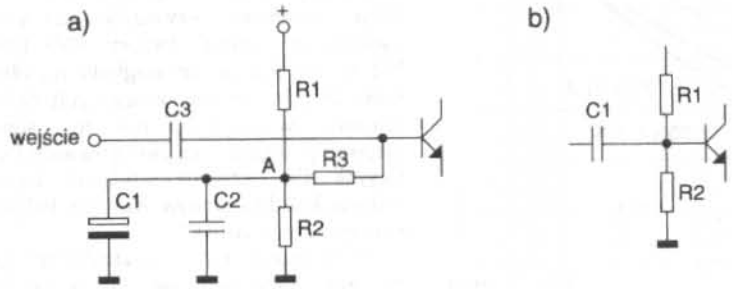


# Szumy, część 5



Czytelnicy, którzy przebrnęli przez część teoretyczną, są na pewno podbudowani pozytywnymi wynikami kartkówki z poprzedniego odcinka. Dziś zapraszamy do zapoznania się z praktycznymi wskazówkami dotyczącymi stosowania podstawowych elementów elektronicznych w układach niskoszumnych. Omówimy szumy rzeczywistych rezystorów, kondensatorów i cewek.



Rys. 10. Sposoby polaryzacji wejścia: a) właściwy; b) gorszy

## Szumy elementów elektronicznych

### Rezystory

Dowiedzieliśmy się już wcześniej, że z każdą rezystancją związany jest szum termiczny o mocy  $P = 4kTB$ . Szumu tego nie udaje się znacząco zredukować, ponieważ, jak wcześniej wykazaliśmy, zmniejszanie temperatury  $T$  niewiele daje, pasmo  $B$  w konkretnym zastosowaniu jest określone, a stałej Boltzmann  $k$ , niestety, nie da się zmienić.

W rzeczywistych rezystorach oprócz szumu termicznego występują jeszcze szum śrutowy i szumy migotania związane z przepływem prądu. Z tego względu napięcie i prąd rezystorów w krytycznych punktach układu, a szczególnie w obwodach wejściowych, powinny być jak najmniejsze. Zauważmy, że dla rezystorów węglowych (choć nie tylko) podaje się w katalogach szumy przypadające na dekadę pasma częstotliwości mierzone w mikrowoltach na wolt napięcia przyłożonego do rezystora.

**W układach niskoszumnych bezwzględnie należy stosować rezystory metalizowane lub drutowe, nigdy zaś węglowe warstwowe czy kompozytowe - te mają bowiem kilkakrotnie większe szumy.**

Stąd, na przykład, w obwodach polaryzacji zaleca się połączenia według rysunku 10a, gorsze wyniki osiąga się w układzie z rysunku 10b. W pierwszym przypadku na wejściu występują tylko szumy rezystora  $R3$  o niewielkiej wartości, w drugim - szumy równoległego połączenia  $R1$  i  $R2$  (najczęściej o dużo większej rezystancji).

W układach niskoszumnych bezwzględnie należy stosować rezystory metalizowane lub drutowe, nigdy zaś węglowe warstwowe czy kompozytowe - te mają bowiem kilkakrotnie większe szumy.

Blіsze szczegóły na ten temat zostaną opublikowane w jednym z przyszłych wydań Notatnika, poświęconym rezystorom.

Schemat zastępczy szumiącego rezystora przedstawia się zazwyczaj w postaci jak na rysunku 11. Jest to szeregowe połączenie „bezszybnego” rezystora i źródła napięcia szumów. To źródło napięcia reprezentuje zarówno szumy termiczne, jak i pozostałe szumy rzeczywistego rezystora.

### Kondensatory

Na pierwszy rzut oka kondensatory wcale nie powinny szumieć, w rzeczywistości występują tu jednak co najmniej dwa źródła szumów. Pierwszy to upływność, drugi - straty w dielektryku.

Rzeczywiste kondensatory, szczególnie elektrolityczne, mają skończoną rezystancję dla prądu stałego. Gdy do kondensatora jest dołączone napięcie stałe, to płynie prąd upływu i występuje związany z tym szum. Na szczęście taka

szumiąca „rezystancja upływu” jest równolegle połączona z reaktancją pojemnościową o dużo mniejszej wartości - niewielkie szumy upływu są więc zwierane przez tę reaktancję. W praktyce to źródło szumów można pominąć.

Poważniejsze znaczenie mają szumy wynikające ze strat dielektrycznych. W obwodach prądu zmiennego przy cyklicznym ładowaniu/rozładowaniu kondensatora część magazynowanej energii jest tracona w dielektryku. Młodym Czytelnikom wyjaśniamy, że choć

przy małych częstotliwościach kondensatory, szczególnie kondensatory stałe, zachowują się jak elementy idealne, to jednak przy większych częstotliwościach każdy rzeczywisty kondensator zachowuje się tak, jakby do niego dołączono wewnątrz rezystor. Najczęściej tę pojawiającą się przy przebiegach zmiennych rezystancję przedstawia się w układzie zastępczym kondensatora jak na rysunku 12. Jest to szeregowa rezystancja reprezentująca właśnie straty w dielektryku.

Jednym z ważnych parametrów kondensatora jest kąt strat (ności) lub tangens tego kąta. Tangens kąta strat jest to stosunek rezystancji  $R_s$  do reaktancji pojemnościowej w szeregowym układzie zastępczym. Wielkość kąta strat (i jego tangensa) są proporcjonalne do strat energii w dielektryku. Stąd już tylko krok do pojęcia dobroci kondensatora, ale o tym przy innej okazji.

Łatwo się domyślić, iż ze stratami w dielektryku, reprezentowanymi w układzie zastępczym kondensatora przez szeregową rezystancję, jest związany szum.

Skoro mówimy tu o szeregowej rezystancji występującej w kondensatorze, to zgodnie z poznanymi wcześniej wzorami napięcie takich szumów można wyrazić wzorem:

$$U = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot B \cdot R_s} \quad (26)$$

gdzie  $R_s$  oznacza rezystancję szeregową kondensatora.

W katalogach podaje się powszechnie tangens kąta strat dla określonej częstotliwości:

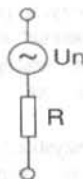
$$tg\delta = \frac{R_s}{C_s} = R_s \cdot 2\pi \cdot f \cdot C_s \quad (27)$$

stąd:

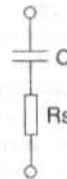
$$R_s = \frac{tg\delta}{2\pi \cdot f \cdot C_s} \quad (28)$$

ale tylko dla zakresu częstotliwości, dla którego określono  $tg\delta$ .

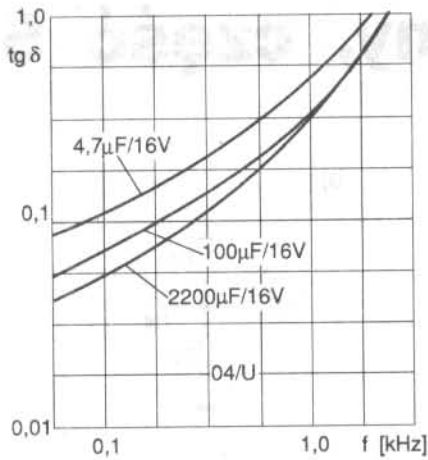
Pamiętajmy, że kąt strat danego kondensatora nie jest stały i silnie (często nieliniowo) zależy od temperatury i częstotliwości.



Rys. 11. Szumowy układ zastępczy rezystora



Rys. 12. Szumowy układ zastępczy kondensatora



Rys. 13. Tangens kąta strat kondensatora elektrolitycznego w funkcji częstotliwości

Największy kąt strat mają popularne elektrolityczne kondensatory aluminiowe, mniejszy, ale mocno zmienny pod wpływem różnych czynników - tantalowe, jeszcze mniejszy - stałe foliowe. Najlepsze (o najniższych stratach) są kondensatory mikiowe i teflonowe.

Na rysunku 13 znajdziemy wykres zależności tangensa kąta strat dla kilku popularnych aluminiowych kondensatorów elektrolitycznych produkcji krajowej. Z wykresu tego wynika między innymi, że dla częstotliwości powyżej 1kHz  $tg\delta > 1$ , więc szeregowa rezystancja strat jest większa od reaktancji pojemnościowej kondensatora. Dla pełnego obrazu należałoby według podanych dalej wzorów obliczyć wartość tej, szumiącej przecież, rezystancji strat (ale trzeba też uwzględnić, że pojemność „elektrolita” spada ze wzrostem częstotliwości).

„Tantale” mają tangens kąta strat o rząd wielkości mniejszy - przy częstotliwości 1kHz należy liczyć się z szacunkową wartością  $tg\delta$  około 0,1. Z kolei popularne krajowe kondensatory metalizowane MKSE020 przy  $f=1kHz$  mają  $tg\delta < 0,01$  - tu rezystancję szeregową i jej szumy można pominąć.

Dalszych szczegółów doczekają się Czytelnicy w odcinku Notatnika poświęconym kondensatorom.

Mamy więc odpowiedź na pytanie, dlaczego w układach niskoszumnych unika się kondensatorów elektrolitycznych i dlaczego w obwodach zasilania zamiast zwykłych aluminiowych „elektrolitów” stosuje się droższe kondensatory tantalowe. Również kondensatory sprzęgające (C3 na rys. 10a) w sprzeczce najwyższej klasy to kondensatory stałe

- foliowe, a nie elektrolityczne. I to nawet w przypadkach, gdy pojemność wynosi ponad 10µF!

Często jednak na wejściu stosuje się „elektrolity”. Dla ścisłości należałoby w katalogu znaleźć kąt stratności, obliczyć zastępczą rezystancję szeregową i wnoszone szumy (wzory (26)...(28)). Najczęściej jednak, ze względu na obecność innych, bardziej znaczących źródeł szumów w układzie, nie ma sensu „szpan” polegający na zastosowaniu (wyłącznie dla zrobienia wrażenia) baterii stałych kondensatorów zamiast jednego małego „elektrolita”.

Przy stosowaniu „elektrolitów” konieczne trzeba pamiętać, że muszą być one dobrze zaformowane, co w praktyce znaczy, iż muszą być podczas pracy spolaryzowane napięciem stałym, którego wartość ma być większa niż amplituda występujących przebiegów zmiennych. W żadnym wypadku nie wolno dopuścić do chwilowych nawet przebiegunowań „elektrolita”, ponieważ po takich operacjach kondensator wprawdzie nie ulegnie uszkodzeniu, jednak wzrosła jego szumy.

**Choć reaktancja pojemnościowa w odróżnieniu od rezystancji nie szumi „sama z siebie”, to należy ją uwzględnić przy analizie szumów wejściowych wzmacniacza - ma ona wpływ na składową szumu wynikającą z istnienia wejściowego zastępczego prądowego źródła szumu układu.**

Sprawa ta ma szczególne znaczenie we wzmacniaczach zasilanych symetrycznie, gdy na kondensatorze wejściowym nie występuje praktycznie żadne napięcie stałe (no, może jakieś miliwolt-y z napięć niezrównoważenia wzmacniacza). Niektórzy radzą tu sobie przez zastosowanie dwóch połączonych przeciwobnie w szereg jednakowych kondensatorów elektrolitycznych, jednak w świetle podanych informacji, jeśli chodzi o układy naprawdę niskoszumne, takie rozwiązanie byłoby ewidentnym błędem.

Niektórym Czytelnikom nasunie się pewnie pytanie czy reaktancja pojemnościowa, która przecież też jest jakąś opornością, szumi „sama z siebie” podobnie jak rezystancja?

Odpowiedź brzmi: nie, ale...

Reaktancja pojemnościowa, w odróżnieniu od rezystancji nie szumi „sama z siebie”, ale, jak się okazało w rozważaniach dotyczących szumów wzmacniaczy scalonych, trzeba ją brać pod uwagę przy analizie zastępczych prądowych źródeł szumu. „Sama z siebie” szumi tylko omówiona rezystancja szeregowa kondensatora wynikająca ze strat w dielektryku.

Może jeszcze nie dla wszystkich jest oczywiste, co się dzieje, gdy szumiący rezystor zboczniujemy dobrym kondensatorem. Naturalnie, tworzy się filtr RC, szumy (ale także ewentualny sygnał) powyżej częstotliwości granicznej równej:

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C}$$

ulegają stłumieniu (są zwierane przez niewielką impedancję kondensatora). Stąd zastosowanie w układzie z rys. 10a kondensatorów C1, C2. W ten sposób z punktu widzenia szumów punkt A jest w szerokim zakresie częstotliwości praktycznie zwarty do masy.

#### Cewki i transformatory

Pod względem szumów elementy indukcyjne zachowują się podobnie jak kondensatory. Reaktancja indukcyjna nie szumi „sama z siebie”, należy jednak uwzględnić rezystancję szeregową identycznie jak przy kondensatorach. W praktycznych układach szumy wnoszone przez elementy indukcyjne są niewielkie, najczęściej pomijalne.

Wnikliwi Czytelnicy zapytają, dlaczego nie uwzględniamy dyskretnego sposobu magnesowania rdzenia? Przecież rdzeń składa się z pewnej liczby dyskretnych dipoli, które się magnesują lub rozmagnesowują. Przecież wcześniej mówiliśmy, iż przy przepływie równie dyskretnych elektronów powstaje szum śrutowy. Owszem, ale analogia nie jest zupełna i w praktyce efekty takiego sposobu magnesowania można pominąć. Nie trzeba na przykład obawiać się, że zastosowany w torze mikrofonowym transformator wniesie dodatkowe szumy wynikające właśnie z dyskretnego sposobu magnesowania rdzenia.

Temat stosowania elementów indukcyjnych (mikrofonowych transformatorów podwyższających i filtrów w.c.) na wejściach wzmacniacza jest ważny i interesujący. Przez zastosowanie transformatora podwyższającego np. 1:10 możemy w pewnych warunkach uzyskać poprawę stosunku sygnał/szum na wyjściu wzmacniacza o kilka...kilkanaście decybeli, trzeba tylko odpowiednio zaprojektować obwody wejściowe wzmacniacza i dopasować rezystancje pracy. Przykład obliczeń zamieścimy w jednym z następnych odcinków.

Z kolei filtry w.c. we wzmacniaczach m.c. stają się wręcz koniecznością z uwagi na rosnący tłok w eterze.

Piotr Górecki

#### ERRATA

Płytki uniwersalnego komandora audio (EP 6/94, kit AVT-180) ma błędy w warstwie opisu elementów:

- układ scalony US4 (4066) powinien być odwrócony o 180°

- kondensator C7 (10µF) powinien być odwrócony o 180°

- oznaczenia wejść sterujących C i D (oraz E i F) powinny być zamienione miejscami.

Układ ścieżek płytki jest poprawny. Za zaistniałe kłopoty serdecznie przepraszamy naszych Czytelników.

Redakcja