

Szumy własne urządzeń radiokomunikacyjnych

Czułość odbiornika radiowego, szczególnie radiokomunikacyjnego, jest ograniczona poziomem szumów, które często uniemożliwiają odbiór bardzo słabych sygnałów odległych stacji radiowych. Przyczyny powstawania szumów są różne i złożone. Rozpatrując problem szumów miesza się nieraz różne pojęcia, które przy niedokładnej znajomości zagadnienia obraz sprawy raczej zaciemniają. Definicje szumów są nieco inne dla sygnałów SSB i AM, a inne dla sygnałów FM. W artykule omówiono zagadnienie szumów występujących podczas odbioru emisji SSB i AM.

PRZYCZYNY SZUMÓW

Przedmiotem naszych rozważań jest tzw. „biały szum” słyszany z głośnika jako równomierne syczenie w czasie, kiedy nie słyszymy innych sygnałów. Szum ten powstaje w rezystorach, półprzewodnikach i lampach radiowych; ponadto przez antenę dochodzą do odbiornika szumy galaktyczne. Nie będziemy się zajmować zakłóceniami pochodzącymi od zapłonów silników samochodowych, wyładowań atmosferycznych z sieci elektroenergetycznych oraz od promieniowania układów odchylających urządzeń TV. Szumy cieplne powstają w wszelkiego rodzaju rezystorach, rezystancjach strat, doprowadzeń, w rezystancjach powierzchniowych obwodów rezonansowych, przewodach, falowodach,

antenach, lampach radiowych i półprzewodnikach. Elementy bierne „L” i „C” nie powodują szumów.

W siatce krystalicznej przewodnika atomy drgają nieregularnie wokół swego położenia spoczynkowego (ruchy cieplne Brown'a), przy czym intensywność drgań wzrasta wraz z temperaturą. Ruchy te udzielają się wolnym elektronom, w wyniku czego następuje ciągle przemieszczanie ładunków. Między końcami przewodnika występuje napięcie, którego wielkość i kierunek stale się zmienia. Wartość średnia napięcia jest tym większa, im wyższa jest temperatura przewodnika, większa rezystancja oraz większa szerokość pasma przenoszenia częstotliwości wzmacniacza znajdującego się przed miernikiem napięcia. Z napięcia szumów przewodnika oraz jego rezystancji wylicza się moc szumów cieplnych wg wzoru:

$$P_s = k \cdot T \cdot B \quad (W) \quad (1)$$

przy czym:

k — stała Boltzmann'a = $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Ws } [^{\circ}\text{K}]$

T — temperatura bezwzględna rezystancji [$^{\circ}\text{K}$]

B — szerokość pasma przenoszenia wzmacniacza [Hz]

Wynika z tego, że szumy cieplne wszelkiego rodzaju rezystancji czynnych można zmniejszyć przez ich ochłodzenie, a pasmo

przepustowe urządzenia wzmacniającego należy dobrać nie szersze niż potrzebne do transmisji sygnału użytecznego.

W wyniku przepływu prądu przez elementy czynne (tranzystory, diody, lampy elektronowe) powstają szumy, których wielkość jest zależna od częstotliwości pracy urządzenia, technologii produkcji podzespołów elektronicznych i charakteru układu. Wiemy, że niektóre tranzystory szumią mniej od innych, że układy przemiany częstotliwości bardziej szumią niż układy wzmacniające, a tranzystory stopni wejściowych wzmacniaczy m.cz. pracują nieraz przy bardzo małych prądach kolektora. Przepływający przez rezystor prąd powoduje poza znanym już szumem cieplnym, szum prądowy. Powstaje on wskutek niejednorodności materiałów. Rezystory o małych wymiarach szumią bardziej niż większe; rezystory metalizowane szumią mniej niż rezystory węglowe. Nieraz bardzo uciążliwe są szumy prądowe powodowane niestabilnością i niejednorodnością złącz wewnętrznych podzespołów.

Do anteny odbiornika dociera dużo różnych sygnałów radiowych pochodzenia ziemskiego, atmosferycznego oraz z przestrzeni kosmicznej. Ich wielkość jest bardzo zróżnicowana w różnych zakresach częstotliwości, różna w ośrodkach podmiejskich i wiejskich, zależna od warunków propagacyjnych. Na rys. 1 przedstawiono średnie wartości szumów w zakresie od 10 MHz do 10 GHz, rejestrowanych przy użyciu anteny o charakterystyce dookólnej. Krzywa (6) ilustruje liczby szumów odbiorników najwyższej klasy. W zakresie wielkich i największych częstotliwości szumy własne urządzenia odbiorczego coraz bardziej ograniczają jego czułość. W zakresach fal krótkich natomiast, ważniejszym problemem jest odporność na silne sygnały. Wystarcza tu liczba szumów rzędu 10 dB.

DEFINICJA CZUŁOŚCI ODBIORNIKA

Jeżeli do wejścia czwórnika (wzmacniacza, układu przemiany częstotliwości lub tylko tłumika) doprowadzi się sygnał użyteczny $P_n(in)$ oraz sygnał szumów $P_r(in)$, zaś na wyjściu czwórnika występuje $P_n(out)$ oraz $P_r(out)$, wówczas współczynnik szumów F określa się ze wzoru:

$$F = \frac{P_n(in)/P_r(in)}{P_n(out)/P_r(out)} \quad (2)$$

jeżeli $\frac{P_n}{P_r} = \frac{S}{N}$

w którym: S -- sygnał, N -- szum

wówczas
$$F = \frac{S/N(in)}{S/N(out)} \quad (2a)$$

Współczynnik F wskazuje więc o jaką wielkość pogorszył się stosunek sygnału do szumu $\left(\frac{S}{N}\right)$ po przejściu np. przez odbiornik, ogólnie przez czwórnik.

Współczynnik F jest z reguły większy od 1.

Dla idealnego odbiornika, którego nie da się jednak skonstruować, współczynnik F wynosiłby 1.

Ponieważ każdy odbiornik wnosi szumy własne, okreśmy je współczynnikiem szumów dodatkowych:

$$F = 1 + F_d, \text{ czyli } F_d = F - 1 \quad (3)$$

logarytmując: $10 \lg F = F(dB)$

$F(dB)$ określa się jako liczbę szumów wyrażoną w dB, mającą to samo fizyczne znaczenie co współczynnik szumów F .

Wykres przedstawiony na rys. 2 ułatwia zmianę współczynnika szumów F na liczbę szumów $F(dB)$. (W literaturze angielskiej stosuje się termin NF — noise figure).

Wstawiając w równaniu (1), w miejsce T , temperaturę pokojową

$$T_0 = 273 + 17 = 290^\circ K$$

otrzymujemy:

$$k \cdot T_0 = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Ws} / ^\circ K \cdot 290^\circ K = 4 \cdot 10^{-21} \text{ Ws} = 4 \cdot 10^{-21} \text{ [W/Hz]}$$

Jest to moc szumów cieplnych rezystora R , przy pasmie przepustowym $B = 1 \text{ Hz}$, czyli:

$$P_r = k \cdot T_0 \cdot 1 = 4 \cdot 10^{-21} \text{ [W/Hz]}$$

W literaturze angielskiej termin $k T_0$ powoli zanika na rzecz liczby szumów lub temperatury szumu.

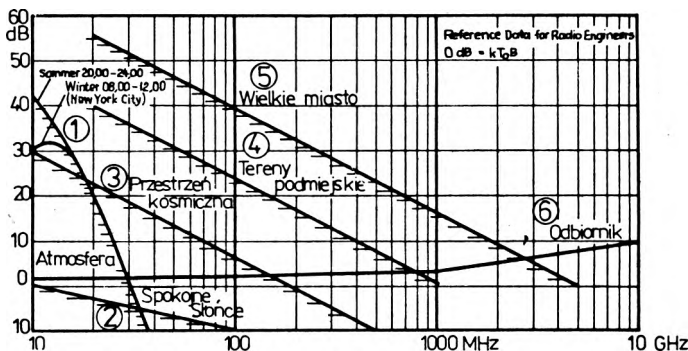
Nie należy więc oznaczać $F = 4 \cdot k \cdot T_0$, tylko $F = 4$ lub $F = 6 \text{ dB}$. Jak wynika z wcześniejszych wywodów, czułością graniczną określa się najmniejszy użyteczny sygnał na wejściu odbiornika, który razem z sygnałem szumów P_r odbiornika daje na wyjściu współczynnik szumów = 1.

Jeżeli „bezszumny” odbiornik o szerokości pasma przepustowego $B_{(Hz)}$ połączy się ze źródłem szumów o temperaturze $T_{(K)}$, wówczas otrzymuje on sygnał o poziomie mocy szumów:

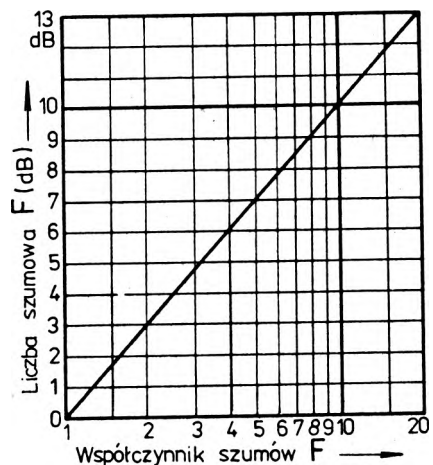
$$P_r = k \cdot T \cdot B \text{ [W]}$$

W warunkach dopasowania, kiedy rezystancja wewnętrzna źródła szumów (R_i) równa się rezystancji wejściowej odbiornika (R_{in}), czyli $R_i = R_{in} = R$, można z dyspozycyjnej mocy szumów P_r wyliczyć skuteczną wartość napięcia szumów U_r , wyrażoną w μV :

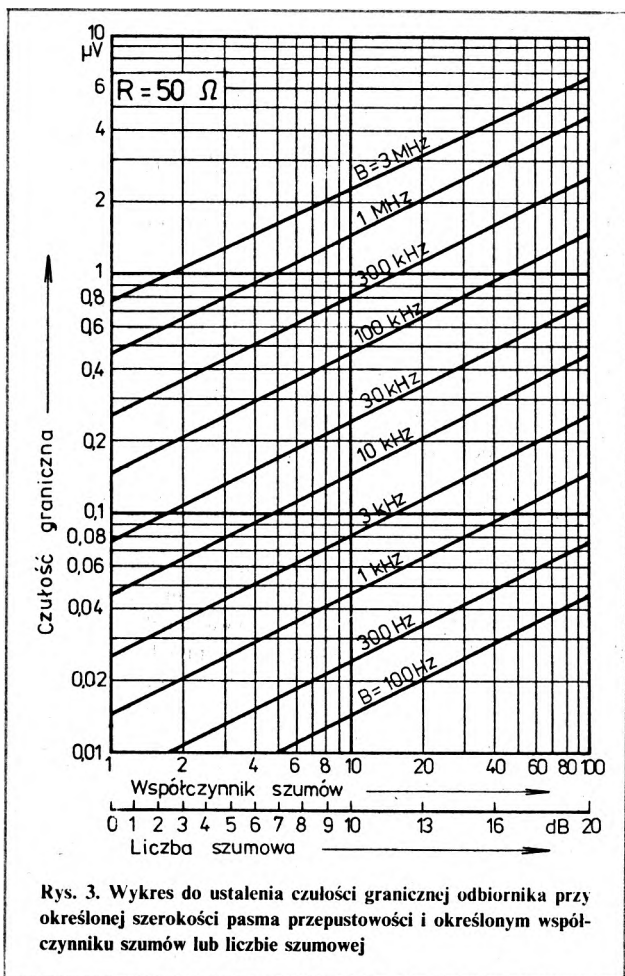
$$\frac{U_r^2}{R} = k \cdot T \cdot B, \text{ czyli } U_r = \sqrt{R \cdot k \cdot T \cdot B} \text{ [\mu V]} \quad (5)$$



Rys. 1. Poziomy szumów w zakresie 10 MHz do 10 GHz w różnych ośrodkach (antena o charakterystyce dookólnej)



Rys. 2. Zamiana współczynnika szumów na liczbę szumową



Przykład A

Rezystancja wejściowa odbiornika wynosi 50Ω , pasmo przenoszenia $B = 3 \text{ kHz}$, temperatura otoczenia $T_0 = 290^\circ \text{K}$. Jeżeli odbiornik nie wnosi szumów własnych (odbiornik idealny) jego $F = 1$ lub $F = 0 \text{ dB}$

$$U_r = \sqrt{50 \Omega \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Ws/K} \cdot 290 \text{ K} \cdot 3 \cdot 10^3 \text{ Hz}} = 0,025 \mu\text{V}$$

Odbiornik nieidealny wnosi szумы własne. Do obliczenia czułości granicznej takiego odbiornika należy pod pierwiastek wprowadzić współczynnik szumów F (nie liczbę szumową):

$$U_{r(\text{gran})} = \sqrt{F \cdot R \cdot k \cdot T \cdot B} \quad (5a)$$

w wypadku, gdy $F = 6 \text{ dB}$ lub $F = 4$

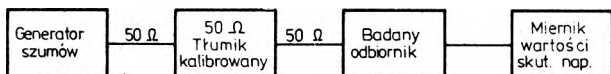
$$U_{r(\text{gran})} = 0,025 \mu\text{V} \cdot 2 = 0,05 \mu\text{V}$$

Wykres przedstawiony na rys. 3 umożliwia odczytanie wartości granicznych czułości w μV przy różnych szerokościach pasma przepustowego odbiornika oraz przy różnych współczynnikach szumów lub liczbach szumów.

POMIAR CZUŁOŚCI GRANICZNEJ ODBIORNIKA

Przykład B

Schemat blokowy układu pomiarowego przedstawiono na rys. 4. Na obciążeniu o rezystancji 50Ω , kalibrowany generator szumów



Rys. 4. Schemat blokowy aparatury do pomiaru czułości granicznej odbiornika

ów dostarcza sygnał o poziomie $20 \text{ dB} = -120 \text{ dBm}$ lub $0,25 \mu\text{V}$. Jest to poziom napięciowo 10-krotnie większy, zaś 100-krotnie większy od poziomu mocy szumów własnych rezystancji 50Ω . omówionej w przykładzie A. Generator szumów łączy się krótkim odcinkiem kabla współosiowego z kalibrowanym tłumikiem, zaś tłumik takim samym odcinkiem kabla z wejściem antenowym badanego odbiornika. Zakłada się, że rezystancja wejściowa odbiornika wynosi również 50Ω .

Do wyjścia wzmacniacza p.c.z. badanego odbiornika włącza się miliwoltomierz (miernik wartości skutecznej).

Tłumikiem włącza się około 30 dB tłumienia, co jest równoznaczne z wyłączeniem generatora szumów. Ma to na celu utrzymanie równowagi dopasowania między generatorem, tłumikiem i badanym odbiornikiem.

Zakładamy, że badany odbiornik jest idealny, a więc nie wnosi szumów własnych, zaś rzeczywiste szумы własne koncentrują się w jego rezystancji wejściowej jako sygnał szumów P_r .

Za pomocą przełącznika zakresów ustawia się wskazanie miliwoltomierza tak, aby można było odczytać poziom szumów własnych odbiornika — umownie poziom szumów rezystancji wejściowej odbiornika, np. 5 mV .

Zmniejszając tłumienie kalibrowanego tłumika, doprowadza się do rezystancji wejściowej odbiornika z generatora szumów moc równą P_r , czyli mocy szumów własnych odbiornika.

Na rezystancji wejściowej odbiornika występuje teraz moc $2P_r$, czyli:

$$U_r = \frac{2P_r}{\sqrt{2}}$$

Miliwoltomierz wskaże poziom szumów $7,1 \text{ mV} = 5 \text{ mV} \cdot \sqrt{2}$. Jeżeli czynność ta wymagała nastawienia tłumika, np. 11 dB , oznacza to, że szумы własne odbiornika wynoszą:

$$F = 20 - 11 = 9 \text{ dB} \text{ lub } F = 8$$

Generator szumów dostarcza sygnał o jednakowej amplitudzie w bardzo szerokim zakresie częstotliwości. Pomiar czułości granicznej odbiornika za pomocą generatora szumów jest czynnością bardzo łatwą, gdyż dokonuje się równoważenia dwóch źródeł szumów. Zastąpienie generatora szumów generatorem sygnałowym obarczy pomiar dosyć znacznym błędem.

Znajomość czułości granicznej odbiornika nie wystarczy jeszcze do oceny możliwości odbioru sygnałów radiowych na granicy ich zrozumiałości.

W tabeli podano o ile większy musi być sygnał użyteczny w stosunku do sygnału szumów, aby odbiór poprawił się od dolnej granicy zrozumiałości do praktycznie bezszumnego odbioru emisji.

Zasadniczo interesuje nas stosunek S/N , ale w rzeczywistości mierzymy $\frac{S+N}{N}$. Ich wzajemna relacja wynosi:

$$\frac{S}{N} = \frac{S+N}{N} - 1$$

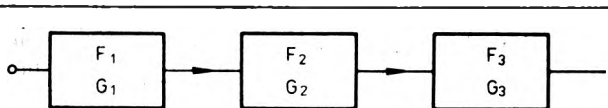
Dla stosunku $S/N \geq 10 \text{ dB}$ uznawanego za dostateczny wyniki obliczenia wg obydwu wzorów stają się zbieżne.

Wpływ stosunku S/N na zrozumiałość odbieranych sygnałów

Stosunek Sygnał/Szum			
Moc	Napięcie	Margines szumów [dB]	Określenie czułości
1	1	0	Czułość graniczna
4	2	6	Ślady sygnału
10	3,16	10	Dolna granica zrozumiałości
100	10	20	Dobra zrozumiałość
400	20	26	Bardzo dobra zrozumiałość
			Ślady szumów

Odbiornik składa się z szeregu podzespołów, z których każdy więcej lub mniej szumi. Wzmacniacz p.cz. oraz układ przemiany częstotliwości szumi więcej, wzmacniacz wejściowy szumi mniej, najmniej szumią specjalnie konstruowane wzmacniacze wejściowe lub antenowe. Kabel antenowy łączący antenę z wejściem odbiornika wnosi tłumienie, które szczególnie przy większych częstotliwościach znacząco pogarsza liczbę szumów układu odbiorczego.

Na rys. 5 przedstawiono szeregowe połączenie podzespołów układu odbiorczego.



Rys. 5. Schemat szeregowego połączenia podzespołów układu odbiorczego

Obowiązują w tym wypadku poniższe wzory:

$$F_{(cat)} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_2 \cdot G_1} + \frac{F_4 - 1}{G_3 \cdot G_2 \cdot G_1} + \dots \quad (7)$$

lub

$$F_{(cat)} = F_1 + \frac{F_{d2}}{G_1} + \frac{F_{d3}}{G_2 \cdot G_1} + \dots \quad (7a)$$

w których:

F — współczynnik szumów wszystkich podzespołów

F_d — współczynnik szumów własnych zespołu

G — wielokrotność wzmacniania lub tłumienia mocy

U w a g a ! Nie należy tu stosować F_{dB} oraz G_{dB}.

Przykład C

Wzmacniacz w.cz. F₁ = 3 dB (2), G₁ = 10 dB (10 ×)

Mieszacz F₂ = 10 dB (10) G₂ = 6 dB (4 ×)

Wzmacniacz pośr. cz. F₃ = 8 dB (6,3) G₃ = 60 dB (10⁶ ×)

Dalsze podzespoły odbiornika nie wpływają już na poziom szumów.

$$F_{(cat)} = 2 + \frac{10 - 1}{10} + \frac{6,3 - 1}{4 \cdot 10} + \frac{F_4 - 1}{10^6 \cdot 4 \cdot 10} = \\ = 2 + 0,9 + 0,133 = 3,03 \text{ lub } 4,8 \text{ dB}$$

Czwarte ogniwo równania jest już mało znaczące więc zostaje pominięte w obliczeniach.

Przykład D

Kabel antenowy F₁ = 2 G₁ = 0,5 ×

Wzmacniacz w.cz. F₂ = 2 G₂ = 10 ×

Mieszacz F₃ = 10 G₃ = 4 ×

Wzmacniacz pośr.cz. F₄ = 6,3 G₄ = 10⁶ ×

$$F_{(cat)} = 2 + \frac{2 - 1}{0,5} + \frac{10 - 1}{10 \cdot 0,5} + \frac{6,3 - 1}{4 \cdot 10 \cdot 0,5} = \\ = 2 + 2 + 1,8 + 0,27 = 6,7 \text{ lub } 7,8 \text{ dB}$$

Przykład E

(Diodowy układ przemiany na wejściu odbiornika)

Mieszacz pierścieniowy F₁ = 4 G₁ = 0,2 ×

Wzmacniacz p.cz. F₂ = 6,3 G₂ = 10⁶ ×

$$F_{(cat)} = 4 + \frac{6,3 - 1}{0,2} = 4 + 26,5 = 30,5 \text{ lub } 14,8 \text{ dB!}$$

Z przytoczonych przykładów wynikają następujące wnioski:

1. Liczba szumów szeregowego układu odbiornika jest zawsze większa od liczby szumów pierwszego jej ogniwa.

2. W wypadku, gdy pierwsze ogniwo układu odbiorczego tłumie, liczba szumów kolejnego ogniwa bardziej znacząco wpływa na F_(cat).

3. Wzmacniacz wejściowy o dobrych parametrach szumowych, włączony za kablem antenowym do wejścia odbiornika, nieznacznie tylko poprawia F_(cat). Ten sam wzmacniacz włączony między sygnał użyteczny do odbiornika, znacznie poprawia czułość układu odbiorczego. Oddzielny problem stanowi w tym wypadku sprawa odporności wzmacniacza na zewnętrzne wpływy atmosferyczne, jego stabilność pracy oraz sposób przełączania: odbiór nadawanie.

4. Z przykładu E wynika, że układ mieszacza pierścieniowego na wejściu odbiornika, który wnosi 6÷7 dB tłumienia sygnału użytecznego, bardzo niekorzystnie wpływa na F_(cat) układu odbiorczego (14,8 dB!). Wzmacniacz w.cz. przed mieszaczem pierścieniowym poprawi w znacznym stopniu sytuację, ale kosztem odporności odbiornika na duże sygnały wejściowe. Pewną poprawę tego stanu można uzyskać stosując pierwszy stopień wzmacniacza p.cz. o możliwie małych szumach, jak to wynika z kolejnego przykładu.

Przykład F

Mieszacz pierścieniowy F₁ = 4 G₁ = 0,2 ×

Wzmacniacz p.cz. F₂ = 2 G₂ = 10⁶ ×

$$F_{(cat)} = 4 + \frac{2 - 1}{0,2} = 4 + 5 = 9 \text{ lub } 9,5 \text{ dB}$$

Skonstruowanie jednak wzmacniacza p.cz. o takich parametrach jest bardzo trudne.

* * *

W rozważaniach naszych poczyniliśmy pewne uproszczenie. Jak wiadomo, układ przemiany częstotliwości wnosi szumy, ale oscylator przemiany też szumi, a jego szumy są przenoszone do wzmacniacza p.cz. zwiększając F_(cat) odbiornika.

Problem SBN (side band noise) będzie omówiony w jednym z dalszych artykułów.

LITERATURA

- [1] Lentz R. DL3WR: Rauschen in Empfangsanlagen. UKW Berichte 3/1975
- [2] Smith W.: On Decibels and Noise QST 52 1/1968
- [3] Moltrecht E. DJ4UF: Die Empfindlichkeit eines Empfängers cq-DL 1/1976
- [4] Waxweiler R. DJ7VD: Rauschgenerator mit definierter Rauschleistung cq-DL 12/1981
- [5] Kaniut G.P. SP9RG: Intermodulacja. „Radioelektronik” nr 11/1986