



# Uniwersalny moduł filtrów MFB



## Do czego to służy?

W EdW 3/2002 zaprezentowany był uniwersalny moduł do realizacji filtrów Sallen-Keya. W niniejszym artykule przedstawiony jest moduł, umożliwiający realizację filtrów z wielokrotnym sprzężeniem zwrotnym (MFB - Multiple FeedBack). Opisujący moduł, oprócz filtrów dolno- i górnoprzepustowych o dużej stromości zboczy pozwala zrealizować także filtry pasmowe. Moduł zawiera dwa stopnie drugiego rzędu, a więc pozwala na realizację filtru czwartego rzędu, czyli o stromości zbocza wynoszącej aż 80dB/dekadę (24dB/oktawę).

W tym artykule podane są wyjątkowo proste recepty, dzięki czemu nawet początkujący nie będą mieć żadnych problemów z wykonaniem filtru o potrzebnej częstotliwości granicznej. Wartości rezystorów podane są na rysunkach, a pojemność kondensatorów dla potrzebnej częstotliwości granicznej odczytuje się z tabeli albo oblicza z bardzo prostego wzoru.

Obszerniejsze wskazówki dotyczące projektowania podstawowych filtrów prezentowane są w kolejnych Listach od Piotra, począwszy od EdW 9/2001.

## Jak to działa?

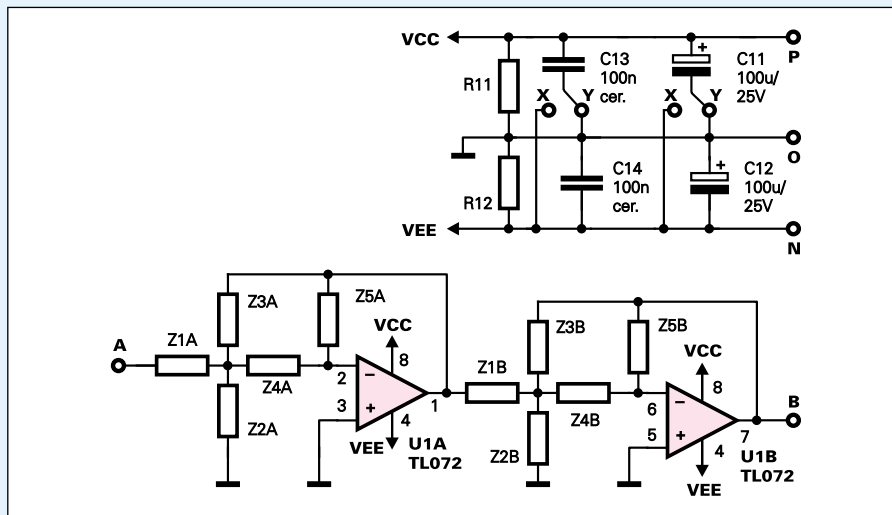
Podstawowy schemat modułu pokazany jest na rysunku 1. Kondensatory C11...C14 i rezystory R11, R12 tworzą obwód zasilania, dzięki któremu moduł może być zasilany zarówno napięciem symetrycznym  $\pm 4V... \pm 18V$ , jak i pojedynczym  $8...25V$ . W każdym przypadku masą sygnałową jest obwód połączony z punktem O.

Dwa wzmacniacze operacyjne z kostki U1 pracują w dwóch stopniach filtru. Ponieważ moduł pozwala na realizację zarówno filtru dolnoprzepustowego, górnoprzepustowego jak i (wąsko)pasmowego, elementy

biernie filtru opisano na schemacie literą Z (oznaczającą impedancję). Montowane tu będą rezystory i kondensatory o wartościach podanych w tabeli i na rysunkach 2, 3 i 4.

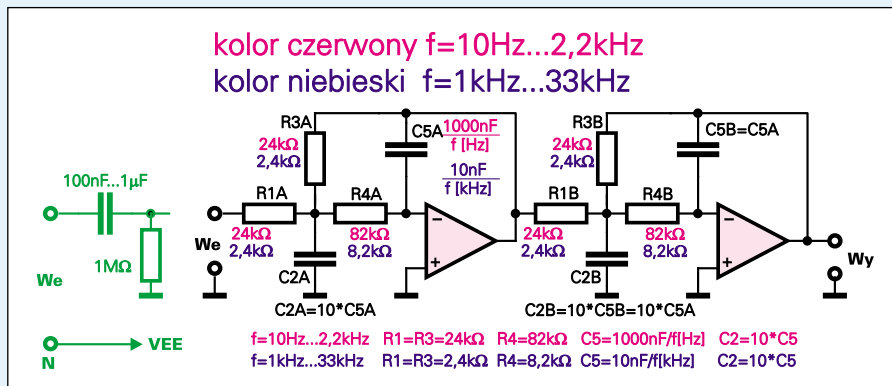
Uwaga! W przypadku filtru dolnoprzepu-

stowego pasmo obejmuje także częstotliwość 0Hz, czyli napięcia stałe. W wersji z pojedynczym zasilaniem masą modułu jest punkt O, a nie punkt N. W razie potrzeby, aby odciąć składową stałą i częstotliwości poniżej

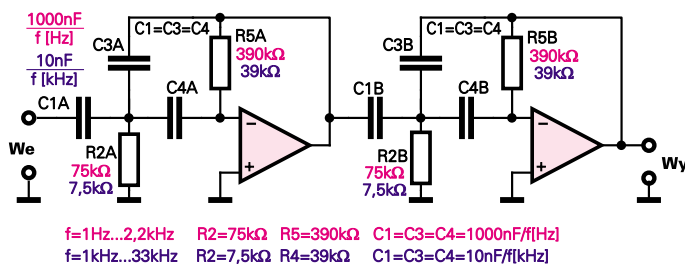


Rys. 1 Schemat ideowy modułu

Rys. 2 Filtr dolnoprzepustowy



**kolor czerwony  $f=1\text{Hz}...2,2\text{kHz}$**   
 **kolor niebieski  $f=1\text{kHz}...33\text{kHz}$**



**Rys. 3 Filtr górnoprzepustowy**

1Hz trzeba dodać na wejściu dodatkowy obwód RC, zaznaczony na rysunku 2 kolorem zielonym.

Aby maksymalnie uprościć projektowanie przyjęto prostą zasadę, że częstotliwość graniczna filtru będzie ustalona przez dobór pojemności kondensatorów, natomiast rezystory będą mieć ustaloną wartość, podaną na rysunkach i w wykazie elementów. Podobnie jak poprzednio, w proponowanym układzie do realizacji filtrów na zakres częstotliwości

akustycznych wykorzystywane będą kondensatory o pojemnościach z zakresu 330pF...1μF. Układy zostały tak obliczone, że kluczowe pojemności (C5 w filtrze dolnoprzepustowym, C1, C3, C4 w filtrze górnoprzepustowym i C3, C4 w pasmowym) mają mieć wartości podane w tabelach. Kondensator C2 w filtrze dolnoprzepustowym ma mieć wartość dziesięciokrotnie większą, niż podana w tabeli. Jeśli ktoś chciałby uzyskać pośrednie wartości częstotliwości, pomiędzy podanymi w tabeli, może połączyć dwa kon-

densatory równolegle, ale nie warto przy tym dążyć do dużej precyzji, ponieważ po pierwsze nie jest to wcale potrzebne (odchyłka o kilka procent nie ma znaczenia w realnych układach), a ponadto przy 5-procentowych rezystorach i 5- lub 10-procentowych kondensatorach uzyskanie idealnej precyzji jest wręcz niemożliwe.

Także i tu w filtrach dolno- i górnoprzepustowych można zastosować albo wartości zaznaczone kolorem niebieskim albo czerwonym. Jak pokazuje **tabela 1**, wartości zaznaczone kolorem niebieskim można śmiało wykorzystać dla całego zakresu akustycznego. Takie „niebieskie” wartości należy stosować, jeśli filtr ma mieć częstotliwość graniczną większą niż 2kHz. Jeśli jednak częstotliwość graniczna ma być mniejsza niż 2kHz, warto zastosować wartości zaznaczone na rysunku, w wykazie i w **tabeli 2** kolorem czerwonym. Wtedy rezystory mają większe nominaly i oporność wejściowa filtru jest jeszcze większa.

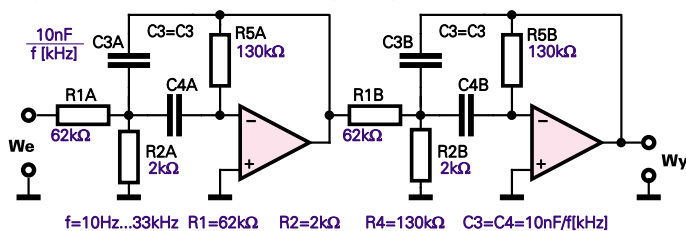
Oporność wejściowa (impedancja) wersji „czerwonej” jest bardzo duża, co najmniej rzędu dziesiątek kiloomów i nie trzeba się martwić, że filtr obciąży poprzedni stopień.

**Tabela 1**

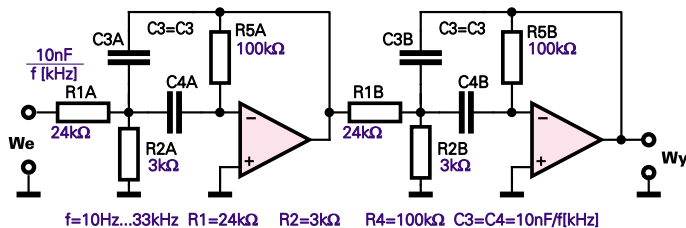
f [Hz]	10	15	21	30	45	67	100	150	210	300	450	670	1k	1,5k	2,1k	3,0k	4,5k	6,7k	10k	15k	21k	30k
C [nF]	1u	680	470	330	220	150	100	68	47	33	22	15	10	6,8	4,7	3,3	2,2	1,5	1	0,68	0,47	0,33
wartości nie zalecane – raczej zastosuj wartości „czerwone”														wartości zalecane								
f [Hz]	1	1,5	2,1	3	4,5	6,7	10	15	21	30	45	67	100	150	210	300	450	670	1000	1500	2100	3000
C [nF]	1u	680	470	330	220	150	100	68	47	33	22	15	10	6,8	4,7	3,3	2,2	1,5	1	0,68	0,47	0,33

**Rys. 4 Filtry pasmowe**

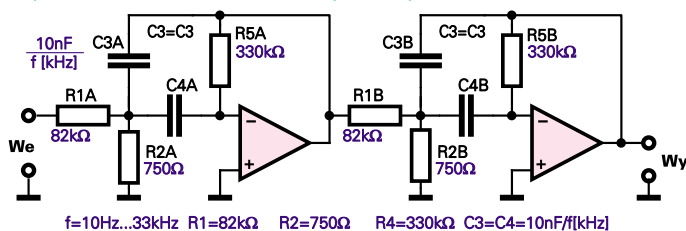
**a) wzmacnienie  $G=1x$  (0dB) dobroć  $Q=6$**



**b) wzmacnienie  $G=4x$  (12dB) dobroć  $Q=5$**



**c) wzmacnienie  $G=4x$  (12dB) dobroć  $Q=16$**



**Tabela 2**

W przypadku wersji „niebieskiej” impedancja wejściowa filtru dolnoprzepustowego jest zbyt duża (rzędu pojedynczych kiloomów) i poprzedni stopień musi mieć niewielką oporność wyjściową. W razie wątpliwości, na wejściu filtru w wersji „niebieskiej” można zastosować wtórnik na wzmacniaczu operacyjnym lub tranzystor w układzie wspólnego kolektora.

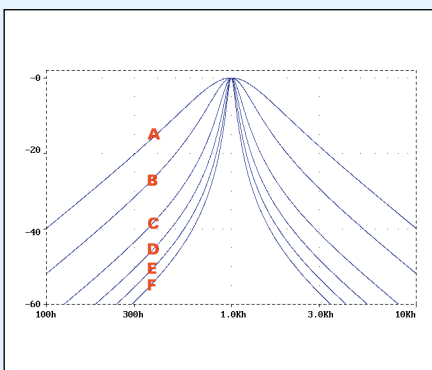
Z filtrami pasmowymi jest inaczej. Tu oporność wejściowa jest praktycznie równa rezystancji R1A i wynosi kilkadziesiąt kiloomów. Nie ma więc potrzeby (choć jest to możliwe) wykorzystywać wartości „czerwonych”. Dlatego na rysunku 4 podano tylko wartości „niebieskie”, dotyczące tabeli 1. Na **rysunku 4** podano trzy przykłady różnego wzmacnienia i dobroci wypadkowej, które okażą się przydatne w praktyce. Nie sposób

**Tabela 3**

Cn=10nF	A	B	C	D	E	F
<b>R1A,R1B</b>	15,9kΩ	31,8kΩ	63,6kΩ	95,4kΩ	127,2kΩ	159kΩ
<b>R2A,R2B</b>	15,9kΩ	4,54kΩ	2,05kΩ	1,34kΩ	1,00kΩ	0,799kΩ
<b>R5A,R5B</b>	31,8kΩ	63,6kΩ	127,2kΩ	190,8kΩ	254,4kΩ	318kΩ
<b>dobroć</b>						
<b>jednego stopnia</b>	1	2	4	6	8	10
<b>Q - dobroć</b>						
<b>dwoch stopni</b>	1,5	3,1	6,2	9,4	12,5	16

przewidzieć wszystkich potrzeb, a w filtrach pasmowych można łatwo zmieniać wzmocnienie i dobroć. **Tabela 3 i rysunek 5** pokazują wartości rezystorów i charakterystyki filtrów o częstotliwości 1kHz, wzmocnieniu 1 (0dB) i różnej dobroci, gdzie wszystkie kondensatory miały wartość 10nF. Podane wartości elementów można wykorzystać w praktyce, stosując rezystory 5-procentowe o najbliższych nominałach i dobierając kondensatory według „niebieskiej” tabeli 1. Dalejszych wskazówek należy szukać w jednym z następnych odcinków *Listów od Piotra*, gdzie zamieszczone będą wzory dotyczące jednego stopnia. Omawiany tu moduł zawiera dwa stopnie, dlatego wypadkowa dobroć całości jest większa.

Rys. 5



O ile w filtrach dolno- i górnoprzepustowych drobne odchyłki wartości elementów o kilka procent nie mają znaczenia, o tyle w filtrach pasmowych może zająć potrzeba dokładnego dostrajania się do częstotliwości pracy - jest to bardzo proste. Przede wszystkim warto połączyć dwa kondensatory równolegle, żeby ich sumaryczna pojemność była możliwie bliska wyliczonej z podanego wzoru:

$$C = 10nF/f[kHz].$$

Nie trzeba dobierać pojemności z dokładnością większą niż 5% - nieuniknione odchyłki związane z tolerancją kondensatorów można skorygować zmieniając wartość rezystorów R2A i R2B. Do prób warto zamiast nich włączyć potencjometry, a potem po zmierzeniu i przetestowaniu układu wlutować rezystory o potrzebnej wartości (dwa lub trzy połączone w szereg).

Aby filtr miał dobre parametry, konieczne należy w nim zastosować kondensatory foliowe. W żadnym wypadku nie należy wykorzystywać kondensatorów ceramicznych ferroelektrycznych (o pojemności powyżej 1nF). Jedynie kondensatory o pojemnościach 330pF...1nF mogą być ceramiczne. Generalnie należy stosować rezystory metalizowane, zwłaszcza w filtrach pasmowych o dużej dobroci. W pozostałych przypadkach wystarczą typowe rezystory o tolerancji 5% (z paskiem złotym).

## Montaż i uruchomienie

Filtr MFB z rysunków 2, 3, 4 można zamontować na płytce drukowanej, pokazanej na **rysunku 6**. Montaż nie powinien nikomu sprawić kłopotów. Warto zacząć od wlutowania elementów najmniejszych, czyli odznaczonych na płytce zwór. Przy zasilaniu napięciem symetrycznym można nie montować R11, R12, a „dolne nóżki” kondensatorów C11, C13 trzeba wlutować do otworów oznaczonych Y. Przy zasilaniu napięciem pojedynczym R11, R12 są niezbędne do wytworzenia sztucznej masy, a „dolne nóżki” C11, C13 trzeba wlutować do otworów oznaczonych X.

Aby uniknąć pomyłek, warto narysować sobie „prywatny” schemat montażowy, pokazujący rozmieszczenie rezystorów i kondensatorów na podstawie jednego ze schematów ideowych (rysunki 2...4). Na wkładce w środku numeru można znaleźć odpowie-

dnie rysunki, które posłużą za matrycę do stworzenia takiego „prywatnego” schematu.

Płytkę została zaprojektowana w ten sposób, by wszystkie punkty dla zewnętrznych połączeń znajdowały się przy jednej krawędzi. Umożliwi to wlutowanie modułu filtra w jakąkolwiek większą płytkę.

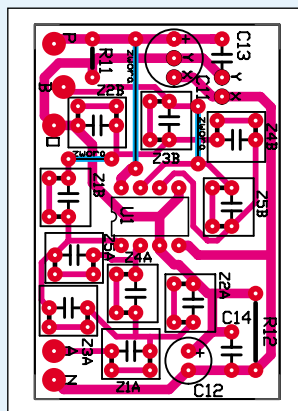
## Przykłady

### 1. Potrzebny jest filtr dolnoprzepustowy o częstotliwości granicznej 3,4kHz.

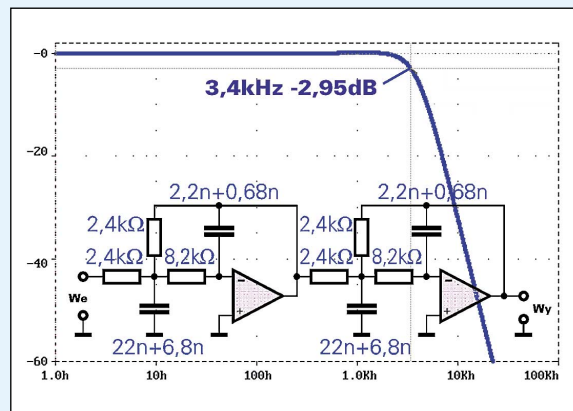
Korzystamy z rysunku 2 i z konieczności decydujemy się na elementy „niebieskie”. Z tabeli 1 wynika, że najbliższa „standardowa” wartość częstotliwości wynosi 3kHz przy pojemności 3,3nF. Chcemy uzyskać możliwie dobrą dokładność, więc zastosujemy pojemność pośrednią między 3,3nF a 2,2nF przez połączenie równoległe pojemności 2,2nF i 680pF.

Ciąg dalszy na stronie 54.

Rys. 6 Schemat montażowy



Rys. 7



## Wykaz elementów

R11, R12 .....100kΩ (10kΩ...220kΩ)  
C11, C12 .....100μF/25V

### Filtr dolnoprzepustowy

Dla częstotliwości 10Hz .....2,2kHz  
R1A,R1B,R3A,R3B .....24kΩ  
R4A,R4B .....82kΩ  
C5A,C5B .....według tabeli 2  
C2A,C2B .....10\*C4

Dla częstotliwości 1kHz .....33kHz  
R1A,R1B,R3A,R3B .....2,4kΩ  
R4A,R4B .....8,2kΩ  
C4A,C4B .....według tabeli 1  
C2A,C2B .....10\*C4

### Filtr górnoprzepustowy

Dla częstotliwości 1Hz .....2,2kHz  
R2A,R2B .....75kΩ  
R5A,R5B .....390kΩ  
C1A,C3A,C1B,C3B,C4A,C4A .....według tabeli 2

Dla częstotliwości 1kHz .....33kHz  
R2A,R2B .....7,5kΩ  
R5A,R5B .....39kΩ  
C1A,C3A,C1B,C3B,C4A,C4A

### Filtr środkowoprzepustowy

a) wzmocnienie G=1x (0dB) dobroć Q=6  
f=10Hz...33kHz  
R1=62kΩ R2=2kΩ R4=130kΩ  
C3=C4=10nF/f[kHz] lub według tabeli 1

b) wzmocnienie G=4x (12dB) dobroć Q=5  
f=10Hz...33kHz  
R1=24kΩ R2=3kΩ R4=100kΩ  
C3=C4=10nF/f[kHz] lub według tabeli 1

c) wzmocnienie G=4x (12dB) dobroć Q=16  
f=10Hz...33kHz  
R1=82kΩ R2=750Ω R4=330kΩ  
C3=C4=10nF/f[kHz] lub według tabeli 1

Uwaga! Ze względu na wiele możliwości zestaw AVT-2628 dostępny jest tylko w wersji A (sama płytką).

Płytkę drukowaną dostępna jest w sieci handlowej AVT jako kit szkolny AVT-2628/A

Ciąg dalszy ze strony 59.

**Rysunek 7** pokazuje schemat i charakterystykę.

**2. Potrzebny jest filtr górnoprzepustowy o częstotliwości granicznej 1kHz.**

Korzystamy z rysunku 3. Decydujemy się na elementy „czerwone”. Z tabeli 2 odczytujemy wartość pojemności równą 1nF. **Rysunek 8** pokazuje schemat i charakterystykę, a model wykonany na płytce próbnej pokazany jest na fotografii wstępnej.

**3. Potrzebny jest filtr środkowoprzepustowy o częstotliwości środkowej 1kHz.**

Korzystamy z rysunku 4. Decydujemy się na jedną z podanych wersji. Schematy i charakterystyki dla wszystkich trzech wersji pokazane na rysunkach 9a...9c dotyczą nominalnych wartości elementów. Ze względu na tolerancję warto dostroić oba stopnie filtru korygując wartość R2A, R2B.

**3. Potrzebny jest filtr środkowoprzepustowy o częstotliwości środkowej 720Hz i jak największej dobroci.**

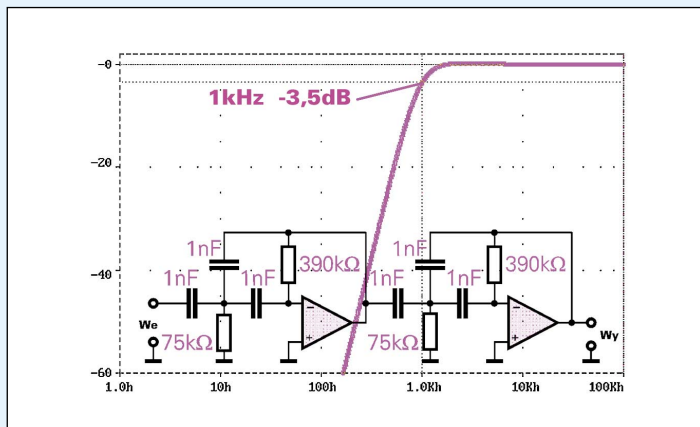
Wybieramy układ według rysunku 4c. Dokładna wartość pojemności powinna wynosić:

$$C = 10nF / 0,72kHz = 13,88nF$$

Stosujemy równoległe połączenie kondensatorów MKT 10nF+3,3nF o tolerancji 5% (z literą J). Ponieważ filtr ma mieć dużą dobroć, a więc i wąskie pasmo, aby zapewnić stabilność cieplną i długoczasową stosujemy rezystory metalizowane 1-procentowe o wartościach: R1=82,5kΩ, R3=332kΩ, a jako R2 szeregowe połączenie rezystora 649Ω i helitrima 220Ω. Po próbach i dostrojeniu zamiast helitrima w lutujemy rezystor stały.

Piotr Górecki

**Rys. 8**



**Rys. 9**

