesuje zatem sposób ich obliczania. Zanim do tego dojdziemy, powinniśmy zapoznać się z różnymi mechanizmami powstawania szumów, ponieważ - w zależności od pochodzenia - szumy mają różną charakterystykę widmową i wielkość. Dla pełniejszego obrazu omówimy kilka takich mechanizmów. W każdym elemencie elektronicznym można wyróżnić trzy składowe szumu, tj. szum cieplny, szum śrutowy, szum "1/f". W niektórych elementach istotne znaczenie może mieć jeszcze czwarta składowa - szumy wybuchowe.

### Szumy cieplne

Szum cieplny nazywany jest także szumem Johnsona, szumem rezystancyjnym lub szumem Nyquista.

W każdym przewodniku (rezystorze), w temperaturach powyżej zera absolutnego, występują chaotyczne ruchy nośników (wolnych elektronów), znane jako ruchy Browna. Przyczyną tych ruchów jest energia cieplna elektronów - czym wyższa temperatura, tym większa energia i większe ruchy noś-

ników. W konsekwencji na rezystancji występuje szum. Zauważmy, że rezystor wcale nie musi być włączony do układu! Tak więc wszystkie rezystory, jakie mamy w naszych szufladach i pudełkach, szumią sobie bezustannie, także teraz. Wszystko dlatego, że przyczyną jest wszechobecna energia cieplna.

Okazuje się, co ważne, iż szum cieplny jest szumem białym i w rezystorze idealnym dysponowana moc szumów w pasmie o szerokości B wynosi:

$$P = 4 \cdot k \cdot T \cdot B \quad (11)$$

gdzie:  $k$  - stała Boltzmanna  $1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ,  $T$  - temperatura absolutna w stopniach Kelvina,  $B$  - szerokość pasma częstotliwości.

W rzeczywistości szum zawsze występuje na pewnej niezerowej rezystancji  $R$ , a ponieważ

$$P = \frac{U^2}{R}$$

zatem:

$$\frac{U^2}{R} = 4 \cdot k \cdot T \cdot B$$

stąd:

$$U = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot B \cdot R} \quad (12)$$

$U$  to oczywiście skuteczna wartość napięcia szumów.

Ze wzorów (11) i (12) wynika, że dla dowolnego połączenia dużej nawet ilości rezystorów dysponowana moc szumów termicznych na zaciskach takiego zestawu jest ściśle określona i zależy od temperatury oraz szerokości pasma, a nie od ilości połączonych rezystorów czy ich rezystancji. Z kolei napięcie szumów cieplnych jest proporcjonalne do rezystancji, na której występują. I to jest kolejny ważny praktyczny wniosek.

Naszym celem jest zminimalizowanie napięcia szumów. Analizując wzór (12) dostrzegamy trzy sposoby.

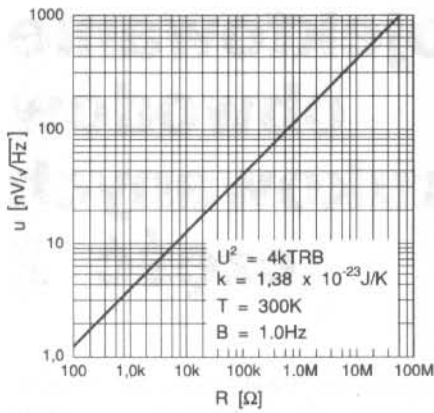
Pierwszy - to obniżanie temperatury. Najczęściej w praktyce amatorskiej jest to niewykonalne, a gdyby

nawet było, to efekt nie jest wart zachodu. Zauważmy bowiem, iż po obniżeniu temperatury  $z$ , powiedzmy,  $+27^\circ\text{C}$  (300K) na  $-48^\circ\text{C}$  (225K), co w skali bezwzględnej oznacza zmniejszenie temperatury o jedną czwartą, napięcie szumów zmniejszy się z wartości  $U$  do wartości  $U(0,75)^{1/2} = 0,866U$ , czyli o 13%. Istotny efekt można uzyskać chłodząc układ do temperatury ciekłego azotu (77K) lub ciekłego helu (4K), co czyni się w niektórych zastosowaniach profesjonalnych.

Drugi sposób to zmniejszenie pasma. Należy przyjąć żelazną zasadę, żeby nie zwiększać pasma ponad rzeczywiste potrzeby. Jeśli jakiś system elektroakustyczny będzie stosowany do przekazywania mowy, to naprawdę nie ma potrzeby poszerzania pasma do 20kHz. Do obcięcia zbędnego pasma stosuje się filtry w torze wzmacniającym. Ograniczanie pasma do rzeczywistej potrzebnej wielkości ma jeszcze większe znaczenie w czułych układach pomiarowych.

Trzecim sposobem jest zmniejszanie rezystancji. O jaką rezystancję tu chodzi? Przede wszystkim dotyczy to rezystancji wewnętrznej źródła sygnału, ale także wszystkich rezystancji występujących w urządzeniu na drodze sygnału. Najczęściej rezystancja źródła sygnału jest z góry określona i nie mamy na nią żadnego wpływu; na przykład będzie to rezystancja mikrofonu, piezoelektrycznego przetwornika gramofonowego czy głowicy magnetofonu. Ale rezystancje w układzie możemy dobrać według potrzeb. To bardzo istotne zagadnienie będzie szeroko omówione w następnych odcinkach Notatnika.

Wzór (12) jest bardzo często używany do obliczeń. Najczęściej jednak zakłada się stałą temperaturę pracy (w zakresie temperatur pokojowych) i wtedy wzór (12) upraszcza się do postaci najczęściej używanej w praktyce:



Rys. 4. Gęstość widmowa napięcia szumów cieplnych rezystorów w temperaturze pokojowej

$$U = 1,28 \cdot 10^{-10} \sqrt{B \cdot R} \quad (13)$$

gdzie  $U$  jest mierzone w woltach wartości skutecznej,  $R$  - w omach,  $B$  - w hercach.

Żeby mieć jasne wyobrażenie o skali problemu, obliczymy teraz napięcia szumów cieplnych idealnych rezystorów o rezystancjach spotykanych w praktyce konstruktora sprzętu audio.  $50\Omega$  to rezystancja najwyższej klasy przetworników gramofonowych,  $200\Omega$  to typowa rezystancja mikrofonu,  $47k\Omega$  - popularna wartość rezystancji wejściowej wielu wejść sygnałowych,  $1M\Omega$  - rezystancja wejść wysokoomowych.

Liczymy więc skuteczną wartość napięcia szumów własnych w pasmie  $20kHz$  (niech dla ułatwienia obliczeń będzie to pasmo  $20Hz \dots 20020Hz$ ) na następujących rezystancjach:

$$50\Omega: U = 1,28 \cdot 10^{-10} \cdot (50 \cdot 2 \cdot 10^4)^{1/2} = 1,28 \cdot 10^{-10} \cdot 10^3 = 1,28 \cdot 10^{-7} = 0,128 \mu V$$

$$200\Omega: U = 1,28 \cdot 10^{-10} \cdot (200 \cdot 2 \cdot 10^4)^{1/2} = 0,256 \mu V$$

$$47k\Omega: U = 1,24 \mu V$$

$$1M\Omega: U = 18,1 \mu V.$$

Choćbyśmy więc mieli idealny, nieszumiący wzmacniacz, to i tak musimy się liczyć z obecnością szumów cieplnych wynikających z rezystancji wewnętrznej źródeł sygnałów.

Takich napięć w większości układów audio nie można pomijać i, jak się okaże, są one porównywalne z napięciami szumów własnych wzmacniaczy lepszej klasy.

Szum cieplny jest szumem białym. Wobec tego dla każdej rezystancji możemy podać widmową gęstość napięcia szumów (nadal omawiamy przy tym pracę w temperaturach pokojowych).

Popatrzmy na wzory (6) i (12)

$$U = u \cdot \sqrt{B} \quad (6)$$

$$U = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot B \cdot R} \quad (12)$$

Dla szumu cieplnego widmowa gęstość napięcia szumów wynosi zatem:

$$u = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R} \quad (14)$$

Na rysunku 4 znajdziemy przydatny w praktyce wykres zależności  $u$  od rezystancji  $R$ .

## Szumy śrutowe

Szum śrutowy (ang. shot noise) zwany jest czasem szumem Shottky'ego. Przy omawianiu szumu cieplnego podkreślaliśmy, że występuje on nawet wtedy, gdy rezystancja nie jest dołączona do napięcia zewnętrznego. Szum śrutowy natomiast występuje tylko przy przepływie prądu, gdyż jest związany z dyskretną postacią ładunków elektrycznych i chaotycznymi procesami ich generacji - rekombinacji. Prąd to przecież nic innego niż ruch poszczególnych nośników (elektronów). Gdy więc elektrony przechodzą przez barierę potencjału, wypadkowy prąd nie jest idealnie ciągły (jest przecież wynikiem przepływu pojedynczych elektronów). Ponieważ liczba elektronów ciągle fluktuuje, zatem chwilowa wartość prądu zmienia się wokół jakiejś wartości średniej. Te fluktuacje prądu to właśnie szum śrutowy.

Szum śrutowy ma charakter szumu białego. Wartość skuteczna prądu szumów śrutowych przy przepływie prądu  $I$  została po raz pierwszy obliczona przez Shottky'ego jako:

$$I_{sh} = \sqrt{2 \cdot q \cdot I \cdot B}$$

gdzie:  $q$  - ładunek elektronu  $1,59 \cdot 10^{-19}C$ .

Wzór ten można uprościć do postaci:

$$I_{sh} = 5,64 \cdot 10^{-10} \sqrt{I \cdot B}$$

Wzór ten, w odróżnieniu od podanych poprzednio dla szumu termicznego, nie ma większego praktycznego znaczenia, warto jednak odnotować, że moc szumu śrutowego rośnie wprost proporcjonalnie do prądu płynącego przez element.

## Szumy migotania

Szumy te są po angielsku zwane **flicker noise**. Pokrewne określenia to excess noise - szumy nadmiarowe oraz defect noise.

W lampach elektronowych szumy migotania spowodowane są przypadkową fluktuacją prądu emisyjnego katody. W półprzewodnikach związane są z defektami siatki krystalicznej i efektami powierzchniowymi. W rezystorach ich powodem jest nierównomierność rozłożenia materiału rezystancyjnego. Szumy te mają charakter szumu różowego ( $1/f$ ).

W literaturze istnieje tendencja nazywania wszystkich szumów o cha-

rakterystyce widmowej typu  $1/f$  szumami migotania (flicker noise). Niekiedy używa się wymiennie nazw „szumy migotania” i „szumy  $1/f$ ”. Przez „wrzucenie wszystkiego do jednego garnka” może wystąpić pewna niejasność powodująca pomieszanie pojęć.

Przypominamy więc, iż nazwy „szum różowy”, czy „szum  $1/f$ ” wskazują tylko, że widmowa gęstość energii zmniejsza się z częstotliwością. Określenia te nie mają żadnego związku z pochodzeniem szumów.

## Szumy strukturalne

Angielska nazwa tych szumów to **popcorn noise** oraz **burst noise**.

Przyczyną powstawania tych szumów jest niedoskonałość procesu technologicznego. Niejednorodność półprzewodnika powoduje chwilowe przebicia i efektem są fluktuacje prądu obserwowane dla częstotliwości poniżej  $100Hz$ .

Poziom tych szumów można zdecydowanie obniżyć przez staranną obróbkę powierzchni, ogólną czystość procesu i zastosowanie specjalnych niskoszumnych technologii produkcji przyrządów półprzewodnikowych.

Pokrewnym rodzajem szumów są **szumy lawinowe** (avalanche noise). Występują one wtedy, gdy złącze p-n jest spolaryzowane zaporowo.

W elementach produkowanych przez dobre firmy poziom obu tych szumów został radykalnie obniżony dzięki wprowadzeniu zaawansowanych technologii.

## Podsumowanie

Omówiliśmy kilka mechanizmów powstawania szumów. Znajomość tych podstaw jest potrzebna każdemu szanującemu się elektronikowi, w praktyce jednak nie analizuje się wszystkich tych szumów oddzielnie. Do rzeczywistych obliczeń przyjmuje się uproszczone modele elementów, gdzie wszystkie występujące w danym elemencie źródła szumów są niejako zsumowane i przedstawione w postaci co najwyżej dwóch zastępczych źródeł szumów - napięciowego i prądowego. Dla pełnego obrazu podaje się ich widmowy rozkład gęstości w funkcji częstotliwości. Zagadnienia te omówione będą w następnej części Notatnika. Omówimy modele szumowe rezystorów, kondensatorów, cewek, różnych tranzystorów i układów scalonych. Następnie zajmiemy się dynamiką, współczynnikami szumów. Przedstawimy też sposoby optymalizacji szumowej układów oraz rozpatrzmy szereg przykładów.

**Piotr Górecki**