

APARATURA

BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Projekty aktywnych filtrów analogowych

FILIP KAGANKIEWICZ

DOKTORANT, POLITECHNIKA WARSZAWSKA, WYDZIAŁ INŻYNIERII PRODUKCJI

Słowa kluczowe: filtry, analogowe, aktywne, dolnoprzepustowe, górnoprzepustowe

STRESZCZENIE:

Punktem wyjścia do artykułu był fakt, że nie w każdej aplikacji jest możliwe wykorzystanie filtrów cyfrowych, w związku z czym podjęto się wykonania projektów aktywnych filtrów analogowych. W pracy opisano metody projektowania aktywnych filtrów analogowych. Przedstawiono trzy główne metody projektowania takie jak Sallen-Key, Multiple Feedback oraz Linkwitz-Riley. W drugiej części pracy zostały przedstawione dwa projekty filtrów: dolnoprzepustowego oraz górnoprzepustowego, o częstotliwości granicznej 1 kHz, które miały za zadanie charakteryzować się wysokim tłumieniem w paśmie zaporowym.

Projects of analog active filters

Keywords: filters, analog, active, lowpass filter, highpass filter

ABSTRACT:

The starting point for the article was the fact that it is not possible to use digital filters in every application, therefore active analogue filter designs have been made. The paper describes methods of designing active analog filters, three main design methods are presented, such as Sallen-Key, Multiple Feedback and Linkwitz-Riley. The second part of the work presents two designs of lowpass and high-pass filters, which have 1 kHz limit frequency. The objective was that filters should have a high attenuation in the stop band.

1. PROJEKTOWANIE FILTRÓW

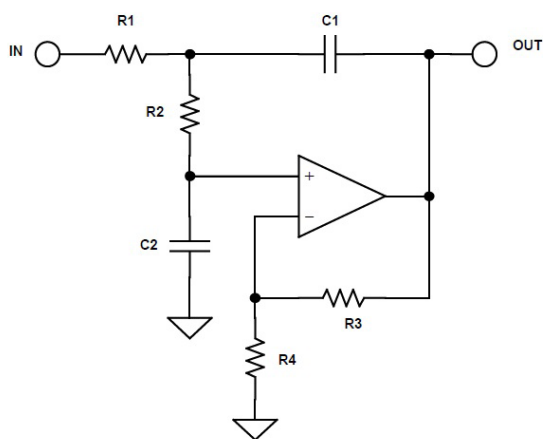
Znając podstawowe zagadnienie związane z filtrami i ich charakterystykami oraz chcąc przejść do etapu projektowania filtrów, trzeba wyróżnić dwie podstawowe metody realizacji struktury filtrów aktywnych:

- filtry Sallen-Key,
- filtry Multiple Feedback (MFB).

Metody te pozwalają projektować filtry dowolnego typu, tj. dolnoprzepustowe, górnoprzepustowe, środkowoprzepustowe, a także środkowo-zaporowe wielorzędowe.

1.1 Sallen-Key

Konfiguracja Sallen-Key, znana również jako napięciowa kontrola źródła napięcia (Voltage Controlled Voltage Source – VCVS), została wymyślona w 1955 roku w MIT Lincoln Labs przez R. P. Sallen i E. L. Key. Jest jedną z najszerzej stosowanych topologii budowania filtrów aktywnych, gdyż cechuje się przede wszystkim prostotą. Kolejnym aspektem popularności tego rozwiązania jest fakt, że wzmacniacz operacyjny jest skonfigurowany jako wzmacniacz, a nie integrator, co minimalizuje szerokość pasma wzmocnienia. To powoduje, że dla danego wzmacniacza operacyjnego możemy zaprojektować filtr wyższej częstotliwości niż w przypadku innych struktur, gdyż wzmocnienie filtru nie wpływa na jego wydajność, tak jak gdyby był skonfigurowany jako sumator. Faza sygnału przez filtr jest w zasadzie zachowywana, dzięki temu, że jest podłączany pod wejście wzmacniacza operacyjnego nieodwracającego fazy. Częstotliwość oraz dobroć są raczej niezależne, aczkolwiek są one wrażliwe na parametr wzmocnienia sygnału.



Rysunek 1 Przykładowy schemat realizacji filtra dolnoprzepustowego metodą Sallen-Key

Przedstawiony powyżej schemat (Rys. 1) pokazuje nam strukturę takiego filtru. Jest to realizacja dwóch rzędów filtru dolnoprzepustowego aktywnego. Rezystory R_1 i R_2 oraz kondensatory C_1 i C_2 odpowiadają za częstotliwość graniczną tego filtru, natomiast rezystory R_3 i R_4 odpowiadają za wzmocnienie sygnału.

Kolejną cechą tej konfiguracji jest to, że stosunek największej wartości rezystora do najmniejszej oraz stosunek największej wartości kondensatora do najmniejszej jest stosunkowo niski, a więc jest to opłacalne do produkcji.

Mimo tego, że filtry Sallen-Key są szeroko stosowane, to mają one również wady, a jedną z nich jest to, że nie są one łatwo dostrajane ze względu na wzajemne oddziaływanie składowych wartości częstotliwości F_0 oraz dobroci układu Q [1, 2].

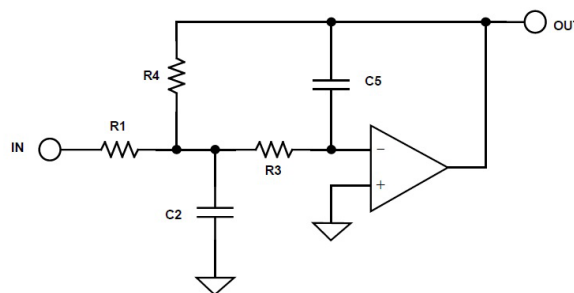
1.2 Multiple Feedback

Filtry wielokrotnego sprzężenia zwrotnego wykorzystują wzmacniacze operacyjne jako integratory, co powoduje, że zależność transmitancji od parametrów wzmacniacza jest większa niż w realizacji Sallen-Key. W filtrach zbudowanych w tej topologii trudno jest generować wysoką dobroć oraz sekcje wysokich częstotliwości ze względu na ograniczenia otwartej pętli wzmacniacza operacyjnego. Zasadą jest, że wzmocnienie w otwartej pętli wzmacniacza operacyjnego powinno wynosić co najmniej 20 dB (x10) powyżej amplitudy odpowiedzi na częstotliwość rezonansową lub odcięcia, włączając w to podbicie spowodowane przez dobroć filtru.

Wartość szczytowa amplitudy w odniesieniu do dobroci wyraża się wzorem:

$$A_0 = H * Q \quad (1)$$

gdzie H jest wzmocnieniem układu. Filtr wielokrotnego sprzężenia zwrotnego odwraca fazę, jest więc to równoważne z dodaniem stałej 180° do przesunięcia fazowego.

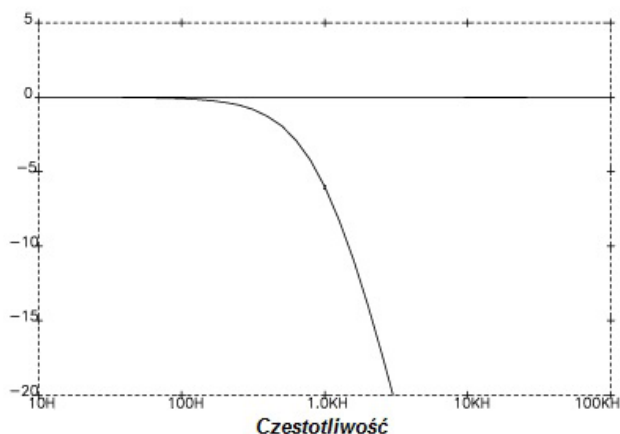


Rysunek 2 Przykładowy schemat realizacji filtra dolnoprzepustowego metodą Multiple Feedback

Stosunek największej wartości elementów do najmniejszej jest zdecydowanie większy w filtrach wielokrotnego sprzężenia zwrotnego niż w metodzie Sallen-Key [2].

1.3 Linkwitz-Riley

Filtr Linkwitz-Riley jest filtrem używanym m.in. w zwrotnicach dźwiękowych. Twórcami tego filtru są Siegfried Linkwitz i Russ Riley, którzy pierwotnie opisali połączenia aktywnej zwrotnicy w JAES w lutym 1976. Filtr jest również znany jako Butterworth do kwadratu. Filtry L-R są zwykle projektowane jako połączenie kaskadowe dwóch filtrów Butterwortha, z których każdy ma -3 dB wzmocnienia dla częstotliwości odcięcia, w rezultacie filtr L-R ma -6 dB wzmocnienia dla tej częstotliwości [8].



Rysunek 3 Przykładowa charakterystyka filtra L-R o częstotliwości granicznej 1 kHz

Filtry L-R wykorzystują aktywną strukturę Sallen-Key do realizacji dwóch rzędów filtru. Odpowiedź jest określona przez ω_0 i Q_0 .

$$\omega_0 = 2\pi f_0 \quad (2)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{R\sqrt{C_1 C_2}} \quad (3)$$

$$Q_0 = 0,5\sqrt{C_1 C_2} \quad (4)$$

$$R = \frac{1}{2Q_0\omega_0 C_2} \quad (5)$$

$$C_1 = 4Q_0^2 C_2 \quad (6)$$

Każdy rząd filtru L-R może być zaimplementowany poprzez połączenie kaskadowe dwurzędowych modułów Sallen-Key. Wartości Q_0 na każdym etapie przedstawiono w Tabeli 1. Wartości poszczególnych komponentów dla każdego etapu i dla danej częstotliwości odcięcia mogą być obliczone

przy użyciu Q_0 i przez wybór dogodnej wartości dla C_2 lub R_2 w powyższych wzorach.

Tabela 1 Wartości dobroci filtru Linkwitz-Riley dla poszczególnych rzędów

	LR2	LR4	LR6	LR8	LR10
Q_0 sekcji 1	0,5	0,71	0,5	0,54	0,5
Q_0 sekcji 2		0,71	1,0	1,34	0,62
Q_0 sekcji 3			1,0	0,54	1,62
Q_0 sekcji 4				1,34	0,62
Q_0 sekcji 5					1,62
dB/skok oktawy	12	24	36	48	60

Filtry wyższego rzędu niż 4 mogą okazać się nieprzydatne ze względu na rosnący szczyt opóźnienia w grupie częstotliwości oscylujących wokół f_0 [3].

2. PROJEKTY FILTRÓW

W ramach pracy założono zaprojektowanie dwóch różnych filtrów:

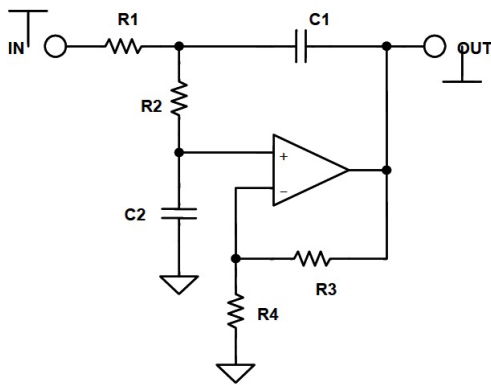
- dolnoprzepustowego o częstotliwości granicznej 1 kHz,
- górnoprzepustowego o częstotliwości granicznej również 1 kHz.

Oba filtry zdecydowano wykonać opisaną wcześniej metodą Sallen-Key.

2.1 Filtr dolnoprzepustowy

Jako założenia do projektu tego filtru przyjęte zostały następujące warunki:

W paśmie przepustowym może być maksymalne tłumienie dla częstotliwości 1 kHz 3 dB, natomiast przy paśmie zaporowym -40 dB na oktawę. Dodatkowo sygnał powinien cechować się brakiem wzmocnienia w paśmie użytecznym oraz powinien być zoptymalizowany na niski pobór prądu. Zasilanie tego filtru winno wynosić przynajmniej $+V_s = 5$ V, $-V_s = 5$ V. Dodatkowo przyjęto, że tolerancje dla rezystorów powinny wynosić 1%, natomiast dla kondensatorów 5%. Filtrem spełniającym powyższe założenia jest filtr ósmego rzędu Linkwitza-Rileya. Tak duża wielkość rzędu jest uzasadniona tym, że powinno to pozwolić uzyskać charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe o wysokim spadku. Poniżej zamieszczono schemat (Rys. 4a) połączeń dla takiego filtru wraz z zaznaczoną ekwipotencjalnością układu.



Rysunek 4a Schemat realizacji filtra metodą Linkwitza-Rileya

Grupa elementów składająca się z rezystorów, kondensatorów oraz wzmacniacza operacyjnego odpowiada za realizację dwóch rzędów filtra dolnoprzepustowego, a więc projektowany filtr będzie się składał z 4 takich bloków. Rezystory R_3 i R_4 zostaną pominięte, ponieważ odpowiadają za ewentualne wzmocnienie sygnału. Pomimo braku rezystorów układ będzie działał, zakładając że we wzmacniaczu operacyjnym pętla sprzężenia zwrotnego zostanie zamknięta, tak jak to przedstawiono na finalnym Rysunku 4b. Poniższe wzory przedstawiają transmitancję układu (stosunek sygnału wyjściowego do wejściowego):

$$G(s) = \frac{+H\omega_0^2}{s^2 + \alpha\omega_0s + \omega_0^2} \quad (7)$$

$$\frac{V_0}{V_{IN}} = \frac{H \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}{s^2 + s \left[\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \frac{1}{C_1} + \frac{(1-H)}{R_2 C_2} \right] + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (8)$$

Do obliczeń przyjęto, że wartości rezystorów oraz będą sobie równe. Dobierając rezystor $R = 160 \text{ k}\Omega$ i korzystając z wzorów przedstawionych wcześniej, można wyliczyć pozostałe wartości elementów.

Wartości, jakie uzyskano do budowy tego filtra, to:

a) Dla $Q = 0,54$ (etap pierwszy i trzeci)

$R = 160 \text{ k}\Omega$

$C_1 = 0,91 \text{ nF}$

$C_2 = 1,07 \text{ nF}$

b) Dla $Q = 1,34$ (etap drugi i czwarty)

$R = 160 \text{ k}\Omega$

$C_1 = 370 \text{ pF}$

$C_2 = 265,5 \text{ pF}$

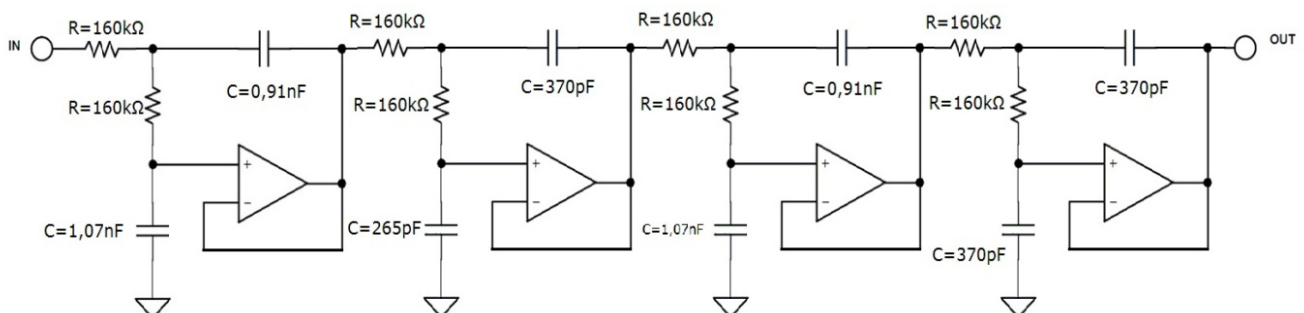
Po uzyskaniu wartości oporników i kondensatorów, połączono elementy w etapy, każdy zgodnie ze schematem (3) pokazanym wcześniej. Następnie, etapy połączono szeregowo jeden za drugim. Gdyby była potrzeba wzmocnienia sygnału, to należy wykorzystać gałąź składającą się z elementów R_3 i R_4 . Dobierając rezystor R_3 , drugi można wyznaczyć z następującego wzoru:

$$R_4 = \frac{R_3}{(H - 1)} \quad (9)$$

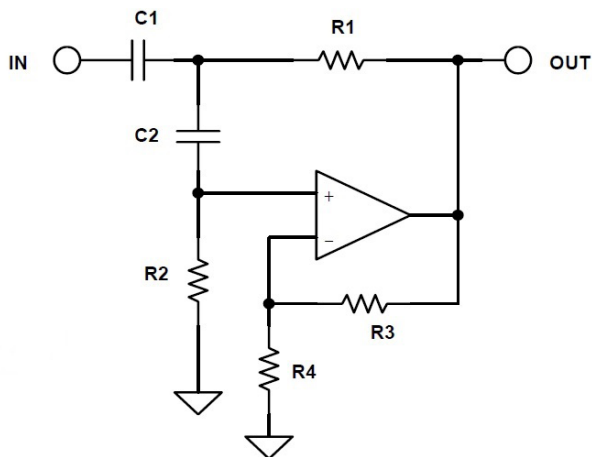
2.2 Filtr górnoprzepustowy

Jako założenia do projektu tego filtra przyjęte zostały następujące warunki:

W paśmie przepustowym może być maksymalne tłumienie dla częstotliwości 1 kHz 3 dB, natomiast w paśmie zaporowym -40 dB dla częstotliwości 500 Hz. Dodatkowo sygnał powinien cechować się brakiem wzmocnienia w paśmie użytecznym oraz powinien być zoptymalizowany na niski pobór prądu. Zasilanie tego filtra winno wynosić $+V_s = 5 \text{ V}$, $-V_s = -5 \text{ V}$. Dodatkowo przyjęto, że tolerancje dla rezystorów mogą wynosić 1%, natomiast dla kondensatorów 5%. Filtrem spełniającym powyższe założenia jest filtr siódmego rzędu Butterwortha. Tak duża wielkość rzędu jest uzasadniona tym, że chciano uzyskać dosyć duży spadek charakterystyki amplitudowej, a filtry Butterwortha cechują się zależnością spadku 6 dB na oktawę \times rząd filtra n . Dzięki takiemu rzędowi również powinno to pozwolić na uzyskanie dosyć stromych charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych w paśmie przejściowym. Poniżej zamieszczono schemat dotyczący połączeń dla takiego filtra.



Rysunek 4b Finalny schemat filtra dolnoprzepustowego ósmego rzędu



Rysunek 5 Realizacja filtru górnoprzepustowego metodą Sallen-Key

$$\frac{V_0}{V_{IN}} = \frac{Hs^2}{s^2 + s \left[\frac{C_2 + \frac{C_1}{R_2} + (1-H)\frac{C_2}{R_1}}{C_1 C_2} \right] + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (10)$$

Dobierając kondensator C_1 , można wyliczyć, jakie wartości będą mieć pozostałe elementy.

$$k = 2\pi F_0 C_1 \quad (11)$$

$$C_2 = C_1 \quad (12)$$

$$R_1 = \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + (H-1)}}{4k} \quad (13)$$

$$R_2 = \frac{4}{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + (H-1)}} * \frac{1}{k} \quad (14)$$

Transmitancja układu wyraża się następującym wzorem:

Tabela 2 Wartości współczynników dla filtrów Butterwortha [2]

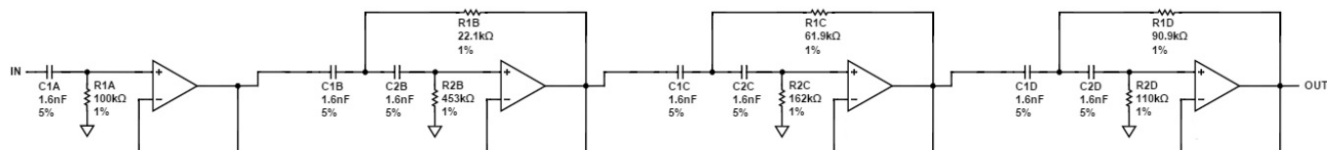
Rząd filtru	Sekcja	Część rzeczywista	Część urojona	F _o	Q	Częstotliwość -3 dB	Częstotliwość szczytowa	Poziom szczytowy
2	1	0,7071	0,7071	1	1,4142	0,7071	1,0000	
3	1	0,5000	0,8668	1	1,0000	1,0000		0,7071
	2	1,0000		1			1,0000	1,2499
4	1	0,9239	0,3827	1	1,8478	0,5412		0,7195
	2	0,3827	0,9239	1	0,7654	1,3065		0,8409
								3,0102
5	1	0,8090	0,5878	1	1,6180	0,6180		0,8588
	2	0,3090	0,9511	1	0,6180	1,6182		0,8995
								4,6163
	3	1,0000		1			1,0000	
6	1	0,9659	0,2588	1	1,9319	0,5176		0,6758
	2	0,7071	0,7071	1	1,4142	0,7071		1,0000
	3	0,2588	0,9659	1	0,5176	1,9319		0,9306
								6,0210
7	1	0,9010	0,4339	1	1,8019	0,5550		0,7449
	2	0,6235	0,7818	1	1,2470	0,8019		0,4717
								0,2204
	3	0,2225	0,9749	1	0,4450	2,2471		0,9492
								7,2530
	4	1,0000		1			1,0000	
8	1	0,9808	0,1951	1	1,9616	0,5098		0,6615
	2	0,8315	0,5556	1	1,6629	0,6013		0,8295
	3	0,5556	0,8315	1	1,1112	0,9000		0,6186
								0,6876
	4	0,1951	0,9808	1	0,3902	2,5628		0,9612
								0,3429
9	1	0,9397	0,3428	1	1,8794	0,5321		0,7026
	2	0,7660	0,6428	1	1,5320	0,6527		0,9172
	3	0,5000	0,8680	1	1,0000	1,0000		0,7071
								1,2493
	4	0,1737	0,9848	1	0,3474	2,8785		0,9694
								9,3165
	5	1,0000		1			1,0000	
10	1	0,9877	0,1564	1	1,9754	0,5062		0,6549
	2	0,8910	0,4540	1	1,7820	0,5612		0,7564
	3	0,7071	0,7071	1	1,4142	0,7071		1,0000
	4	0,4540	0,8910	1	0,9060	1,1013		0,7667
								1,8407
	5	0,1564	0,9877	1	0,3128	3,1970		0,9752
								10,2023

Dzięki Tabeli 2 oraz wcześniejszym wzorom uzyskano schemat filtra górnoprzepustowego przedstawiony na Rysunku 6.

3. WNIOSKI

Dzięki opisanym powyżej metodom zaprojektowano dwa filtry analogowe – górnoprzepustowy oraz dolnoprzepustowy, o częstotliwości granicznej 1 kHz. Wykorzystując opisane metody, uzyskano wysoką wartość tłumienia w paśmie zaporowym oraz brak tłumienia w paśmie przenoszenia.

Charakterystyki tak zaprojektowanych filtrów mają bardzo wąskie pasmo przejściowe, co jest pożądane dla końcowych użytkowników. Realizacja założeń projektowych była możliwa tylko przy pomocy filtrów aktywnych. Zastosowanie filtrów pasywnych spowodowałoby także częściowe tłumienie sygnału w paśmie użytecznym. Aktywne filtry analogowe są zdecydowanie bardziej efektywne od filtrów pasywnych, aczkolwiek do ich działania jest wymagane dodatkowe zasilanie dla wzmacniaczy operacyjnych znajdujących się w filtrze.



Rysunek 6 Finalny schemat filtra górnoprzepustowego siódmego rzędu

BIBLIOGRAFIA

- [1] Sallen-Key Topology, 2015 [Online]. Dostępny: http://en.wikipedia.org/wiki/Sallen%E2%80%93Key_topology
- [2] Chapter 8: Analog Filters [Online]. Dostępny: <http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/43-09/EDCh%20%20filter.pdf>.
- [3] Active Filters, [Online]. Dostępny: <http://www.linkwitzlab.com/filters.htm#3>.
- [4] Izydorczyk J., Filtry analogowe i cyfrowe, Gliwice, Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, 2003.
- [5] Nawrocki W., 6.1. Rodzaje filtrów: filtry Butterwortha, w Elektronika: układy elektroniczne, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2010.
- [6] Nawrocki W., 6.1. Rodzaje filtrów: Filtry Bessela, w Elektronika: układy elektroniczne, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2010.
- [7] Tyma G., 10. Filtry cyfrowe w Teoria sygnałów, Gliwice, Helion, 2006, 279.
- [8] Linkwitz–Riley filter [Online]. Dostępny: https://en.wikipedia.org/wiki/Linkwitz%E2%80%93Riley_filter.