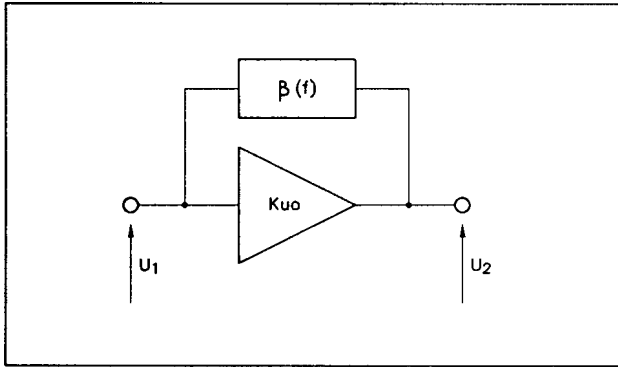


Filtry aktywne można zaliczyć do grupy układów selektywnych tzn. wzmacniających sygnały o określonym zakresie częstotliwości. Filtry posiadają jedno lub dwa pasma przepustowe (wzmocnienie lub brak tłumienia) i jednocześnie jedno lub dwa pasma zaporowe (tłumienie). Wzajemny układ pasm określa rodzaj filtru. Filtr dolnoprzepustowy posiada pasmo przepustowe od strony niskich częstotliwości i pasmo zaporowe od strony częstotliwości wysokich. Odwrotnie będzie w przypadku filtru górnoprzepustowego. Filtr środ-

kowoprzepustowy posiada pasmo przepustowe w zakresie średnich częstotliwości i dwa pasma zaporowe – od strony niskich i wysokich częstotliwości. Odwrotna sytuacja wystąpi w filtrze środkowozaporowym. Filtrami aktywnymi nazywamy grupę układów selektywnych wykorzystujących elementy aktywne (tranzystory, wzmacniacze operacyjne) oraz elementy biernie R, C. Znalazły one szczególne zastosowanie w zakresie niskich częstotliwości, gdzie zastąpiły filtry LC.

Podstawowy układ i podział filtrów aktywnych

Aktualnie do realizacji filtrów aktywnych prawie wyłącznie stosowane są wzmacniacze operacyjne. Umożliwiają one realizację układów o różnych charakterystykach częstotliwościowych dzięki zastosowaniu sprzężeń zwrotnych zależnych od częstotliwości.



Rys. 1 Schemat blokowy filtru aktywnego

Filtr aktywny składa się z szerokopasmowego wzmacniacza o wzmocnieniu K_{u0} i członu sprzężenia zwrotnego, którego współczynnik sprzężenia zależny jest od częstotliwości $\beta(f)$. Przy dodatnim sprzężeniu zwrotnym maksimum wzmocnienia będzie odpowiadało maksimum współczynnika sprzężenia zwrotnego. Przy sprzężeniu zwrotnym ujemnym charakterystyka filtru będzie odwrotnością charakterystyki członu sprzężenia zwrotnego. Maksimum wzmocnienia będzie odpowiadało minimum współczynnika sprzężenia zwrotnego. Można wyobrazić sobie układ wyposażony w oba rodzaje sprzężeń zwrotnych.

Skomplikowanie układu sprzężenia zwrotnego wpływa na przebieg charakterystyki wzmocnienia w paśmie przepustowym, a przede wszystkim na nachylenie charakterystyki w obszarze przejściowym – między paśmami przepustowym i zaporowym. Nachylenie charakterystyki wynika z tzw. rzędu filtru. Filtr I rzędu posiada nachylenie charakterystyki 6 dB/okt. lub 20 dB/dek. Skrót "okt." (łac. oktawa) oznacza podwojenie lub 1/2 częstotliwości. Skrót "dek." (dekada) oznacza dziesięciokrotny wzrost lub tyleż krotne zmniejszenie częstotliwości.

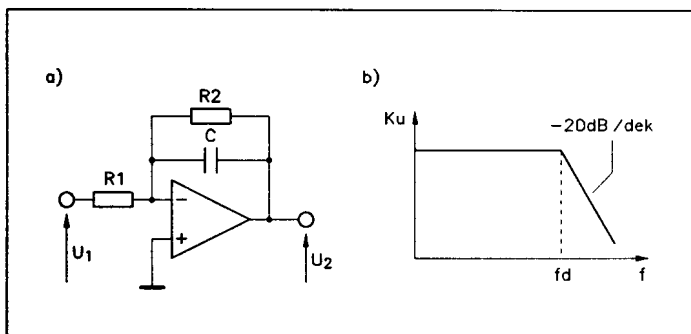
Rząd filtru pomnożony przez 6 dB określa nachylenie charakterystyki wyrażone w dB/okt. Filtr II rzędu posiada nachylenie 12 dB/okt., filtr III rzędu 18 dB/okt., a IV rzędu 24 dB/okt.

Kształt charakterystyki filtru w paśmie przepustowym i w pobliżu częstotliwości granicznej zależy od właściwości filtru, określanych jako maksymalnie liniowej charakterystyki fazowej – filtr Bessela lub maksymalnie liniowej charakterystyki wzmocnienia – filtr Butterwortha.

Zastosowany rodzaj sprzężenia zwrotnego określa filtr jako układ z dodatnim lub ujemnym sprzężeniem zwrotnym. Odwracanie fazy sygnału wyjściowego względem wejściowego zachodzi w filtrze odwracającym fazę. W filtrze nieodwracającym, fazy sygnałów wejściowego i wyjściowego są zgodne.

Filtry I rzędu

Nachylenie charakterystyki częstotliwościowej wynoszące 6 dB/okt. posiada wzmacniacz tranzystorowy, czy wykorzystujący wzmacniacz operacyjny. Układ taki można już zaliczyć jako filtr I rzędu. przykład filtru dolnoprzepustowego I rzędu pokazany jest na rys. 2.



Rys. 2 Filtr dolnoprzepustowy I rzędu

Pokazana obok charakterystyka filtru posiada nachylenie -20 dB/dek., które jest równoważne nachyleniu -6 dB/okt. Wzmocnienie filtru w paśmie przepustowym określone jest stosunkiem rezystancji $R2/R1$ – jest to wzmacniacz odwracający. Zastosowane sprzężenie zwrotne ($R2, C2$) jest sprzężeniem ujemnym. Częstotliwość graniczna filtru określona jest wzorem:

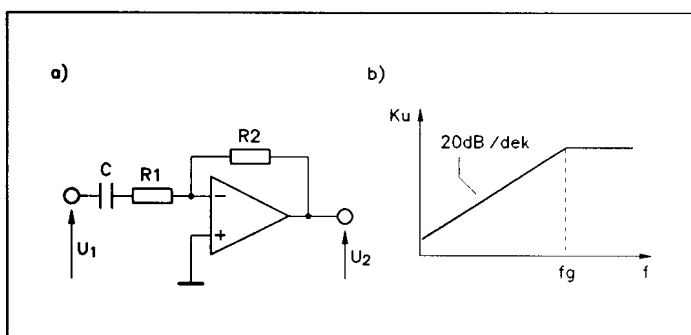
$$f_g = 1/(2 \cdot \pi \cdot R2 \cdot C)$$

Przy tej częstotliwości wzmocnienie filtru spada o 3 dB zaś przesunięcie fazy wynosi -45° .

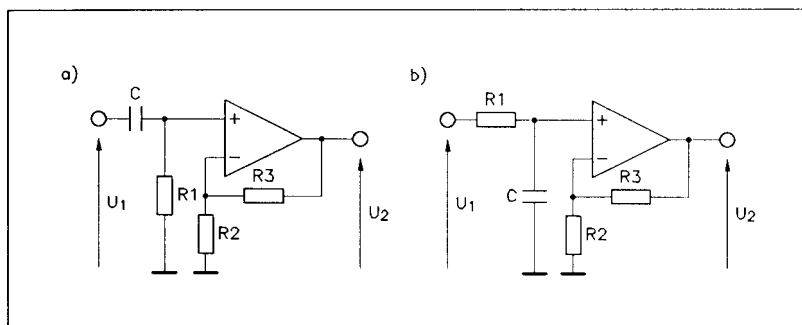
Układ filtru górnoprzepustowego I rzędu pokazany jest na rys. 3. Rys. 3b prezentuje charakterystykę częstotliwościową tego filtru. Wzmocnienie w paśmie przenoszenia określone jest także stosunkiem $R2/R1$. Częstotliwość graniczna równa jest:

$$f_g = 1/(2 \cdot \pi \cdot R1 \cdot C)$$

Przy tej częstotliwości wzmocnienie układu spada o 3 dB od strony niskich częstotliwości, faza wynosi $+45^\circ$.



Rys. 3 Filtr górnoprzepustowy I rzędu



Rys. 4 Filtry I rzędu – nieodwracające fazy sygnału

Zaletą filtrów aktywnych w stosunku do ich odpowiedników zbudowanych z elementów biernych LC jest łatwa możliwość zmiany częstotliwości f_g (tzw. strojenie filtru). Drugą zaletą jest wzmocnienie sygnału.

W niektórych zastosowaniach niepożądane jest przesunięcie fazy wprowadzane przez wzmacniacz odwracający. Wady tej pozbawione są filtry zrealizowane na wzmacniaczu nieodwracającym pokazane na rys. 4.

Rys. 4a prezentuje filtr górnoprzepustowy, a rys. 4b filtr dolnoprzepustowy. Wzmocnienie obu filtrów w paśmie przepustowym wynosi:

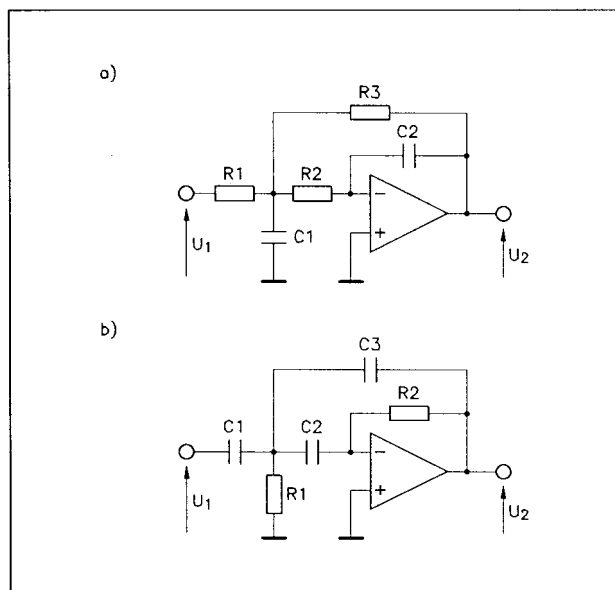
$$k_u = 1 + R_3/R_2$$

Częstotliwości graniczne będą równe:

$$f_g = 1/(2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot C)$$

Filtry I rzędu należą do grupy filtrów Butterwortha. Kształt charakterystyki w pobliżu częstotliwości granicznej nie zależy od wzmocnienia. Nachylenie charakterystyki filtrów I rzędu w wielu zastosowaniach jest niewystarczające i dlatego stosuje się filtry wyższych rzędów.

Filtry II rzędu



Rys. 5 Filtry II rzędu z wielokrotnym ujemnym sprzężeniem zwrotnym

Filtr II rzędu można uzyskać przez wprowadzenie dwóch ujemnych sprzężeń zwrotnych zależnych od częstotliwości. Każde z nich daje nachylenie charakterystyki 6 dB/okt., a więc łącznie 12 dB/okt. Przykłady takich filtrów pokazane są na rys. 5.

Rys. 5a przedstawia filtr dolnoprzepustowy, a rys. 5b filtr górnoprzepustowy. Obserwując schematy obu filtrów można zauważyć tzw. zasadę dualności.

Polega ona na tym, że filtr górnoprzepustowy można uzyskać z filtru dolnoprzepustowego po zamianie rezystorów na kondensatory a kondensatorów na rezystory. Zasada ta jest także nazywana transformacją LP – HP (z ang. *low pass – high pass*).

Praktycznie rezystor należy zastąpić kondensatorem o pojemności:

$$C [F] = 1/R[\Omega],$$

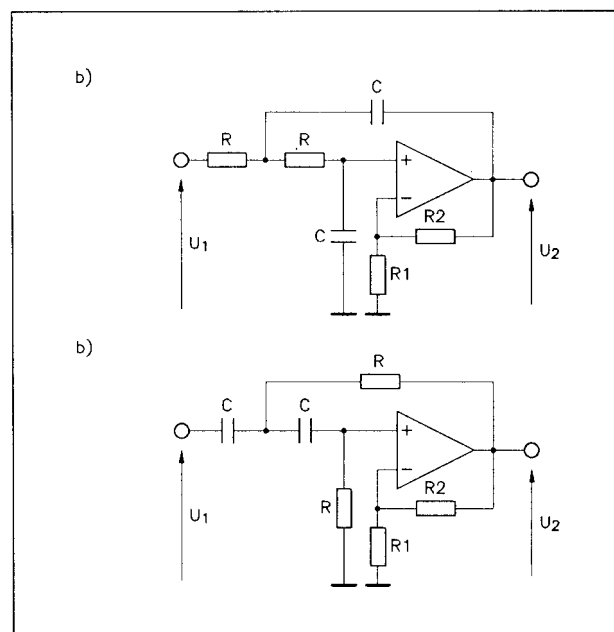
a kondensator rezystorem:

$$R [\Omega] = 1/C [F]$$

Przy tak dokonanej transformacji nie zmienia się częstotliwość graniczna, a jedynie charakter filtru.

Dobór elementów filtru wpływa na częstotliwość graniczną i charakterystykę częstotliwościową w pobliżu częstotliwości granicznej. Elementy takiego filtru dobierać trzeba eksperymentalnie i nieocenione usługi przy tej operacji oddają komputerowe programy symulacji układów liniowych np. PSpice czy Micro-Cap.

Łatwiejsze do zaprojektowania są filtry II rzędu z dodatnim sprzężeniem zwrotnym pokazane na rys. 6.



Rys. 6 Filtry II stopnia z dodatnim sprzężeniem zwrotnym

Rys. 6a – filtr dolnoprzepustowy, rys. 6b – filtr górnoprzepustowy. Łatwość projektowania wynika głównie

z ujednolicenia rezystorów R i kondensatorów C . Także tutaj widoczna jest zasada dualności. Wzmocnienie obu filtrów w paśmie przenoszenia wynosi:

$$k_u = 1 + R_2/R_1$$

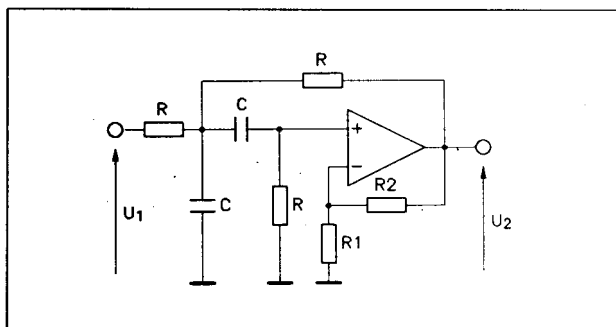
Częstotliwości graniczne obu filtrów określone są wzorem:

$$f_g = 1/2 \cdot \Pi \cdot R \cdot C$$

Z filtrami tymi związane jest pojęcie dobroci – określające przebieg charakterystyki częstotliwościowej przy częstotliwości granicznej. Dobroć liczbowo jest równa wzmocnieniu względnemu (k_{ug}/k_u) przy częstotliwości granicznej f_g . Charakterystykę maksymalnie płaską (Butterwortha) uzyskuje się przy dobroci równej 0,7. Możliwe jest uzyskanie zwiększenia wzmocnienia przy częstotliwości granicznej – dobroć > 1 . Filtr ten nazywany jest filtrem Sallen – Key.

Często wykorzystywaną wersją jest filtr o wzmocnieniu k_u równym 1 V/V. Właściwość tą uzyskuje się po wymontowaniu rezystora R_1 i zwarcie wejścia odwracającego "–" z wyjściem wzmacniacza.

Na bazie filtru Sallen – Key możliwe jest wykonanie filtru środkowo przepustowego. Schemat filtru pokazany jest na rys. 7.



Rys. 7 Filtr II rzędu – środkowoprzepustowy

Częstotliwość środkowa filtru f_0 wynosi:

$$f_0 = 0,7/(\Pi \cdot R \cdot C)$$

Dobroć natomiast określona jest następującym wzorem:

$$Q = \delta f/f_0 = 1/(3 - k_u)$$

Należy zauważyć, że w przypadku filtrów dolno i górnoprzepustowego działania obu sprzężeń zwrotnych sumowały się dając nachylenie charakterystyki częstotliwościowej 12 dB/okt. W sytuacji filtru środkowoprzepustowego sprzężenia zwrotne działają jakby niezależnie: jedno od strony częstotliwości wyższych od f_0 a drugie od strony częstotliwości niższych. Nachylenie zboczy będzie więc równe jedynie 6 dB/okt.

Filtry kaskadowe

Większe nachylenia charakterystyki częstotliwościowej na granicy pasm uzyskuje się w filtrach wyższych rzędów. Projektowanie ich jak i dobór elementów są kłopotliwe. Często stosowaną metodą uzyskania filtru wyższego rzędu jest łączenie kaskadowe (jeden za drugim) filtrów niższego rzędu. Przykładowo takie połączenie dwóch filtrów II rzędu daje filtr IV rzędu o nachyleniu charakterystyki częstotliwościowej 24 dB.

Dzięki temu rozwiązaniu, skomplikowane projektowanie filtrów wyższego rzędu można ograniczyć do projektowania filtrów I i II rzędu. Przy łączeniu kaskadowym kilku filtrów uzyskuje się filtr o rzędzie będącym sumą rzędów poszczególnych filtrów. Zależność ta wynika z ogólnej właściwości kaskadowego łączenia czwórników, mówiącej, że wypadkowa funkcja przenoszenia czwórników połączonych kaskadowo jest równa iloczynowi funkcji przenoszenia każdego z nich.

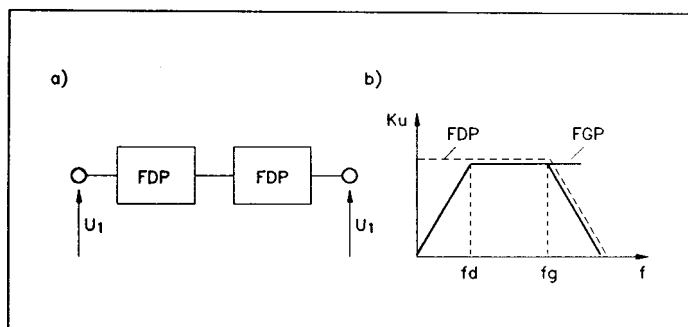
Połączenie kaskadowe dwóch filtrów o przeciwnych charakterystykach (dolnoprzepustowego i górnoprzepustowego) pozwala na uzyskanie filtru środkowoprzepustowego. Operacja ta pokazana jest na rys. 8.

Dla uzyskania wypadkowej charakterystyki środkowoprzepustowej, charakterystyki filtrów składowych powinny zachodzić na siebie. Nachylenia zboczy tak spreparowanego filtru będą równe 12 dB/okt. jak dla filtru II rzędu.

Filtr środkowozaporowy można uzyskać przez połączenie równoległe filtrów dolno i górnoprzepustowego o pasmach przepustowych nie zachodzących na siebie.

Inne rodzaje filtrów

Filtr środkowozaporowy można zrealizować korzystając z układu podwójne T. Jest to układ RC charakteryzujący się minimum charakterystyki przenoszenia przy jednej częstotliwości.

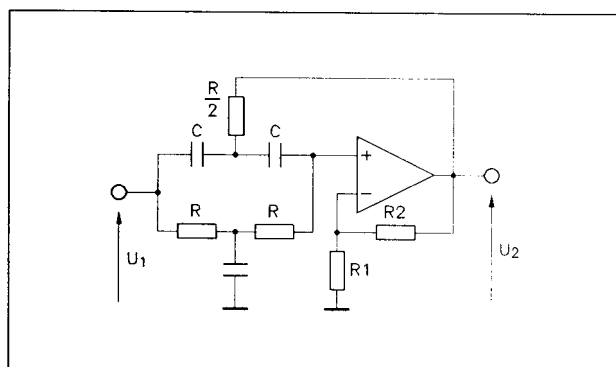


Rys. 8 Filtr środkowoprzepustowy – kaskadowy

Teoretyczna wartość tłumienia wynosi nieskończoność. Praktycznie jest mniejsza wskutek niedokładności zastosowanych elementów i sprzężeń między nimi. Zastosowanie go w układzie sprzężenia zwrotnego dodatniego pozwala na uzyskanie układu środkowozaporowego. Układ pokazany jest na rys. 9.

Częstotliwość środkowa tłumionego sygnału określona jest podanym niżej wzorem:

$$f_0 = 1/(2 \cdot \Pi \cdot R \cdot C)$$



Rys. 9 Filtr środkowozaporowy z mostkiem TT

Tłumienie sygnału może dochodzić do -80 dB. Wzmocnienie filtra poza pasmem zaporowym określone jest wzorem znanym ze wzmacniacza nieodwracającego:

$$k_u = 1 + R_2/R_1$$

Aktualnie duże znaczenie uzyskują tzw. filtry żyratorowe, które wykorzystują analog indukcyjności wytworzony przez układ tzw. żyratora. Żyrator jest układem

wykorzystującym wzmacniacz operacyjny do realizacji "sztucznej" indukcyjności. Element taki w powiązaniu z kondensatorami pozwala na realizację filtra LC. Projektowanie takiego filtra, to w zasadzie projektowanie filtra LC realizującego założoną charakterystykę a następnie projektowanie odpowiednich żyratorów.

Jak więc widać możliwe jest wyeliminowanie cewek indukcyjnych z filtrów pasmowych. Pomimo tego nie było można takich filtrów wykonać w formie układów scalonych ze względu na brak możliwości wykonania rezystancji i pojemności o dużych wartościach i dobrych parametrach. Filtry takie można było realizować jedynie w technologii hybrydowej.

Bariera została przełamana po wprowadzeniu tzw. filtrów C-przełączane. Technika ta polega na zastosowaniu w obwodzie wejściowym wzmacniacza pojemności dołączanej na zmianę do wejścia układu i wejścia wzmacniacza operacyjnego. Skomplikowanie układu nie gra większej roli w układach scalonych, a umożliwia realizację filtrów w technologii MOS.

Ciąg dalszy w następnym numerze.