

# Politechnika Wrocławska

## Katedra Teorii Pola, Układów Elektronicznych i Optoelektroniki

### Zespół Układów Elektronicznych

---

## LABORATORIUM UKŁADÓW ELEKTRONICZNYCH

Data: 05.06.2020	Dzień: Piątek		
Grupa: -	Godzina: 8-12		
TEMAT ĆWICZENIA:			
FILTR ŚRODKOWOPRZEPUSTOWY			
DANE PROJEKTOWE:			
$K_u = 4 \frac{V}{V}, Q = 2, f_{sr} = 1 \text{ kHz}$			
Lp.	Nazwisko i Imię		Oceny
1.	Grajoszek Dawid, 249021		

## 1. Cel ćwiczenia

Celem tego zadania laboratoryjnego było zaprojektowanie filtra aktywnego, poznanie jego właściwości oraz pomiar podstawowych jego parametrów.

## 2. Założenia dla zadania

$$K_u = 4 \frac{V}{V}, Q = 2, f_{sr} = 1 \text{ kHz}$$

Zasilanie symetryczne  $\pm 12V$

Wartości niezbędnych komponentów

Zaprojektowanie filtra aktywnego sprowadza się do wyliczenia takich wartości rezystancji

$R_1, R_3, R_5$  oraz  $R_6$  według poniżej określonych wzorów:

Zakładamy  $C = 15 \text{ nF}$

$$C_2 = C_4 = C$$

$$R_1 = \frac{Q}{2\pi f_{sr} C |K_u|} = \frac{2}{2\pi * 10^3 \text{ Hz} * 1.5 * 10^{-8} \text{ F} * 4} = 5307.86 \Omega$$

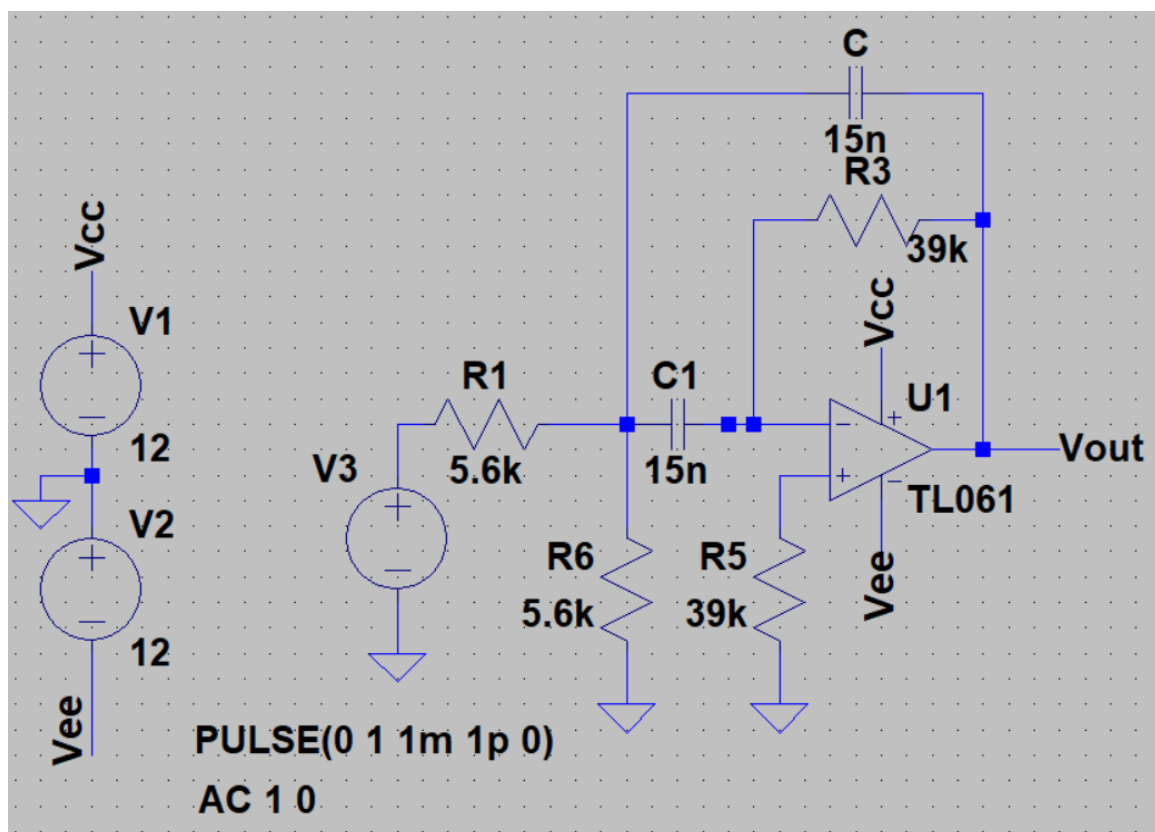
$$R_6 = \frac{Q}{2\pi f_{sr} C (2Q^2 - |K_u|)} = \frac{2}{2\pi * 10^3 \text{ Hz} * 1.5 * 10^{-8} \text{ F} * 4} = 5307.86 \Omega$$

$$R_3 = \frac{Q}{\pi f_{sr} C} = \frac{2}{\pi * 10^3 \text{ Hz} * 1.5 * 10^{-8} \text{ F}} = 42462.84 \Omega$$

Wartości wszystkich potrzebnych rezystorów należy dobrać z szeregu E12, a więc:

$R_1 = R_6 = 5.6 \text{ k}\Omega$ ,  $R_5 = R_3 = 39 \text{ k}\Omega$ , gdzie rezystor  $R_5$  ma na celu zminimalizowanie błędu niezerównoważenia

Schemat wykorzystywanego filtra aktywnego:



A jego transmitancja wyraża się wzorem:

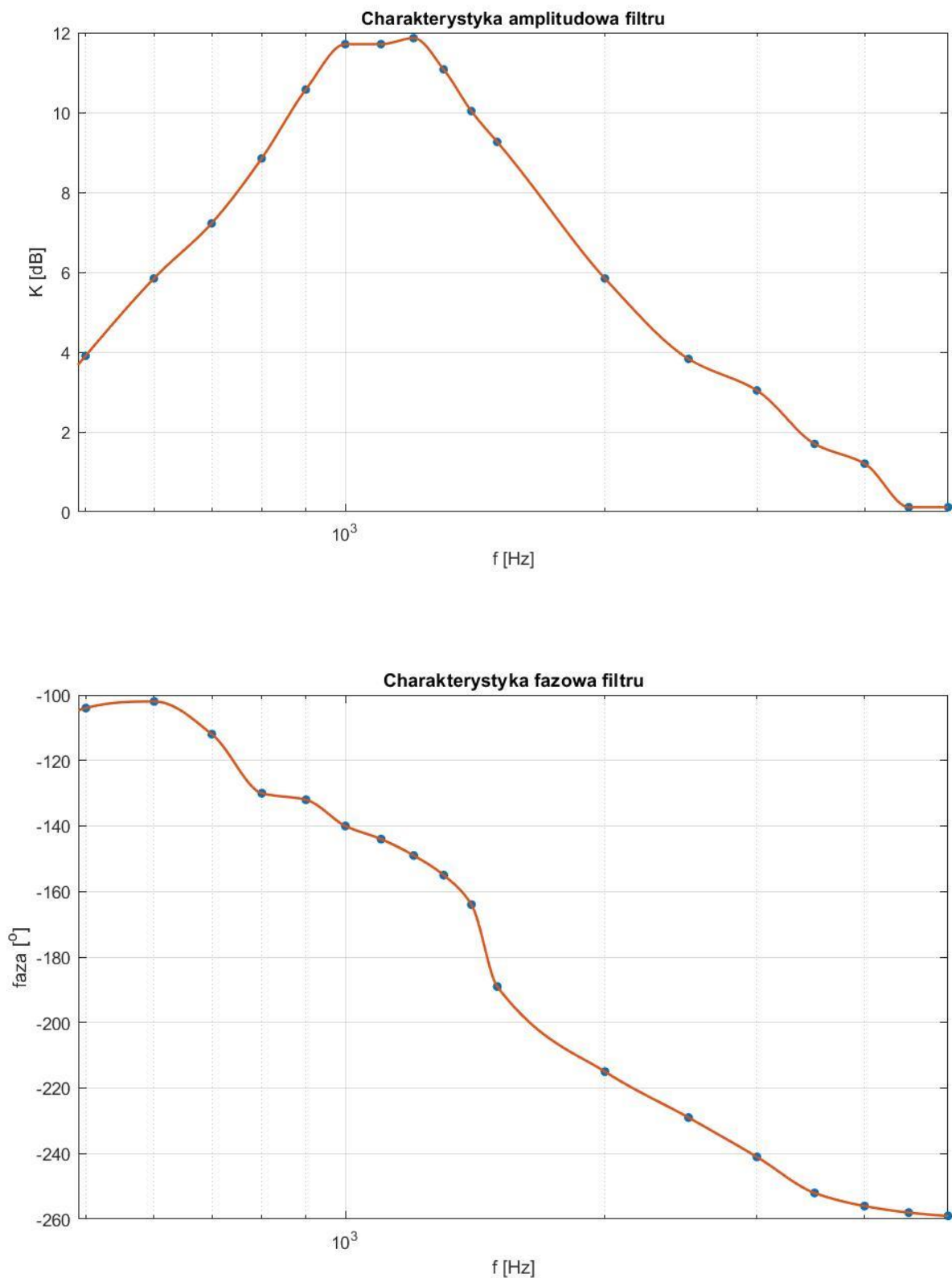
$$H_S = \frac{U_{wy}(s)}{U_{we}(s)} = \frac{-\frac{s}{R_1 C_4}}{s^2 + s\left(\frac{1}{R_3 C_4} + \frac{1}{R_3 C_2}\right) + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_6}}$$

### 3. Pomiar charakterystyk częstotliwościowych filtru

Należało złożyć układ filtru środkowoprzepustowego według schematu powyżej, a następnie zasilić wzmacniacz operacyjny napięciem symetrycznym  $\pm 12V$ . Do wejścia oraz wyjścia układu podłączono sondy oscyloskopu. Na wejście układu podano sygnał sinusoidalny z generatora. Ustawiono stałą amplitudę sygnału wejściowego  $U_{we} = 2.96V$  (pp) obserwowano jaką wartość ma sygnał na wyjściu oraz jego przesunięcie fazowe podczas zmiany częstotliwości sinusoidy. Wyniki pomiarów umieszczono z biorczej tabeli:

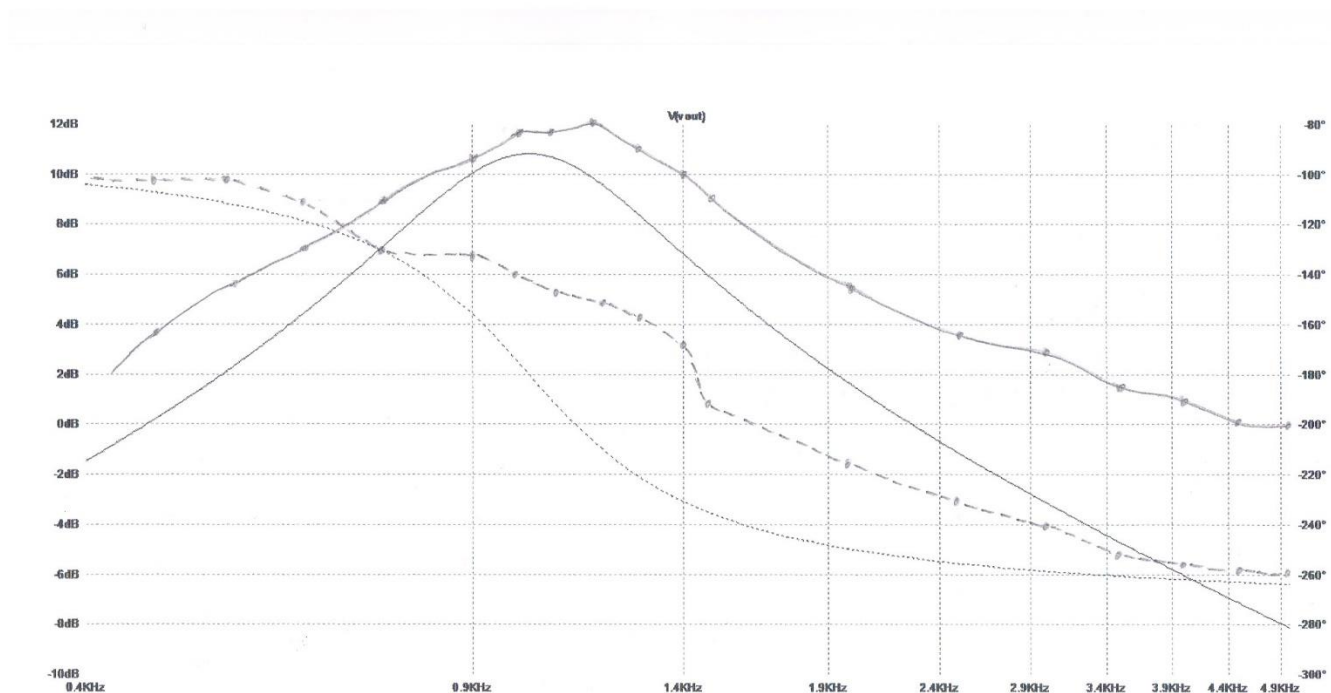
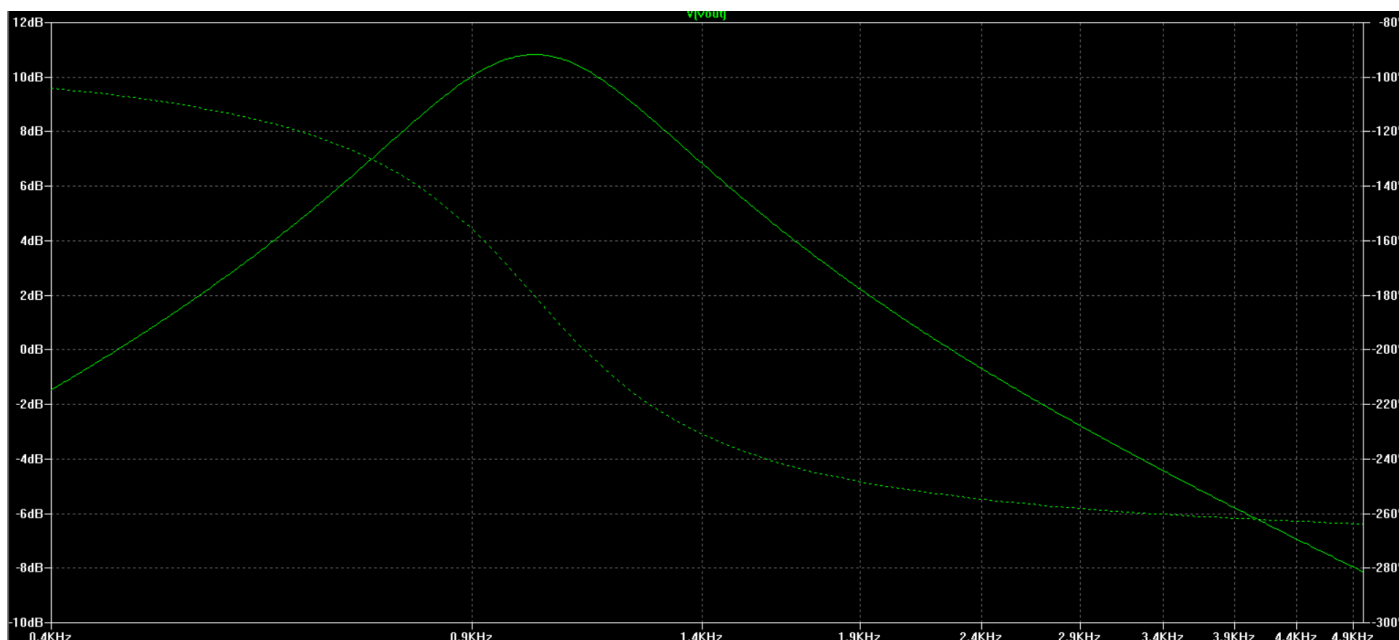
f [Hz]	$U_{wy}$ [V] (pp)	K [dB]	$\phi$ [°]
500	4.64	3.9045	-104
600	5.8	5.8427	-102
700	6.8	7.2243	-112
800	8.2	8.8504	-130
900	10.0	10.5742	-132
1000	11.4	11.7123	-140
1100	11.4	11.7123	-144
1200	11.6	11.8633	-149
1300	10.6	11.0803	-155
1400	9.4	10.0367	-164
1500	8.6	9.2641	-189
2000	5.8	5.8427	-215
2500	4.6	3.8293	-229
3000	4.2	3.0392	-241
3500	3.6	1.7002	-252
4000	3.4	1.2037	-256
4500	3.0	0.1166	-258
5000	3.0	0.1166	-259

Na podstawie powyższych pomiarów wykreślono obie charakterystyki: amplitudową oraz częstotliwościową (w zakresie od 450Hz do 5kHz – skala logarytmiczna):



Na każdym wykresie przeprowadzono interpolację wielomianem 3-go stopnia, aby charakterystyki były bardziej przejrzyste i czytelne.

W celu lepszego porównania wyników z przeprowadzonej symulacji z rzeczywistymi pomiarami amplitudy i przesunięcia fazowego na wykres z programu LTSpice naniesiono punkty pomiarowe:



Jak można zauważyć, są pewne odstępstwa pomiędzy wartościami poszczególnych punktów pomiarowych, niemniej jednak kształt obu wykresów jest zgodny z przewidywaniami teoretycznymi oraz bardzo zbliżony do uzyskanego w wyniku symulacji. Charakterystyka amplitudowa rzeczywistego filtra w okolicy 5 kHz zbliża się do wzmacnienia równego  $1 \frac{V}{V}$ , podczas gdy symulacja wskazywała, iż filtr ten już od około 2 kHz będzie znacząco tłumił sygnał wejściowy.

Z wykresu przedstawiającego charakterystykę amplitudową można odczytać również zakres częstotliwości, czyli pasmo przepustowe zaprojektowanego filtra. Mieści się ono w zakresie (778 – 1319) Hz (wg symulacji).

Na podstawie powyższych wykresów można wnioskować, że układ filtru aktywnego został dobrze złożony oraz działa w sposób poprawny.

Z charakterystyki amplitudowej rzeczywistej oraz tabeli z pomiarami również można odczytać częstotliwość środkową filtru, dla której jego wzmacnienie jest największe. Wynosi ona około 1200 Hz.

Doświadczalne wzmacnienie filtru należy obliczyć jako stosunek amplitud napięcia wyjściowego, które odpowiada częstotliwości środkowej filtru oraz napięcia wejściowego:

$$K_u = \frac{11.6V}{2.96V} = 3.9189 \approx 3.92 \frac{V}{V}$$

Dodatkowo można obliczyć częstotliwości graniczne filtru: dolną i górną. Odpowiadają one punktom, dla których wzmacnienie spada o 3dB, czyli o połowę. Dla napięć wyjściowych będzie to spadek  $\sqrt{2}$  razy.

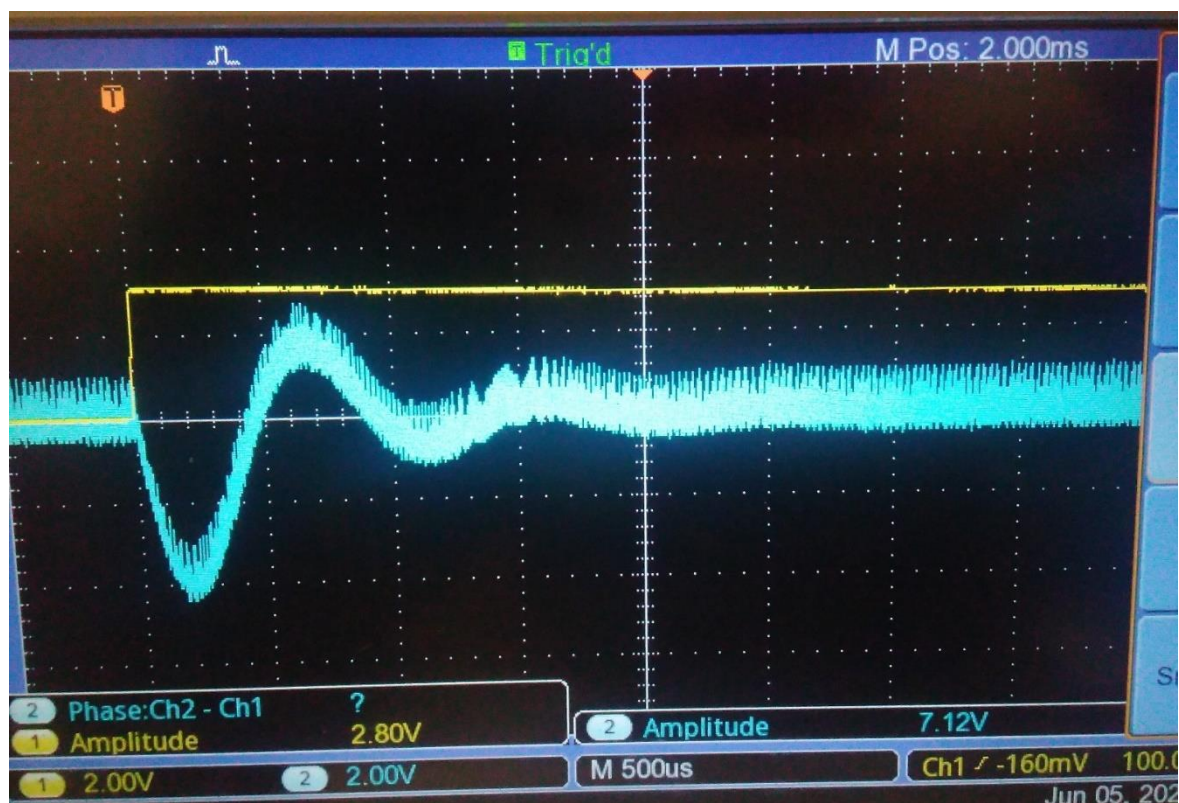
$$U = \frac{11.6V}{\sqrt{2}} = 8.2V$$

Odczytując dane z tabeli, częstotliwości graniczne będą wynosiły odpowiednio około :  $f_d = 800\text{Hz}$ ,  $f_g = 1571.5\text{Hz}$ . Górna częstotliwość graniczna nie miała swojego odpowiednika w dziedzinie napięć wyjściowych, dlatego wykonano pewne przybliżenie, zakładając, że wzmacnienie maleje wprost proporcjonalnie do przyrostu częstotliwości. Przyjęto skalę, że napięcie spada o 0.1V na każde 17.86Hz dla przedziału 8.6V – 5.8V.

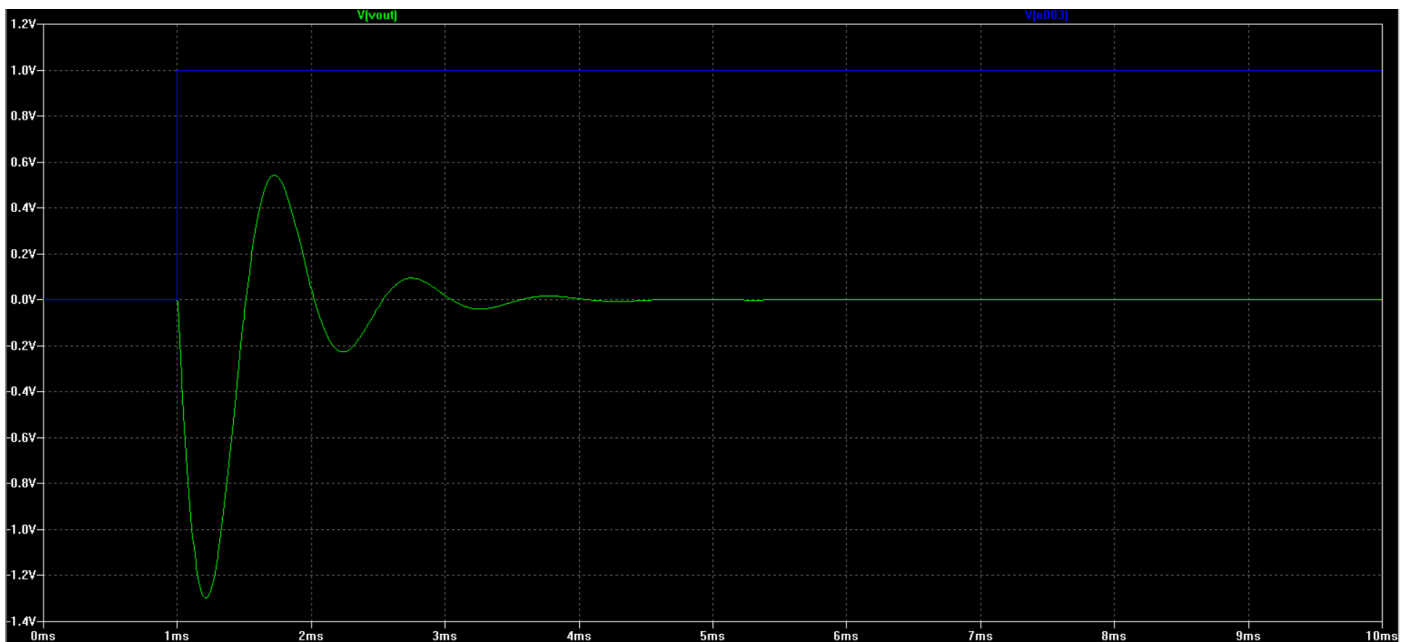
Mając obliczone częstotliwości graniczne, można obliczyć, ile wynosi dobroć użytego filtru, która wyraża się wzorem  $Q = \frac{f_{sr}}{f_g - f_d} = \frac{1200\text{Hz}}{771.5\text{Hz}} = 1.56$ .

## 2. Pomiar odpowiedzi impulsowej filtru

Na wejście filtru aktywnego podane falę prostokątną, której częstotliwość była 10 razy mniejsza od założonej częstotliwości środkowej projektowanego filtru, czyli 100 Hz. Poniżej przedstawiony został wykres z oscyloskopu:



Dla porównania wykres odpowiedzi filtru na pobudzenie skokiem jednostkowym wykonany symulacyjnie:



Niestety wykres na oscyloskopie był w dużym stopniu zaszumiony. Mimo tego kształt ogólny odpowiedzi impulsowej filtru został zachowany, dzięki czemu możliwe było obliczenie kilku wskazanych parametrów. Ponadto oba wykresy mają bardzo zbliżony kształt, co pozwala stwierdzić, iż ta część ćwiczenia również została przeprowadzona poprawnie.

Dobroć filtru na podstawie powyższego wykresu należy obliczyć w następujący sposób, wykorzystując logarytmiczny dekrement tłumienia:

$$\Lambda = \ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)$$

$$\Lambda = \beta T$$

$$Q = \frac{\omega}{2\beta} = \frac{2\pi f T}{2 \ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)} = \frac{\pi}{\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)}$$

gdzie:

$T$  – okres drgań tłumionych,

$\beta$  – współczynnik tłumienia drgań,

$\omega$  – częstość drgań tłumionych,

$A_1, A_2$ , kolejne amplitudy drgań tłumionych.

$$\text{Ostatecznie } Q = \frac{\pi}{\ln\left(\frac{3.6V}{1.2V}\right)} = 2.42$$

Częstotliwość graniczna jest równa stosunkowi liczby pełnych okresów do długości ich trwania:

$$f_{sr} = \frac{1}{0.85ms} = 1.176 \text{ kHz}$$

Do obliczenia obydwu tych wartości przyjęto zaokrąglone wartości odczytane z wykresu z oscyloskopu ze względu na zniekształcenia sygnału wyjściowego.

#### 4. Wnioski

Otrzymane wyniki są bardzo podobne do założeń projektowych oraz symulacji, co pozwala stwierdzić, że zadanie zostało wykonane prawidłowo. Pasma częstotliwości filtra rzeczywistego pokrywa się z tym uzyskanym w drodze symulacji, co pozwala stwierdzić, iż filtr spełnia założenia projektowe.

Obliczone wzmocnienie jest również bardzo bliskie założonego, gdyż błąd względny wynosi jedynie 2%. Podobnie częstotliwość środkowa obliczona z odpowiedzi impulsowej i ta, wyznaczona z charakterystyki amplitudowej, również niewiele się różnią.

Dobroć filtra wyznaczona przy pomocy odpowiednich wartości częstotliwości należących do pasma przepustowego jest nieco mniejsza od założonej wartości równej 2. Natomiast wartość wyznaczana na podstawie odpowiedzi impulsowej z kolei jest od niej większa. Różnice te mogą wynikać z faktu, iż sygnał na wyjściu był lekko zniekształcony, co nie pozwoliło na odczytanie dokładnych wartości, a jedynie ich pewne przybliżenia. Być może wynikało to ze złego przylutowania któregoś z elementów filtra, uszkodzeń przewodów doprowadzających sygnał wejściowy lub też z niedokładności użytych elementów, które obciążone są pewnym błędem. To wszystko mogło mieć również wpływ na wygląd charakterystyk częstotliwościowych, które tylko nieznacznie różnią się od tych, wykonanych dzięki symulacji.

Na podstawie odpowiedzi impulsowej filtra można stwierdzić, że czas, po którym zanikają oscylacje jest w przybliżeniu równy 2ms. Im szybciej gaśnie odpowiedź filtra, tym mniejsza jest jego dobroć.

Dzięki znajomości odpowiedzi impulsowej można przewidzieć jaka będzie odpowiedź filtra na każde inne pobudzenie, ponieważ sygnał wyjściowy jest splotem właśnie odpowiedzi impulsowej i sygnału pobudzającego. Pozwala to również na określenie jakiego typu jest filtr: o skończonej odpowiedzi impulsowej (FIR) czy też nieskończonej (IIR) oraz innych jego cech. Badany filtr jest filtrem FIR, ponieważ po pewnym czasie jego odpowiedź gaśnie do 0. Na sam charakter odpowiedzi impulsowej mają wpływ przede wszystkim: czas stabilizacji (tutaj 2ms), oscylacyjność (czyli stosunek dwóch kolejnych amplitud) czy też czas narastania. Ponadto omawiany filtr środkowo przepustowy jest obiektem stabilnym, gdyż jego odpowiedź impulsowa gaśnie do zera.

#### 5. Raporty z ćwiczeń



# FILTER

$f [Hz]$	$\frac{U_{uy}}{U_{be}}$	$\Delta \varphi [^\circ]$
500	4,64/2,86	-104
1k	11,4/2,86	<del>-10</del> -140
1,5k	8,6/2,86	<del>-109</del> -189
2k	5,8/2,86	-215
600	5,8/2,86	-102
700	6,80/2,86	-112
800	8,20/2,86	-130
800	10,0/2,86	-132
1,1k	11,4/2,86	<del>-144</del> -144
1,2k	11,6/2,86	<del>-148</del> -149
1,3k	10,6/2,86	<del>-151</del> -155
1,4k	9,40/2,86	<del>-152</del> -164
2,5k	4,60/2,86	-229
3k	4,20/2,86	-241
3,5k	3,60/2,86	-252
4k	3,40/2,86	-256
4,5k	3,00/2,86	-258
5k	3,00/2,86	-259

$$t = 500 \mu s/div \quad \Delta U_{be} = \Delta U_{uy} = 2V/div$$

$$\frac{U_{uy}}{U_{be}} = \frac{7,12V}{3,12V}$$

## STABILIZATOR

$$U_{AER} = U_0 = 2,755V (R_0 = \infty), U_i = 19,94V \approx 20V$$

$$U_{sc} = U_y = 0,450V (R_0 = 0), U_i = 9,98V \approx 10V$$

