

# Filtr pasmowoaporowy do pomiaru zawartości harmonicznych

Zniekształcenia nieliniowe są jednym z głównych parametrów charakteryzujących jakość sprzętu elektronicznego przeznaczonego do pracy w paśmie częstotliwości akustycznych, np. wzmacniaczy.

Profesjonalne przyrządy do pomiaru zniekształceń są bardzo drogie. Zazwyczaj umożliwiają pomiar współczynnika zniekształceń nieliniowych THD albo sprawdzenie zawartości harmonicznych za pomocą analizy spektralnej badanego przebiegu. W artykule zaprezentowano tani filtr, który użyty z odpowiednim generatorem może być głównym członem prostego zestawu do pomiaru współczynnika zniekształceń nieliniowych.

Współczynnik zawartości harmonicznych wzmacniaczy Hi-Fi jest mały (np. 0,2%), więc przy jego pomiarze źródło wzorcowego, sinusoidalnego sygnału wejściowego wzmacniacza musi mieć znacznie niższy poziom zniekształceń. Dlatego zestaw pomiarowy powinien umożliwiać zmierzenie THD rzędu co najmniej setnych części procentu.

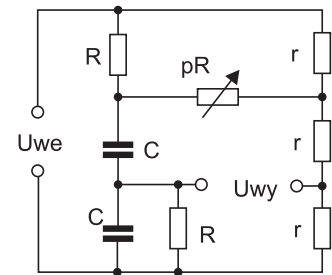
Oscyloskopy cyfrowe zazwyczaj są wyposażone w funkcję wyświetlającą spektrum przebiegu, ale dla uzyskania zadawalających dokładności przy tak niewielkich zniekształceniach trzeba raczej korzystać z innego relatywnie drogiego sprzętu. Jednak, gdy potrzeba pomiaru zniekształceń zdarza się rzadko, można posłużyć się opisanym niżej filtrem, tanim i nieskomplikowanym w realizacji i eksploatacji.

W analogowych zestawach pomiarowych współczynnika zniekształceń nieliniowych stosuje się filtry pasmowoaporowe usuwające z badanego przebiegu składową o częstotliwości podstawowej, natomiast przenoszące praktycznie bez tłumienia składowe harmoniczne. W praktyce wystarcza sprawdzanie zniekształceń tylko przy wybranych częstotliwościach np. 40 Hz, 1 kHz i 5 kHz. W wielu przypadkach nie ma możliwości dostrajania badanego sygnału do częstotliwości rezonansowej filtra, a więc częstotliwość ta musi być zmieniana przynajmniej w niewielkim przedziale.

W literaturze proponuje się do wytłumienia składowej o częstotliwości podstawowej zastosowanie mostka Wienera w konwencjonalnym układzie lub czwór-

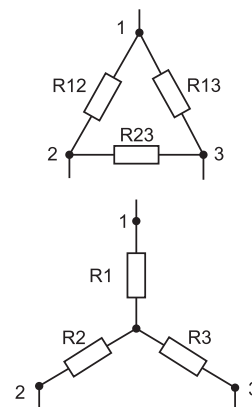
nika podwójne T. Jednak strojenie tych układów jest kłopotliwe, a nawet w przypadku czwórnik T szczególnie trudne. W zwykłym mostku Wienera częstotliwość filtra trzeba zmieniać równocześnie dwoma rezystorami, a w czwórniku podwójne T każda zmiana wartości elementu R lub C wpływa na częstotliwość filtra i jego tłumienie. Tymczasem dla łatwego przeprowadzania pomiaru istotne jest, aby regulacje częstotliwości i tłumienia były niezależne.

Wyróżnianie wymienionych układów RC można uznać za niefortunne, gdyż istnieje kilka innych mostkowych lub sześciociekłowych (np. ulepszonego przesuwnika fazowy opisany w EP 4/08 na str. 89), w których jest możliwa zmiana częstotliwości przez zmianę wartości tylko jednej rezystancji, bez wpływu na tłumienie. Układy te mają na ogół ograniczony zakres przestrajania (np. w stosunku 1:4), gdyż przy szerszej zmianie częstotliwości pogarszają się ich właściwości. Jednak w tym przypadku znakomicie spełniają wszystkie wymagania filtra. Jednym z takich układów jest odmiana mostka Wienera przedstawiona na **rysunku 1**. Mostek Wienera jest uzupełniony dodatkowym rezystorem  $pR$ , którym można zmieniać jego częstotliwość rezonansową. W części selektywnej mostka, rezystory i pojemności są jednakowe, a wtedy dla uzyskania równowagi mostka (tzn.  $U_{wy} = 0$ ) przy częstotliwości rezonansowej oraz zachowaniu tej równowagi podczas przestrajania, także dzielnik napięcia mostka powinien składać się z trzech



Rysunek 1. Rezystancją  $pR$  dodatkowego rezystora wstawionego do mostka Wienera zmienia się częstotliwość rezonansową

rezystorów o jednakowej rezystancji  $r$ . Po wstawieniu do mostka rezystora  $pR$ , trzy rezystory  $R$ ,  $pR$  i  $tR$  są połączone w trójkąt, przy czym  $t=r/R$ . Działanie takiego układu może być wyjaśnione przez zastąpienie go równoważnym układem gwiazdy. Zilustrowano to na **rysunku 2**. Zmiana wartości jednej rezystancji w układzie trójkąta jest równoważna zmianie trzech rezystancji w układzie gwiazdy:  $R_1 = R_{12}R_{13}/(R_{12} + R_{13} + R_{23})$ ,  $R_2 = R_{12}R_{23}/(R_{12} + R_{13} + R_{23})$ ,  $R_3 = R_{23}R_{13}/(R_{12} + R_{13} + R_{23})$ . Z podanych wzorów wynika, że stosunek rezystancji  $R_2/R_3 = R_{12}/R_{13}$  jest stały i nie zależy od rezystancji  $R_{23}$ . W zastępczym układzie gwiazdy otrzymujemy zamiast rezystancji  $R$  i  $r$  odpowiednio rezystancje  $pR/(1+p+t)$  i  $ptR/(1+p+t)$ . Wraz ze zmianą rezystancji w części selektywnej mostka zmienia się więc także częstotliwość rezonansowa



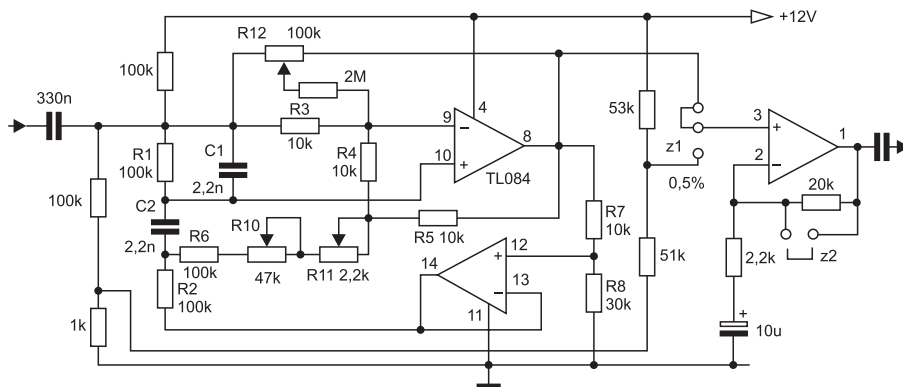
Rysunek 2. Rezystory połączone w trójkąt i równoważny układ gwiazda

układu, ale stosunek rezystancji  $t=r/R$  pozostaje stały i równowaga mostka jest zachowana. Spadek napięcia na trzecim rezystorze układu gwiazdy zmniejsza napięcie wejściowe mostka i ma wpływ na właściwości układu. Dla zminimalizowania tego wpływu należy przyjmować  $r < R$ . Wtedy obliczając częstotliwość można przyjąć, że do rezystora  $R$  jest dołączony równolegle rezystor  $pR$ . Połączenie rezystorów w trójkąt celem regulacji częstotliwości jest stosowane nie tylko w mostku Wienera, ale także w innych układach RC, w których jest potrzebna współbieżna zmiana wartości dwóch rezystancji. Częstotliwość rezonansowa filtru, przy której składowa bierna napięcia wyjściowego części selektywnej mostka jest równa zero, wynosi

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \sqrt{\frac{(1+p+t)}{p}}$$

Przy braku dodatkowego rezystora, tzn.  $p=\infty$ , układ staje się zwykłym mostkiem Wienera, a częstotliwość rezonansowa jest najmniejsza  $f_{0min} = 1/(2\pi RC)$ .

Korzystając z podanych wyżej wzorów można obliczyć, że  $p=(1+t)/(F^2-1)$ , przy czym  $F=f_0/f_{0min}$ . Przykładowo, jeśli  $R=100 \text{ k}\Omega$ ,  $C=2,2 \text{ nF}$ , to  $f_{0min}=723 \text{ Hz}$ . Zakładając, że zakres częstotliwościowy przestrajania wynosi od 950 Hz do 1050 Hz oraz  $t=0,1$ , otrzymujemy wartości  $p$ : 1,51



Rysunek 3. Filtr wytłumiający składową o częstotliwości zmieniającej od ok. 950 Hz do ok. 1050 Hz

i 0,99. Dlatego rezystancja  $pR$  powinna być złożona z części stałej ok. 100 k $\Omega$  i zmiennej ok. 50 k $\Omega$ .

Filtr mostkowy z rys. 1 może usunąć praktycznie całkowicie składową częstotliwości podstawowej, ale ma zbyt małą dobroć  $Q$  (ok. 0,3) i wytłumia znacznie także składowe częstotliwości harmoniczne. Dla poprawnego przenoszenia tych składowych dobroć filtru powinna być o rząd większa. Na rysunku 3 przedstawiono aktywny filtr pasmowo-zaporowy z mostkiem Wienera według rysunku 1. Wzmacniacz operacyjny umożliwia nie tylko powiększenie dobroci filtru, ale także sprawia, że wejście i wyjście

układu są połączone wspólnym węzłem, a więc sygnał wyjściowy nie jest odbierany z przekątnej mostka. Sprężenie zwrotne (ok. 75% napięcia wyjściowego) potrzebne do powiększenia dobroci wprowadza się za pośrednictwem wzmacniacza operacyjnego pracującego jako wtórnik. Rezystory  $R7$  i  $R8$  tworzące dzielnik napięcia mogłyby być częścią rezystora  $R2$  filtru. W ten sposób da się zaoszczędzić jeden wzmacniacz operacyjny, ale w bilansie takie rozwiązanie nie jest korzystne. Dobranie elementów mostka jest bardzo ułatwione, gdyż nie tylko  $C1=C2$ ,  $R1=R2$ , ale także  $R3=R4=R5$ . Przy selekcji jednakowych wartości rezystancji

R E K L A M A



## NAJWIĘKSZY PRODUCENT MODUŁÓW LASEROWYCH W POLSCE OFERUJE:



### Całe spektrum wskaźników laserowych:

- proste pointery,
  - przemysłowe generatory linii, generatory krzyża,
  - profesjonalne laserowe systemy pomiarowe
- Realizujemy zamówienia niestandardowe; tworząc rozwiązania wg indywidualnych potrzeb klienta.

### Oprócz produkcji modułów zajmujemy się sprzedażą całej gamy produktów z zakresu optoelektroniki:

- diody laserowe, diody LED, soczewki, płytki szklane,
- elementy optomechaniczne, filtry, okulary ochronne,
- okna i kurtyny ochronne, sterowniki laserowe,
- spektrometry, oświetlacze IR, moduły Peltiera,
- wizualizatory podczerwieni.

NOWOŚĆ w naszej ofercie:

### Laserowy Czujnik Położenia

wyróżnienie jury  
podczas Międzynarodowych Targów  
Optoelektroniki i Fotoniki

OPTON

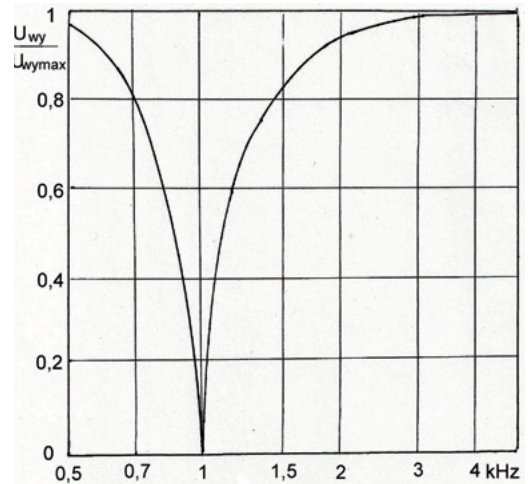


ul. Zwolenńska 43/43a, 04 - 761 Warszawa  
tel. 022 615 73 71, 022 615 64 31  
info@semicon.com.pl, www.semicon.com.pl

i pojemności wymagana jest dobra rozdzielczość pomiarowa a niekiedy dokładność, gdyż średnią częstotliwość rezonansową można łatwo przesunąć zmieniając tylko rezystancję **R6**. Przy podanych wartościach elementów **R** i **C** wytłumianą składową o częstotliwości 1000 Hz można zmieniać w granicach ok.  $\pm 5\%$  rezystorami zmiennymi **R10** zgrubnie i **R11** dokładnie, natomiast tłumienie korygować potencjometrem **R12** wpływającym na równowagę mostka. Dla otrzymania innych wartości częstotliwości trzeba zmienić pojemności kondensatorów **C1, C2**. Charakterystykę przenoszenia filtru z rys. 3 pokazano na rysunku 4. Dobroć filtru **Q** wynosi ok. 2. Zmniejszając stosunek wartości rezystancji **R7/R8**, można ją zwiększyć i wskutek tego poprawić przenoszenie drugiej harmonicznej, ale wtedy wytłumianie składowej o częstotliwości podstawowej byłoby bardziej utrudnione. Już przy zastosowanym sprzężeniu zwrotnym, dla uzyskania wytłumienia składowej o częstotliwości podstawowej poniżej 0,1%, przestrajanie musi być przeprowadzane z rozdzielczością mniejszą od 0,03% (czyli 0,3 Hz). Odpowiada to zmianie rezystancji rezystora regulacji częstotliwości o mniej niż 150  $\Omega$ .

Wejście układu jest połączone bezpośrednio z mostkiem bez członu buforowego, który mógłby wprowadzać zniekształcenia. Dzięki temu także międzyszczytowe napięcie wejściowe może być znaczne i nawet przekraczać napięcie zasilania układu. Jednak rezystancja wewnętrzna źródła badanego sygnału nie powinna być większa od 1 k $\Omega$ , co zazwyczaj występuje. W innym przypadku, trzeba wejście uzupełnić wtórnikiem (w tym celu można wykorzystać pozostały wzmacniacz operacyjny układu TL084) i zmniejszyć maksymalną wartość napięcia wejściowego.

Napięcie wyjściowe filtru jest wzmacniane ok. dziesięciokrotnie, ale gdy jest ono duże, może być także przeniesione bez wzmocnienia po włączeniu zworki **z2**. Przy równoważeniu mostka istotna jest informacja czy należy zmieniać częstotliwość rezonansową filtru (rezystorami **R10, R11**), czy też trzeba skorygować tłumienie filtru (potencjometrem **R12**). Taką informację zawiera napięcie wyjściowe o częstotliwości podstawowej. Jeśli jest spowodowane odstrojeniem od częstotliwości rezonansowej, to jest ono przesunięte w fazie o 90° względem napięcia wejściowego, natomiast składowa zgodna fazowo z napięciem wyjściowym (lub przesunięta o 180°) wynika z niewytłumienia składowej o częstotliwości rezonansowej wskutek niedokładności elementów **R** i **C** mostka. Do wyodrębnienia tych sygnałów mogą służyć detektory fazowe. W ten sposób da się zrealizować automatyczne równoważenie układu, np. gdy jako **pR** z rys. 1 zastosuje się fotorezystor oświetlany sygnałem uzyskiwanym z detektora fazowego. Jednak w praktyce przy równoważeniu manualnym wystarczy posługiwać się oscyloskopem. Do wyjścia układu dołącza się tor odchylenia pionowego oscyloskopu, natomiast oś pozioma powinna być wysterowana sygnałem wejściowym. Wtedy przy nierównoważonym mostku i małych zniekształceniach sygnału wejściowego otrzymujemy na ekranie elipsę. Składowa napięcia wyjściowego mostka, przesunięta fazowo względem napięcia wejściowego o 90°, zmienia powierzchnię elipsy, natomiast nachylenie elipsy względem osi poziomej jest wynikiem niewytłumienia



Rysunek 4. Charakterystyka przenoszenia filtru z rysunku 3

składowej zgodnej fazowo z napięciem wejściowym. Zmieniając częstotliwość rezonansową filtru rezystorami **R10** i **R11** trzeba zminimalizować powierzchnię elipsy, przechodzącą w skrajnym przypadku w linię. Elipsę, względnie linię, obraca się do poziomu korygując tłumienie filtru potencjometrem **R12**. Otrzymany obraz jest znaną z pomiarów oscyloskopem krzywą Lissajous i na jej podstawie można wnioskować o częstotliwości harmonicznych. Wartość skuteczna zminimalizowanego w ten sposób napięcia wyjściowego, porównana z sygnałem wejściowym, pozwala na obliczenie współczynnika zniekształceń nieliniowych. W tym celu można także wykorzystać napięcie kalibracji, które wynosi 0,5% napięcia wejściowego i jest włączane zworką **z1**.

Jan Szrednicki  
j.szrednicki@upcpoczta.pl

R E K L A A M A

**Klaskacz – wersja z przekaźnikiem**  
**AVT 721/2**

[www.sklep.avt.pl](http://www.sklep.avt.pl)