Szumy, część 7

Tym odcinkiem kończymy temat szumów. Na kilku przykładach pokazujemy wielką przydatność wiedzy teoretycznej o szumach w formułowaniu bardzo ważnych i wręcz olśniewających wniosków praktycznych.

Pomocą w dalszym omawianiu tranzystorów bipolarnych będzie **rysunek 18**. Jest to wykres podobny do rysunku 17d, z tym że na osi poziomej mamy rezystancję źródła sygnału, a na pionowej gęstość napięcia szumów. Pamiętamy, że w naszej całkowitej gęstości napięcia szumów e_{ntot} zawarty jest szum termiczny. Dla szumu termicznego już wcześniej na rysunku 4 przyporządkowaliśmy każdej rezystancji gęstość napięcia szumów. Czy nie możemy na takim rysunku zaznaczyć jakoś charakterystyki szumowej wzmacniacza? Okazuje się, że można; będzie to bardzo jasne i łatwe w interpretacji przedstawienie właściwości szumowych danego wzmacniacza.

W niektórych katalogach można znaleźć takie właśnie charakterystyki wzmacniaczy.

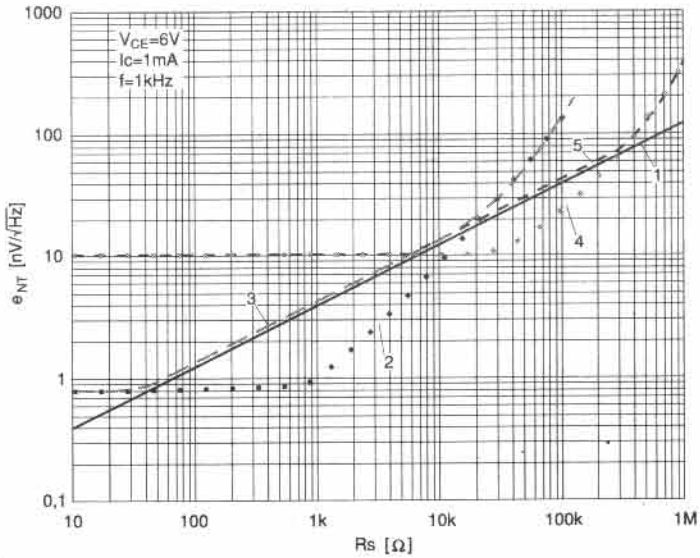
Wcześniej obiecaliśmy udowodnić bulwersujące twierdzenie, że w wielu przypadkach nie ma sensu dążyć za wszelką cenę do zbudowania wzmacniacza o jak najmniejszych szumach własnych. Teraz przyszła na to pora.

Żeby to unaocznić, przeanalizujmy rysunek 18.

Linią ciągłą 1 zaznaczono gęstość napięcia szumów termicznych rezystancji źródła sygnału. Jest to wykres taki jak na rysunku 4. Zaznaczono też charakterystyki dwóch różnych wzmacniaczy. Krzywa 2 (linia kropkowana) przedstawia charakterystykę pierwszego wzmacniacza, który ma niską wartość gęstości napięcia szumów e_n = 1,8nV/√Hz, ma natomiast dość dużą, typową dla układów z tranzystorami bipolarnymi gęstość prądu szumów i_n. Linia ta reprezentuje tylko dwa składniki wzoru (19) - szumy samego wzmacniacza. Krzywa 3 jest wypadkową charakterystyką tego wzmacniacza, uwzględnia także szum termiczny źródła sygnału - przedstawia więc całkowitą gęstość napięcia szumów wejściowych tego wzmacniacza - e_{ntot}.

Analogiczne charakterystyki drugiego wzmacniacza, mającego zdecydowanie większą gęstość napięcia szumów e_n = (10nV/√Hz), a za to zdecydowanie mniejszą prądu szumów, oznaczono liczbami 4 i 5.

Możemy powiedzieć, iż dla zakresów rezystancji źródła sygnału, dla których na rysunku 18 linie kropkowane 2 i 4 przebiegają poniżej linii 1, sam wzmacniacz szumi mniej niż źródło sygnału!



Rys. 18.

Zajmijmy się bliżej krzywą 3.

Przy współpracy ze źródłem o rezystancji do ok. 50Ω dominuje szum pochodzący z zastępczego, napięciowego źródła szumów (patrz rys. 8). Dla rezystancji źródła od 50Ω do 10kΩ dominuje szum pochodzący z rezystancji źródła sygnału. Choć szumy samego wzmacniacza są w tym zakresie bardzo małe, niestety nie możemy wykorzystać tego w praktyce i wypadkowa charakterystyka będzie przebiegać wzdłuż prostej 1. Dla rezystancji źródła powyżej 10kΩ dominują szumy wynikające z przepływu prądu szumów przez rezystancję źródła sygnału.

Projektując wzmacniacz koniecznie musimy brać pod uwagę szumy termiczne wnoszone przez rezystancję źródła sygnału.

Podobnie jest dla drugiego wzmacniacza (krzywa 5).

Bardzo dobre właściwości pierwszego wzmacniacza mogą więc zostać wykorzystane tylko przy współpracy ze źródłem o Rs ≤ 50Ω! Przy rezystancji źródła Rs wynoszącej 50...10000Ω bez wahania można zastosować tańszy wzmacniacz o nieco większym napięciu szumów własnych! Zupełnym błędem byłoby stosowanie pierwszego wzmacniacza przy rezystancji źródła powyżej 10kΩ. W takiej sytuacji korzystniejsze będzie użycie drugiego, wydawałoby się - znacznie gorszego wzmacniacza.

I tu doszliśmy do sedna sprawy: przy większych rezystancjach nie ma potrzeby stosowania wzmacniaczy o małej gęstości napięcia szumów. Całkowicie wystarczą dużo tańsze wzmacniacze mające bardzo mały prąd szumów. Jak się dalej okaże, są to wzmacniacze z tranzystorami J-FET na wejściu.

Czy rysunek 18 mówi nam coś o współczynniku szumów? Oczywiście! Dla danej rezystancji źródła odległość w pionie krzywej 3 (lub krzywej 5) od prostej 1 jest miarą współczynnika szumów.

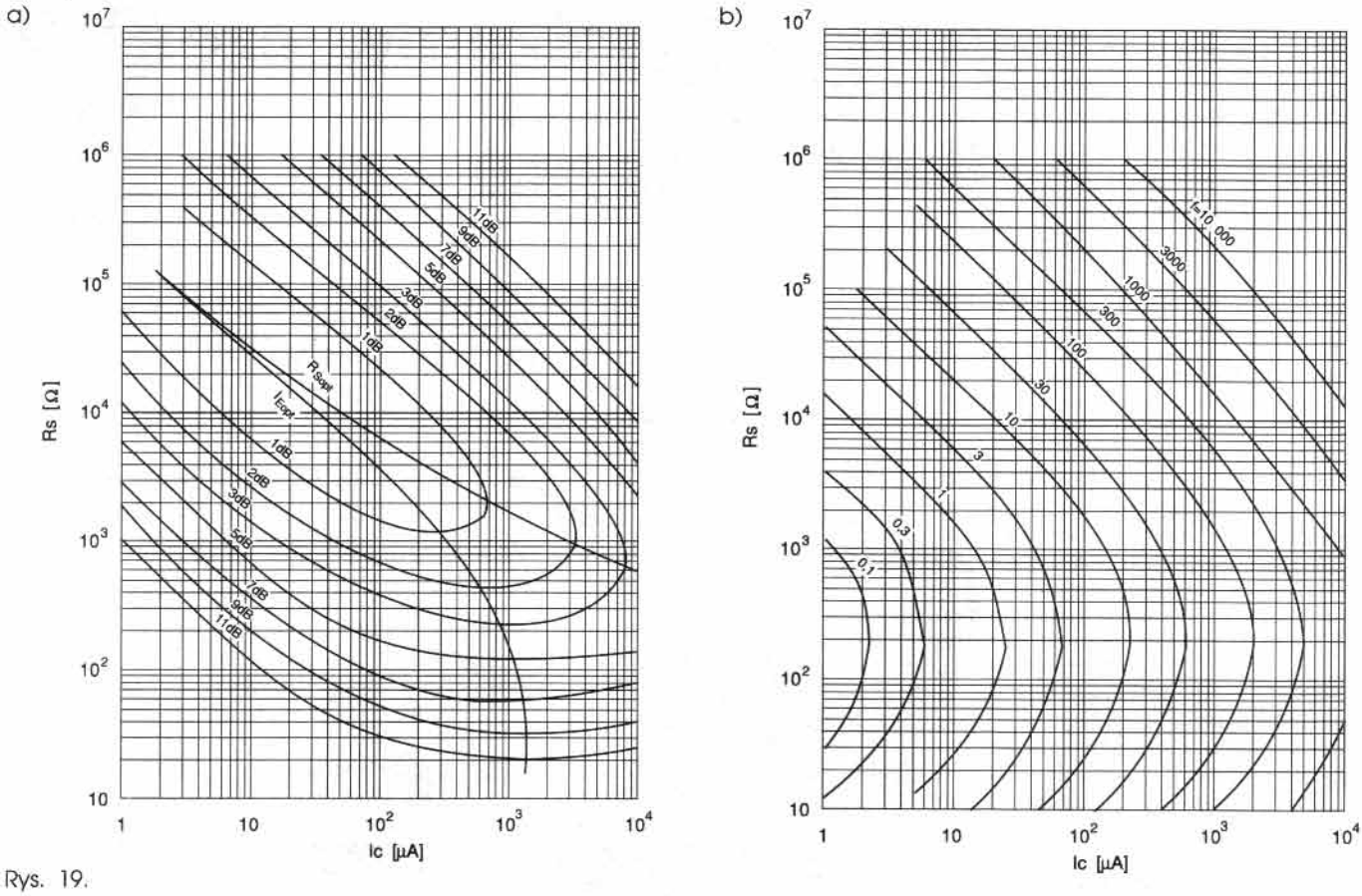
Przy rozpatrywaniu tego zagadnienia posługiwaliśmy się gęstością napięcia szumów w nanowoltach na pierwiastek z herca. Ponieważ współczesne niskoszumne wzmacniacze mają częstotliwość „kolana" charakterystyki fcu i fci w okolicach lub nawet poniżej dolnej granicy pasma akustycznego, więc praktycznie mamy do czynienia z szumem białym. Możemy więc prosto przeliczyć gęstość napięcia na napięcie szumów wejściowych w określonym pasmie - wzór (6):

$$U_{ntot} = e_{ntot} \cdot \sqrt{B}$$

Notujemy więc praktyczną zasadę: przy projektowaniu wzmacniacza koniecznie musimy brać pod uwagę szumy termiczne wnoszone przez rezystancję źródła; jest to nieprzekraczalna bariera. W zależności od rezystancji źródła istnieje pewna ekonomicznie uzasadniona granica, której nie warto przekraczać.

Dodaliśmy oto nową porcję wiedzy. Warto poświęcić trochę czasu, żeby dobrze zrozumieć i „poukładać" sobie w głowie cały ten bałagan, bo naprawdę przyda się to w praktyce.

Przy okazji omawiania tranzystorów podajmy teraz kolejne ważne informacje praktyczne.



Rys. 19.

Pierwszej informacji nie będziemy uzasadniać teoretycznie, wystarczy wniosek końcowy: szum całkowity wzmacniacza wielostopniowego zależy tylko od pierwszego stopnia. Następne stopnie mogą być dużo gorsze.

Możemy, na przykład, dodać do wzmacniacza operacyjnego o przeciętnych parametrach różnicowy stopień wejściowy z superniskoszumnymi tranzystorami. O szumie całkowitym zadecydują wyłącznie parametry tych wejściowych tranzystorów.

Równoległe łączenie elementów wzmacniających pozwoli zmniejszyć szumy. Dotyczy to zarówno lamp elektronowych, jak też tranzystorów bipolarnych i polowych. Ponieważ prądy kolektorów (drenów, anodowe) sumują się na rezystancji obciążenia, więc całkowite wzmocnienie takiego układu jest równe sumie wzmocnień poszczególnych tranzystorów (a nie iloczynowi jak przy połączeniu kaskadowym). Napięcia szumów, jak pamiętamy z pierwszego odcinka, dodają się kwadraturowo, więc przy połączeniu równoległym dwóch elementów wzmocnienie będzie dwukrotnie większe, zaś szumy nie wzrosną 2, tylko $\sqrt{2}$, czyli ok. 1,41 razy - zysk wynosi 1,41 czyli 3dB. Przy połączeniu trzech elementów wzmocnienie wzrośnie trzykrotnie, a szumy 1,73-krotnie, zysk wyniesie ok 4,8dB. Łączenia większej liczby elementów w praktyce prawie się nie stosuje, może tylko do ultraniskoszumnych układów.

Szum całkowity wzmacniacza wielostopniowego zależy tylko od pierwszego stopnia.

Wracamy teraz do omawiania tranzystorów.

Spotyka się jeszcze inne charakterystyki, wzory i sposoby obliczeń. Nie sposób wszystko to omówić w ramach naszego cyklu, podstawowe zasady są takie same, zainteresowanych odsyłamy więc do katalogów. My podamy jeszcze dwa przykłady.

Dla niektórych tranzystorów znajdziemy wykresy gęstości napięcia i prądu szumów analogiczne jak na rysunkach 16a, b i 17a, c, a oprócz tego dwa inne wykresy, takie jak na **rysunku 19a i b**. Służą one do określenia współczynnika szumów tranzystora dla dowolnej częstotliwości w zakresie poniżej 15kHz (rysunki 14a, 15a,b dotyczą tylko jednej częstotliwości). Wiemy, że przy mniejszych częstotliwościach szumy rosną z uwagi na szumy migotania (flicker noise). Mamy tu dodanie białego szumu termicznego i śrutowego oraz różowego szumu migotania. Rysunek 19a pozwala odczytać „białą" składową wprost jako współczynnik szumu NF w decybelach. Rysunek 19b pozwala obliczyć składową „różową"; liczby przy krzywych są iloczynem liczby szumów F (nie współczynnika szumów NF) i częstotliwości f.

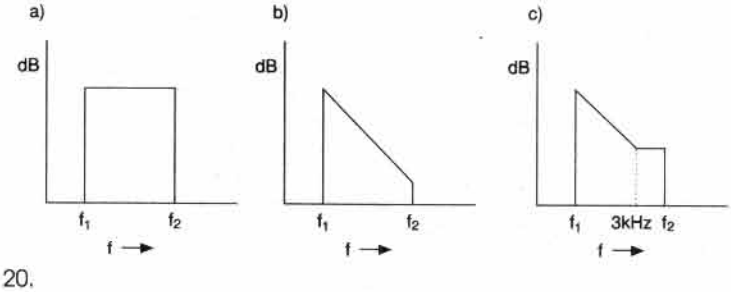
Obliczenia są proste. Znamy rezystancję źródła Rs, wybraliśmy jakiś prąd pracy Ic, interesuje nas współczynnik szumów NF dla pewnej częstotliwości f.

Na początek z wykresu 19a dla znanych Rs i Ic odczytujemy wartość „białego" współczynnika NF. Następnie po przekształceniu wzoru (24)

$$NF = 10 \log F \qquad (24)$$

obliczamy „białą" składową Fb.

Teraz z rys 19b analogicznie określamy



Rys. 20.

wartość wyrażenia F x f dla składowej różowej. Odczytaną wartość dzielimy przez interesującą nas częstotliwość f, otrzymujemy „różową" składową Fr.

Dodajemy obie składowe:

F = Fb + Fr

Na koniec obliczamy NF dla częstotliwości f:

NF = 10 log F

Drugi przykład pochodzi z noty aplikacyjnej firmy Toshiba.

Znajdujemy tu między innymi interesujący wzór:

$$\frac{S}{Nwy} = \frac{S}{Nwe} - NF[dB] \qquad (29)$$

Stosunek sygnał/szum na wyjściu jest więc mniejszy o wartość współczynnika szumów od stosunku sygnał/szum na wejściu. A S/Nwe to nic innego jak stosunek wartości sygnału użytecznego do wartości szumu termicznego powstającego na rezystancji źródła:

$$\frac{S}{Nwe}[dB] = 10\log\left(\frac{Es^2}{4kTRsB}\right) \qquad (30)$$

gdzie Es to napięcie skuteczne źródła sygnału.

Podaje się tu ponadto proste sposoby obliczania wartości całkowitego współczynnika szumów, i co ważniejsze, stosunku sygnał/szum wzmacniaczy o różnych charakterystykach częstotliwościowych pasma przenoszenia w zakresie częstotliwości f1 do f2. Potrzebne są do tego dwa wykresy współczynnika szumów NF, takie jak na rys 14a lub 16c dla częstotliwości 1kHz i 10Hz.

Rysunek 20 przedstawia kolejno uproszczone przebiegi charakterystyk amplitudowych wzmacniaczy:

a) płaska

b) charakterystyka RIAA (gramofony)

c) charakterystyka NAB (magnetofony)

Odczytawszy z wykresów wartości NF(1kHz) i NF(10Hz) dla konkretnych warunków pracy tranzystora możemy obliczyć całkowity współczynnik szumów podanych wzmacniaczy:

a) $$NF_{tot} = NF_{(1kHz)} + \frac{10(NF_{(10Hz)} - NF_{(1kHz)})\ln\frac{f_2}{f_1}}{f_2 - f_1}$$

b) $$NF_{tot} = NF_{(1kHz)} + \frac{5(NF_{(10Hz)} - NF_{(1kHz)})}{f_1}$$

c) $$NF_{tot} = NF_{(1kHz)} + \frac{5(NF_{(10Hz)} - NF_{(1kHz)})}{f_1} + \frac{f_1}{(3kHz)^2}(f_2 - 3kHz)\cdot NF_{(1kHz)}$$

Znając wielkość sygnału wejściowego i Rs możemy obliczyć najpierw ze wzoru (30) S/Nwe, a następnie wg (29) S/Nwy.

Należałoby jeszcze wspomnieć o tranzystorach w.cz. Dotychczasowe rozważania dotyczyły pasma akustycznego, nie wspominaliśmy więc, że przy wysokich częstotliwościach, rzędu megaherców pojawiają się nowe źródła szumów. Tranzystory w.cz. są optymalizowane pod kątem szumów przy wysokich częstotliwościach. Błędem byłoby więc stosowanie tranzystorów BC w niskoszumnych układach w.cz, pomimo że wiele takich tranzystorów ma wysoką częstotliwość graniczną f_T. Analogicznie, nawet dobre tranzystory w.cz. nie powinny być stosowane w układach niskoszumnych m.cz.. Dwie przykładowe charakterystyki są pokazane na **rysunku 21a i b**. Warto zwrócić uwagę, iż wg rys. 21b szumy wzrastają dla częstotliwości poniżej 100kHz, a nie jak poprzednio w okolicach 100Hz!

Tyle o tranzystorach bipolarnych.

Tranzystory FET

Tranzystory złączowe J-FET

Z tranzystorami J-FET uporamy się znacznie szybciej.

Okazuje się, że podstawowym źródłem szumu jest tu rezystancja kanału i zjawiska zachodzące w kanale. Jest to źródło szumu o charakterze napięciowym.

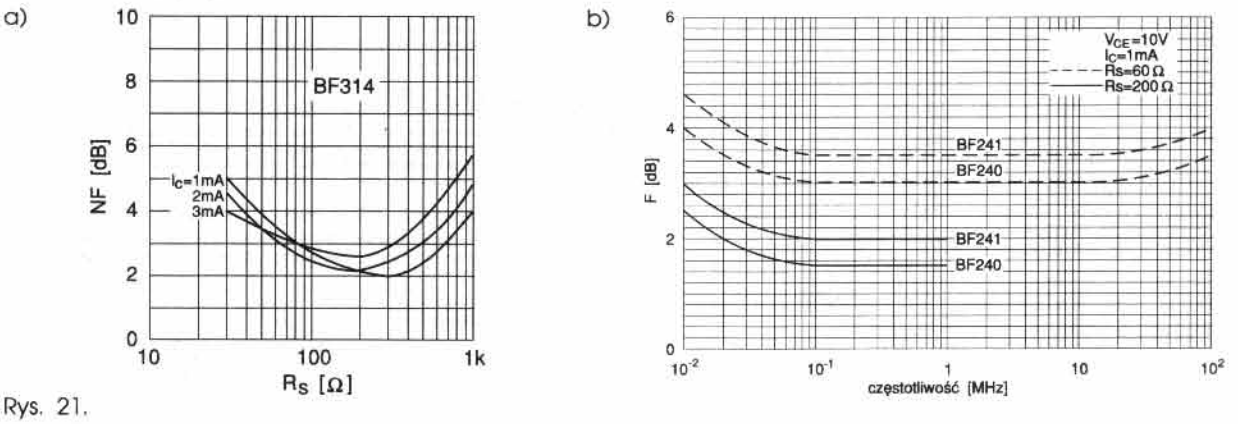
W zasadzie powinniśmy i tu mówić o składowej „różowej" i „białej". Częstotliwość „kolana" jest zwykle rzędu 100Hz i bardzo często składową „różową" pochodzącą z szumów migotania pomija się. Po takim przybliżeniu wylicza się od razu napięcie szumów w danym pasmie B z prostego wzoru:

Tab. 1. Podstawowe dane niskoszumnych wzmacniaczy dla 1kHz (w nawiasach podano wartości dla 10Hz)

Typ wzmacniacza	Rodzaj tranzystorów	Gęstość napięcia szumów [nV / √ Hz]	Gęstość prądu szumów [fA / √ Hz]
AD645	jfet	9(20)	0,6
AD743	bifet	3,2(5,5)	6,9
AD745	bifet	3,2(5,5)	6,9
AD797	bip.	0,9(1,7)	2000
AD829	bip.	1,7	1500
AD840	bip.	4	
AD842	bip.	9	
AD844	bip.	2	10000
AD846	bip.	2	20000
LF355	jfet	20	10*
LF356/357	jfet	12	10
LT1007/1037	bip.	2,5(2,8)	
LT1028/1115	bip.	0,9(1)	
LM301(=ULY7701)		17	300
LM324/358	bip.	40	
NE4558	bip.	25	
NE5532/A	bip.	5(11)	700(4000)
NE5533/5534	bip.	4(10)	600(3500)
NE5533A/5534A	bip.	3,5(8)	400(2500)
OP-27	bip.	3,2(3,8)	400(1700)
OP-37	bip.	3,2(3,8)	400(1700)
OP-113/-213/-413	bip.	6	
OP-176	bip./jfet	5	1100
OP- 227	bip.	3(3,5)	400(1700)
OP-249	jfet	17(75)	3
OP-270	bip.	3,2(3,6)	600(1100)
OP-275/-285	bip./jfet	6(11)	1500(3000)
OP-467	bip.	6	
OP-470	bip.	3,2(3,8)	400(1700)
SSM-2134	bip.	3,5	600(4500)
SSM-3139	bip.	3,2	2000
TL061/2/4	jfet	42(86)	
TL071/2/4	jfet	18(45)	10
TL081/2/4	jfet	25(60)	
µA741	bip.	40	250
Inne wzmacniacze			
NE542(=UL1322)		7,5(12)	300(700)
SSM-2015		1,3	
SSM-2016		0,8	
SSM-2017		0,95(2,5)	600(1100)
Niskoszumne tranzystory (podwójne) Ic=1mA			
SSM-2210		1	
SSM-2220		0,7(0,8)	
MAT-02		0,85(0,9)	2600(3200)
MAT-03		0,7(0,7)	

$$En = \sqrt{4kTB \cdot \frac{0,67}{g_m}} \qquad (31)$$

Składnik 0,67/gm reprezentuje tu szumiącą rezystancję (porównaj wzór (12)), przy czym g_m jest konduktancją przejściową,



Rys. 21.

istotnym parametrem każdego tranzystora FET wyrażanym w mA/V czyli milisimensach. Mniej szumią więc tranzystory mające dużą konduktancję przejściową, a dla konkretnego tranzystora szum jest mniejszy przy napięciu bramki zbliżonym do zera, a to z uwagi na nieliniowy charakter charakterystyki przejściowej.

Należałoby też nadmienić o prądowym źródle szumów. Szumy prądowe wynikają z przepływu prądu przez wstecznie spolaryzowane złącze bramka-źródło. Powstający szum śrutowy ma jednak zgodnie z poznanym wzorem

$$Ish = \sqrt{2q \cdot I \cdot B}$$

znikomą wartość z uwagi na mały prąd (nanoampery). Stąd nawet przy dużych rezystancjach źródła (do 1MΩ) składowa prądowa szumów jest niewielka, a w większości katalogów bywa całkowicie pomijana.

Przeciętnie rzecz biorąc tranzystory J-FET i wzmacniacze z takimi tranzystorami na wejściu mają składową napięciową szumów większą niż tranzystory bipolarne. Można uznać, że krzywe 4 i 5 na rysunku 18 dotyczą właśnie takiego wzmacniacza, natomiast krzywe 2 i 3 tranzystorów bipolarnych.

Dotyczy to elementów typowych, popularnych, istnieją bowiem specjalne typy tranzystorów J-FET mające małą gęstość szumów napięciowych, porównywalną z najlepszymi tranzystorami bipolarnymi. Tranzystory takie znakomicie nadają się do pracy przy rezystancji źródła zmienianej w szerokim zakresie.

Tranzystory MOS-FET

W tranzystorach tych także występuje szum wynikający z rezystancji kanału, co ważniejsze występuje tu bardzo duża składowa „różowa" napięcia szumów (szum 1/f). W związku z tym MOSFETy mocno szumią w zakresie m.cz - bywają stosowane tylko przy bardzo dużych impedancjach źródła sygnału i przy większych częstotliwościach.

Wzmacniacze operacyjne

Już wcześniej omówiliśmy sposoby obliczania szumów na podstawie danych katalogowych. Żeby postawić kropkę nad i wypada dodać, że generalnie wzmacniacze z tranzystorami bipolarnymi na wejściu stosuje się przy mniejszych rezystancjach źródła sygnału. Choć wzmacniacze z wejściami FET mają zwykle większą napięciową gęstość szumów, to jednak przy dużych rezystancjach źródła właśnie one mają lepsze parametry, i co najważniejsze - są znacznie tańsze.

W **tabeli 1** podajemy podstawowe dane niskoszumnych układów scalonych. Dla porównania do listy dodano także popularne kostki dostępne w każdym sklepie. Większość pozycji to wzmacniacze operacyjne, ale znajdziemy tu także inne wzmacniacze niskoszumne oraz tranzystory.

Piotr Górecki