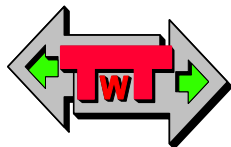
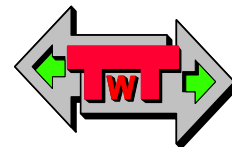


ZESPÓŁ LABORATORIÓW TELEMATYKI TRANSPORTU
ZAKŁAD TELEKOMUNIKACJI W TRANSPORCIE



WYDZIAŁ TRANSPORTU
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ



LABORATORIUM PODSTAW ELEKTRONIKI

INSTRUKCJA DO ĆWICZENIA NR 1

CZWÓRNIKI BIERNE

DO UŻYTKU WEWNĘTRZNEGO

WARSZAWA 2021

A. CEL ĆWICZENIA

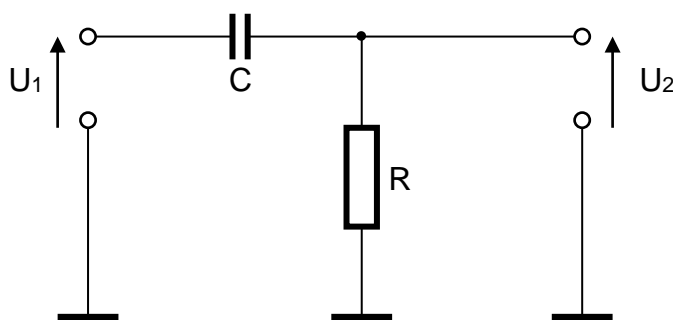
1. Poznanie właściwości podstawowych filtrów **RC** (górnoprzepustowy, dolnoprzepustowy, pasmowy).
2. Dysponując uniwersalnym czwórnikiem RC przeprowadzić syntezę układów dynamicznych:
 - a) funkcje transmitancji,
 - b) charakterystyki amplitudowe w określonym przedziale częstotliwości,
 - c) charakterystyki fazowe w określonym przedziale częstotliwości.
3. Zaobserwować odpowiedzi jednostkowe wybranych układów (całkującego i różniczkowego) sterowane przebiegiem prostokątnym.

B. WPROWADZENIE

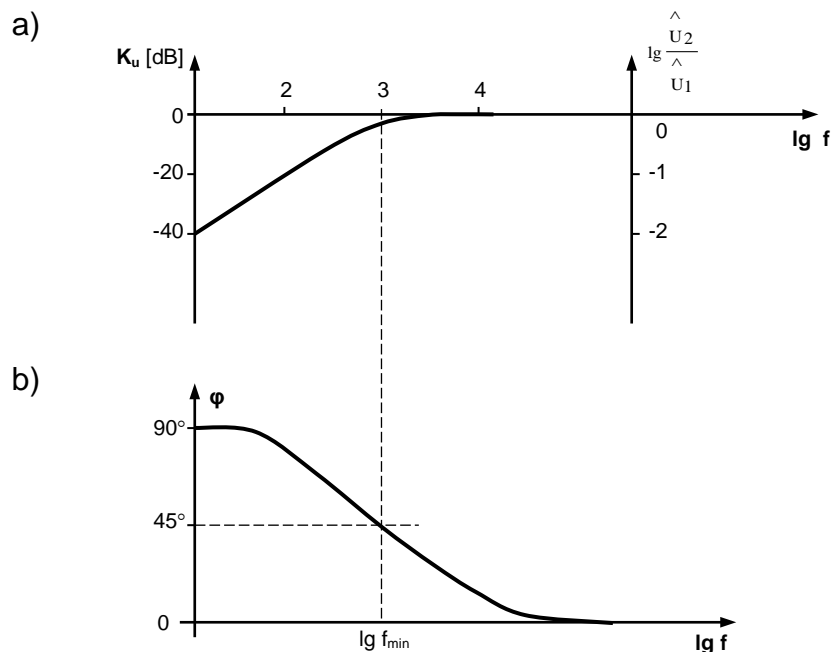
Filtr górnoprzepustowy

Filtr górnoprzepustowy jest układem, który przepuszcza częstotliwości duże, a tłumi częstotliwości małe i wprowadza dla nich przesunięcie fazowe. Najprostszy układ filtra górnoprzepustowego RC podano na rys.1. Charakterystyki częstotliwościowe

wzmocnienia $K_u(f) = \frac{\hat{U}_2}{\hat{U}_1}$ i przesunięcia fazowego $\varphi(f)$ przedstawiono na rys. 2.



Rys. 1. Najprostszy filtr górnoprzepustowy RC



Rys. 2. Wykres Bodego dla filtra górnoprzepustowego:

- a) charakterystyka częstotliwościowa wzmocnienia,
 b) charakterystyka częstotliwościowa przesunięcia fazowego
 Wartości na osi odciętych podane są jako logarytmy częstotliwości ($f_{\min} = 1 \text{ kHz}$)

W celu dokonania analizy charakterystyki częstotliwościowej wzmocnienia i przesunięcia fazowego obliczamy transmitancję filtra. Stosunek napięć w postaci zespolonej jest równy:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{R}{R - \frac{j}{\omega C}}$$

$$\frac{U^2}{U^1} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}} \cdot e^{j\varphi}; \quad \varphi = \arctg \frac{1}{\omega RC} \quad (1)$$

z powyższego otrzymujemy wyrażenie na wartość bezwzględną wzmocnienia

$$k_u = \frac{\hat{U}_2}{\hat{U}_1} = \frac{|U_2|}{|U_1|} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}} \quad (2)$$

Wielkość φ określa przesunięcie fazowe między U_1 i U_2 . Jest ono zawsze dodatnie, tak więc napięcie wyjściowe wyprzedza napięcie wejściowe. W celu obliczenia częstotliwości granicznej korzystamy ze wzoru (2).

$$\frac{\hat{U}_2}{\hat{U}_1} = \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega_{\min}^2 C^2}}}$$

i otrzymujemy

$$\omega_{\min} = 2\pi f_{\min} = \frac{1}{RC}$$

Przesunięcie fazowe przy tej częstotliwości wynosi 45° .

Ponieważ charakterystykę częstotliwościową wzmocnienia podaje się zazwyczaj w skali podwójnie logarytmicznej zbadamy jej przebieg, dla małych częstotliwości, przy tym założeniu. Ze wzoru (2) otrzymamy po logarytmowaniu wyrażenie:

$$\lg k_u = \lg R - \frac{1}{2} \lg \left(R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2} \right)$$

Dla małych częstotliwości, tj. dla $\lg \omega \rightarrow -\infty$, będzie:

$$\begin{aligned} \lg k_u &= \lg R - \frac{1}{2} \lg \frac{1}{\omega^2 C^2} \\ \lg k_u &= \lg \omega RC = \lg \frac{\omega}{\omega_{\min}} = \lg \frac{f}{f_{\min}} \\ \lg k_u &= \lg f - \lg f_{\min} \end{aligned} \tag{3}$$

W skali podwójnie logarytmicznej otrzymamy więc asymptotę o nachyleniu

$$m = \frac{d \cdot \lg k_u}{d \cdot \lg f} = 1$$

Asymptota ta przechodzi przez punkt o współrzędnych $(\lg f_{\min}; 0)$.

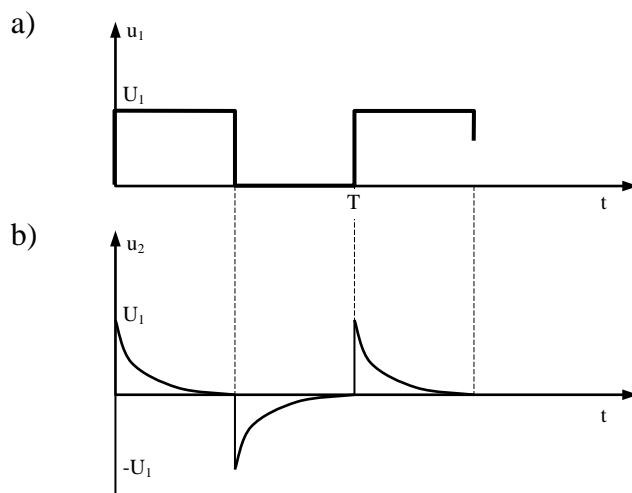
W elektronice przyjęto posługiwać się wielkością proporcjonalną do $\lg k_u$

$$K_u = 20 \lg k_u \quad [\text{dB}]$$

Skoro opisano już sposób działania filtra górnoprzepustowego dla napięć sinusoidalnych, zbadać należy teraz zachowanie się filtra przy doprowadzeniu do wejścia napięcia o kształcie prostokątnym. Na rys.3 pokazano przebieg napięcia wejściowego

$$u_1 = \begin{cases} 0 & \text{dla } t < 0, \quad \frac{T}{2} < t < T \\ U_1 & \text{dla } 0 < t < \frac{T}{2} \end{cases}$$

oraz napięcia wyjściowego przy $T > RC$.



Rys. 3. Odpowiedź filtra górnoprzepustowego na wymuszenie skokowe przy $T > RC$.

a) napięcie wejściowe, b) napięcie wyjściowe

Przebieg napięcia wyjściowego określamy stosując prawo Kirchhoffa, w wyniku tego otrzymujemy:

Przy warunku początkowym $u_2(t=0) = U_1$ będzie

$$u_2 = U_1 e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{dla } 0 < t < \frac{T}{2}$$

Dla następnego przedziału czasowego otrzymuje się odpowiednio

$$u_2 = -U_1 e^{-\frac{t-T/2}{RC}} \quad \text{dla } \frac{T}{2} < t < T$$

W celu scharakteryzowania, jak szybko zmienia się napięcie wyjściowe, wprowadza się pojęcie stałej czasowej obwodu. Jest to czas, po którym napięcie wyjściowe osiąga wartość e razy mniejszą od maksymalnej. Jest zatem:

$$u_2 = \frac{1}{e} U_1 = U_1 e^{-\frac{t}{RC}}$$

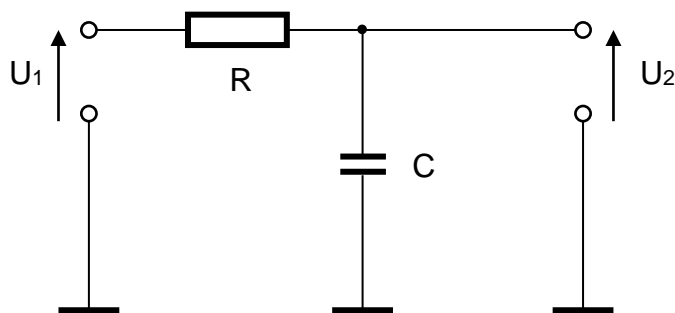
Wynika stąd, że $\tau = RC$

Jeżeli $\tau \ll T$, to napięcie wyjściowe będzie prawie równe wejściowemu. Ponieważ przez kondensator nie płynie prąd stały, to wartość średnia napięcia wyjściowego będzie równa zero. Nie są więc przenoszone składowe stałe napięcia wejściowego.

Jeżeli $u_2 \ll u_1$, to przez kondensator płynie prąd $i = Cu_1$. Dla napięcia wyjściowego obowiązuje wtedy zależność $u_2 = RCu_1$. Układ zachowuje się jak obwód różniczkujący.

Filtr dolnoprzepustowy

Filtr dolnoprzepustowy jest układem, który „przepuszcza” częstotliwości małe, a tłumi częstotliwości duże i wprowadza dla nich przesunięcie fazowe. Najprostszy układ filtra dolnoprzepustowego RC podano na rys.4.



Rys. 4. Najprostszy filtr dolnoprzepustowy RC

Charakterystyki częstotliwościowe wzmocnienia i przesunięcia fazowego otrzymujemy rozważając dzielnik napięć

$$k_u = \frac{U_2}{U_1} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega RC} \quad (4)$$

stąd otrzymujemy

$$|k_u| = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}} \quad \text{i} \quad \varphi = -\arctan \omega RC \quad (5)$$

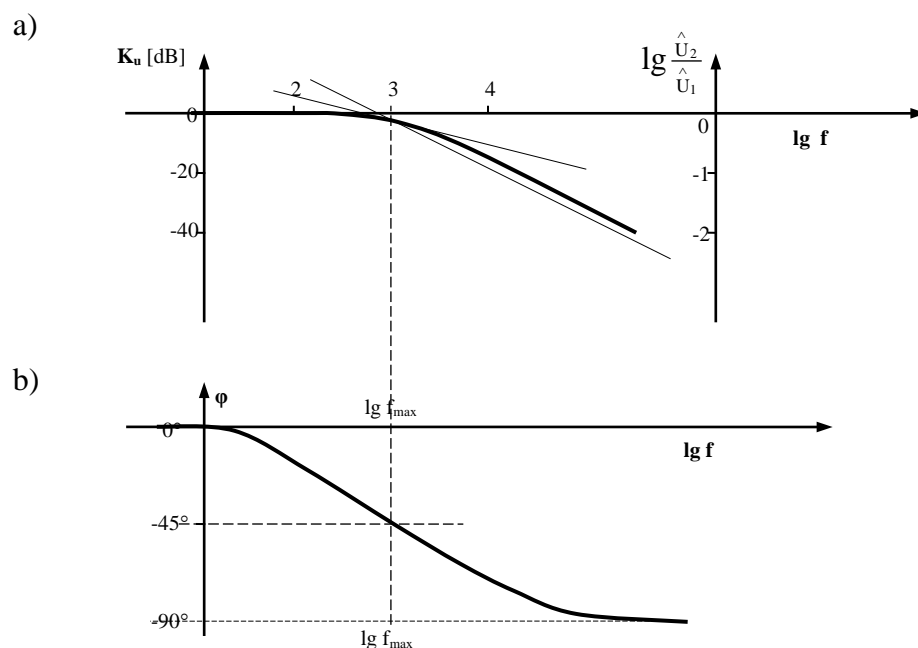
Na górną częstotliwość graniczną otrzymujemy wzór

$$f_{\max} = \frac{1}{2\pi RC}$$

Dla częstotliwości dużych $f \gg f_{\max}$ będzie $|k_u| = \frac{1}{\omega RC}$; wzmocnienie jest w tym zakresie odwrotnie proporcjonalne do częstotliwości. Znając f_{\max} można zbudować charakterystykę częstotliwościową wzmocnienia, szczególnie łatwo w skali podwójnie logarytmicznej. Ze wzoru (5) otrzymamy w taki sam sposób jak dla filtra górnoprzepustowego, następujące zasady konstrukcji charakterystyki:

- 1) Dla małych częstotliwości $f < f_{\max}$ asymptotą jest zero, ponieważ $\lg \frac{\hat{U}_2}{\hat{U}_1} = 0$
- 2) Dla dużych częstotliwości $f > f_{\max}$ stosunek $\frac{\hat{U}_2}{\hat{U}_1}$ maleje o połowę przy dwukrotnym zwiększeniu częstotliwości. Odpowiada to spadkowi wzmocnienia 6 dB na oktawę lub 20 dB na dekadę. Asymptotą jest prosta o tym nachyleniu przechodząca przez punkt o współrzędnych $(\lg f_{\max}; 0)$.
- 3) Prosta o nachyleniu -10dB na dekadę, przechodząca przez punkt o współrzędnych $(\lg f_{\max}; -3\text{dB})$ jest styczna do charakterystyki częstotliwościowej wzmocnienia.

Przesunięcie fazowe w filtrze dolnoprzepustowym jest ujemne. Powyższe rozumowanie przedstawiono na rys.5.



Rys. 5. Wykres Bodego dla filtra dolnoprzepustowego:

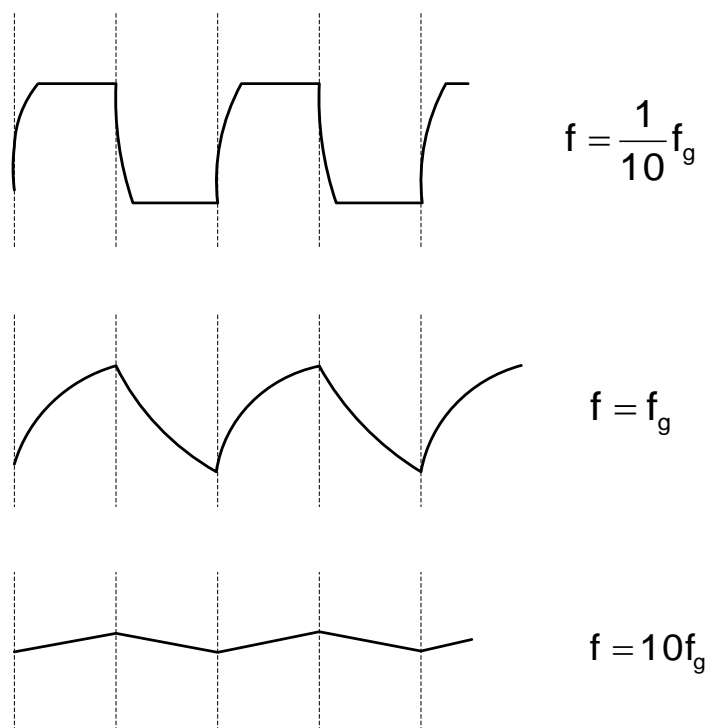
- a) charakterystyka częstotliwościowa wzmocnienia,
- b) charakterystyka częstotliwościowa przesunięcia fazowego

Na rys.6 podano odpowiedzi filtra dolnoprzepustowego na wymuszenie impulsami prostokątnymi o różnych częstotliwościach. Narastanie i opadanie krzywej odbywa się tu także wg funkcji e ze stałą czasową $\tau = RC$.

Można wyróżnić trzy charakterystyczne zakresy częstotliwości:

- 1) Dla $f \ll f_{\min}$ napięcie $u_2 = u_1$.
- 2) Dla $f \approx f_{\max}$ napięcie u_2 jest kombinacją liniową przeniesionej oraz scałkowanej wielkości u_1 .
- 3) Dla $f \gg f_{\max}$ obowiązuje zależność $u_2 = \frac{1}{RC} \int u_1 dt$

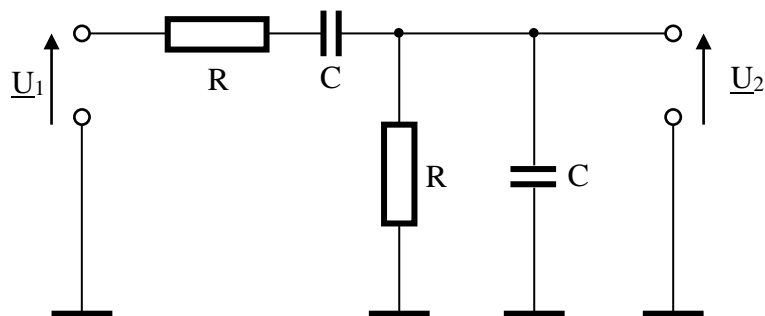
W tym zakresie częstotliwości układ zachowuje się jak obwód całkujący.



Rys. 6. Odpowiedzi filtra dolnoprzepustowego na wymuszenie impulsami prostokątnymi o różnej częstotliwości

Filtr pasmowy

Przy szeregowym połączeniu filtra dolnoprzepustowego i górnoprzepustowego otrzymuje się filtr pasmowy. Napięcie wyjściowe filtra pasmowego jest równe zero dla dużych i małych częstotliwości. Rys. 7 przedstawia układ filtra pasmowego.



Rys. 7. Filtr pasmowy

$$\text{Częstotliwość rezonansowa } f_0 = \frac{1}{2\pi RC}.$$

Obliczamy teraz wartość napięcia wyjściowego i przesunięcie fazowe przy średnich częstotliwościach. Dla nieobciążonego dzielnika mamy następującą zależność w zapisie zespolonym

$$U_2 = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C} \cdot \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C + R + \frac{1}{j\omega C}} U_1$$

stąd

$$U_2 = \frac{j\omega RC}{(j\omega RC)^2 + j\omega RC} U_1 \quad (6)$$

Dla uproszczenia rachunku wprowadzimy oznaczenia

$$RC = \frac{1}{\omega_0} \quad \text{i} \quad \frac{\omega}{\omega_0} = \Omega$$

Ponieważ $\omega RC = \Omega$ otrzymujemy

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{(j\Omega + 1)^2 + j\Omega}{j\Omega} = 3 + j \frac{\Omega^2 - 1}{\Omega}$$

$$\left| \frac{U_1}{U_2} \right|^2 = \frac{\hat{U}_1^2}{\hat{U}_2^2} = 9 + \frac{(\Omega^2 - 1)^2}{\Omega^2} \quad (7)$$

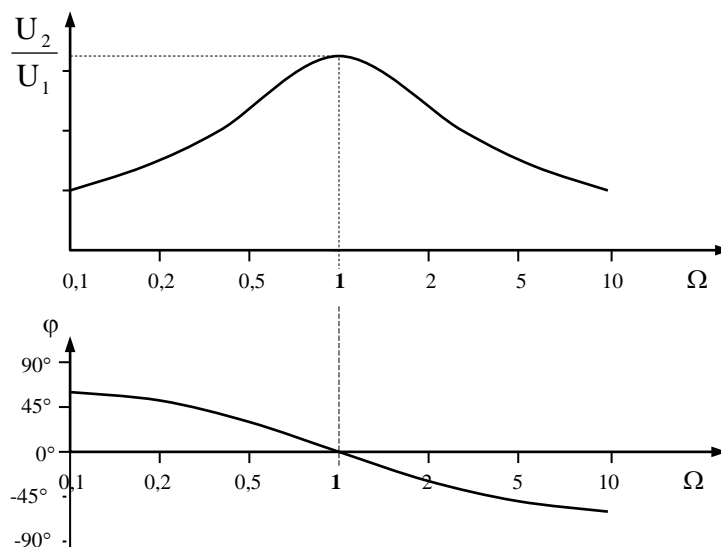
Napięcie wyjściowe ma maksymalną wartość dla $\Omega = 1$, tj. dla $\omega = \omega_0 = \frac{1}{RC}$.

Dla częstotliwości rezonansowej mamy $\hat{U}_2 = \frac{1}{3} \hat{U}_1$, a przesunięcie fazy jest równe zero.

Przesunięcie fazowe obliczamy z zależności (7) otrzymując:

$$\text{tg}(-\varphi) = \frac{\Omega^2 - 1}{3 - \Omega}; \quad \varphi = \text{arc tg} \frac{1 - \Omega^2}{3\Omega}$$

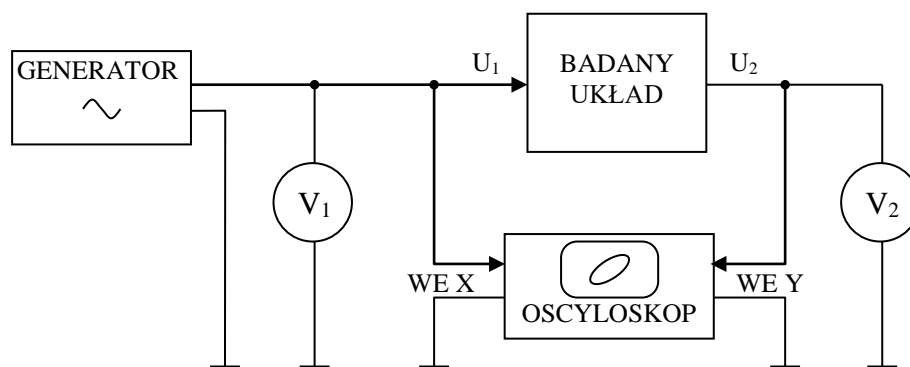
Charakterystyki, częstotliwościowa i fazowa są przedstawione na rys.8.



Rys. 8. Charakterystyki częstotliwościowe filtra pasmowego.

- a) wzmocnienie,
- b) przesunięcie fazowe

C. CZĘŚĆ EKSPERYMENTALNA



Rys. 9. Schemat stanowiska do pomiaru charakterystyk częstotliwościowych

1. Pomiaru charakterystyki amplitudowej dokonuje się odczytując wskazania woltomierza V_2 dołączonego do wyjścia badanego filtra RC zmieniając częstotliwość generatora sinusoidalnego z wybranego zbioru F . Sygnał wejściowy z tego generatora należy utrzymywać na stałym poziomie.

Transmitancję układu oblicza się wg równania (8)

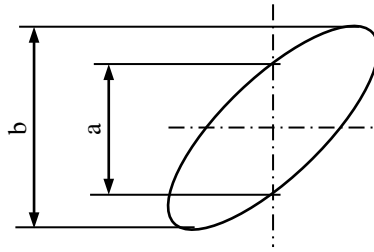
$$k_u(f) = 20 \lg \frac{U_2}{U_1} \text{ [dB]} \quad (8)$$

2. Pomiaru charakterystyki fazowej dokonuje się przez określenie przesunięcia fazowego pomiędzy $U_1 = \text{const.}$ a U_2 . W układzie pomiarowym (rys. 9) wykorzystuje się do pomiaru przesunięcia fazowego metodę oscyloskopową.

Bardzo popularną metodą pomiaru kąta fazowego jest pomiar parametrów elipsy utworzonej na ekranie przez sterowanie jednym przebiegiem toru X, a drugim toru Y oscyloskopu. Kąt fazowy oblicza się za pomocą tablic funkcji sinus ze wzoru (9).

$$\varphi = \arcsin \frac{a}{b} \quad (9)$$

Interpretację graficzną przedstawia rys. 10.



Rys. 10. Pomiar kąta fazowego za pomocą elipsy

Wyniki pomiarów z punktów 1 i 2 zapisać w tabeli pomiarowej.

$U_1 = \text{const.}$

Tabela pomiarowa

f [Hz]																	
U_2 [V]																	
a																	
b																	
φ																	

3. Dokonać pomiarów charakterystyki amplitudowej i fazowej dla filtra dolnoprzepustowego w następujących konfiguracjach parametrów:

a) $R = 0,1 \text{ M}\Omega$ $C = 47 \text{ nF}$

$R = 47 \text{ k}\Omega$ $C = 47 \text{ nF}$

$R = 20 \text{ k}\Omega$ $C = 47 \text{ nF}$

$R = 10 \text{ k}\Omega$ $C = 47 \text{ nF}$

b) $R = 20 \text{ k}\Omega$ $C = 10 \text{ nF}$

$R = 20 \text{ k}\Omega$ $C = 47 \text{ nF}$

$R = 20 \text{ k}\Omega$ $C = 0,1 \text{ }\mu\text{F}$

$R = 20 \text{ k}\Omega$ $C = C_1$

- c) $R = 10 \text{ k}\Omega$ $C = 10 \text{ nF}$
 $R = 10 \text{ k}\Omega$ $C = 47 \text{ nF}$
 $R = 10 \text{ k}\Omega$ $C = 0,1 \text{ }\mu\text{F}$
 $R = 10 \text{ k}\Omega$ $C = C_2$

- Na wspólnym wykresie narysować przebiegi:

$$K_u = f(\lg f)$$

$$\Phi = f(\lg f)$$

odpowiednio dla punktu a, b i c.

- Na podstawie dokonanych pomiarów wyznaczyć (z zależności 5) wartość C_1 i C_2 dla co drugiej pomierzonej wartości częstotliwości i obliczyć wartości średnie C_1 i C_2 .
- Jak wpływa zmiana wartości: odpowiednio R i C na zachowanie się filtra ?

4. Dokonać pomiarów charakterystyki amplitudowej i fazowej dla filtra górnoprzepustowego w następujących konfiguracjach parametrów:

- a) $C = 47 \text{ nF}$ $R = 20 \text{ k}\Omega$
 $C = 47 \text{ nF}$ $R = 10 \text{ k}\Omega$
 $C = 47 \text{ nF}$ $R = R_1$
- b) $C = 10 \text{ nF}$ $R = 0,1 \text{ M}\Omega$
 $C = 10 \text{ nF}$ $R = 20 \text{ k}\Omega$
 $C = 10 \text{ nF}$ $R = 10 \text{ k}\Omega$
 $C = 10 \text{ nF}$ $R = R_2$
- c) $C = 10 \text{ nF}$ $R = 10 \text{ k}\Omega$
 $C = 47 \text{ nF}$ $R = 10 \text{ k}\Omega$
 $C = 0,1 \text{ }\mu\text{F}$ $R = 10 \text{ k}\Omega$
 $C = C_2$ $R = 10 \text{ k}\Omega$

- d) $C = 10 \text{ nF}$ $R = 20 \text{ k}\Omega$
 $C = 47 \text{ nF}$ $R = 20 \text{ k}\Omega$
 $C = 0,1 \text{ }\mu\text{F}$ $R = 20 \text{ k}\Omega$
 $C = C_1$ $R = 20 \text{ k}\Omega$

- Na wspólnym wykresie narysować przebiegi:

$$k_u = f(\lg f)$$

$$\Phi = f(\lg f)$$

odpowiednio dla punktu a, b, c i d.

- Na podstawie dokonanych pomiarów wyznaczyć (z zależności 1) wartości C_1 i C_2 oraz R_1 i R_2 dla co drugiej pomierzonej wartości częstotliwości i obliczyć ich wartości średnie.
- Jak wpływa zmiana wartości: odpowiednio R i C na zachowanie się filtra ?
- Porównać otrzymane wartości C_1 i C_2 wyznaczone odpowiednio dla filtra dolnoprzepustowego i górnoprzepustowego.

5. Dokonać pomiarów charakterystyk częstotliwościowych dla filtra pasmowego w następujących konfiguracjach parametrów:

- | | |
|-----------------------------|-----------------------------|
| a) $R = 47 \text{ k}\Omega$ | b) $R = 47 \text{ k}\Omega$ |
| $C = 47 \text{ nF}$ | $C = 10 \text{ nF}$ |
| c) $R = 10 \text{ k}\Omega$ | d) $R = 10 \text{ k}\Omega$ |
| $C = 47 \text{ nF}$ | $C = 10 \text{ nF}$ |

- Na wspólnym wykresie narysować przebiegi:

$$U_2/U_1 = f(\Omega)$$

$$\Phi = f(\Omega)$$

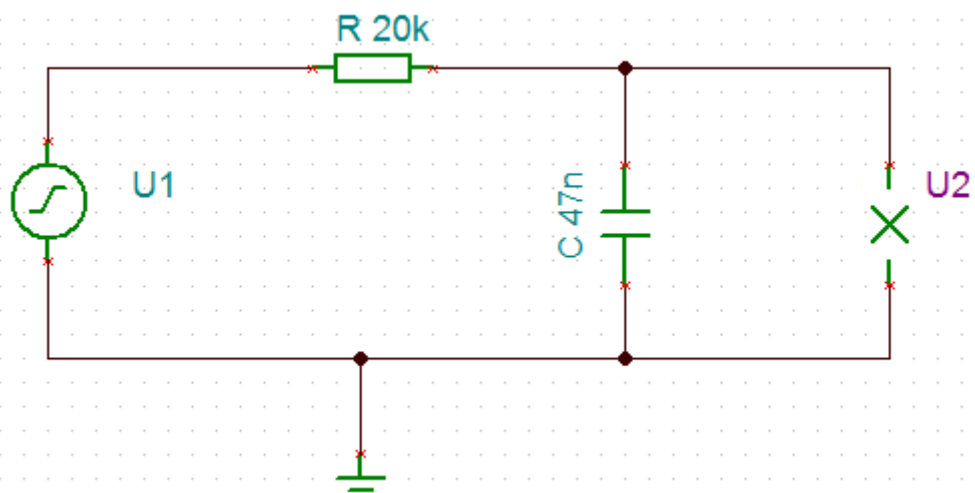
odpowiednio dla punktów : (a+b), (c+d), (a+c), (b+d).

- Jak wpływa zmiana wartości: odpowiednio R i C na zachowanie się filtra ?

D. Symulacyjna komputerowa

- Filtr dolnoprzepustowy RC

Używając programu komputerowego podanego przez prowadzącego należy wykonać układ przedstawiony na rys. 11.



Rys. 11. Układ do badania filtra dolnoprzepustowego RC

Należy dokonać pomiarów charakterystyk:

- amplitudowej $k_u = f(f)$ dla $U_1 = \text{const.}$
- fazowej $\varphi = f(f)$ dla $U_1 = \text{const.}$

dla wartości R i C podanych w punkcie C.3.

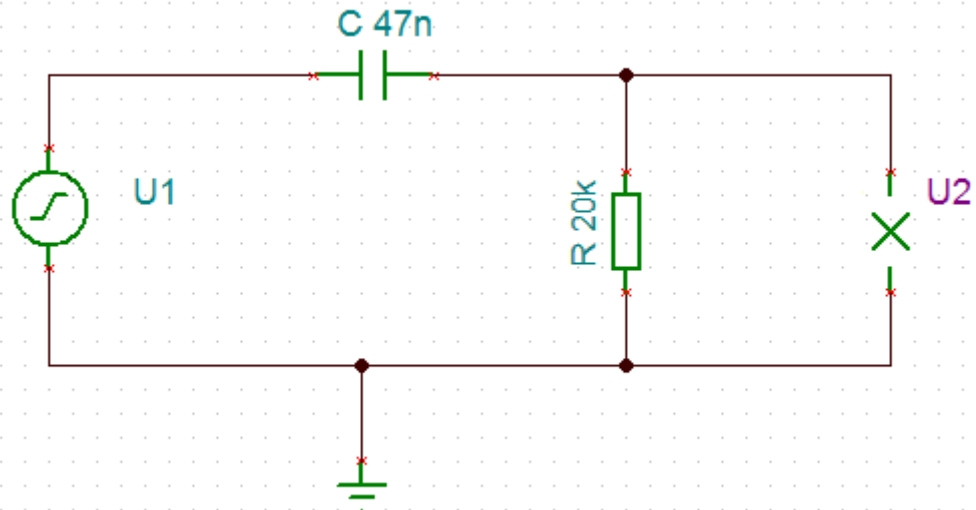
Częstotliwość sygnału sinusoidalnego zmieniać w zakresie od 20Hz do 1MHz.

Narysować otrzymane charakterystyki stosując skalę logarytmiczną dla osi częstotliwości.

Jak wpływa zmiana wartości: odpowiednio R i C na zachowanie się filtra?

- Filtr górnoprzepustowy RC

Używając programu komputerowego podanego przez prowadzącego należy wykonać układ przedstawiony na rys. 12.



Rys. 12. Układ do badania filtru górnoprzepustowego RC

Należy dokonać pomiarów charakterystyk:

- amplitudowej $k_u = f(f)$ dla $U_1 = \text{const.}$
- fazowej $\varphi = f(f)$ dla $U_1 = \text{const.}$

dla wartości R i C podanych w punkcie C.4.

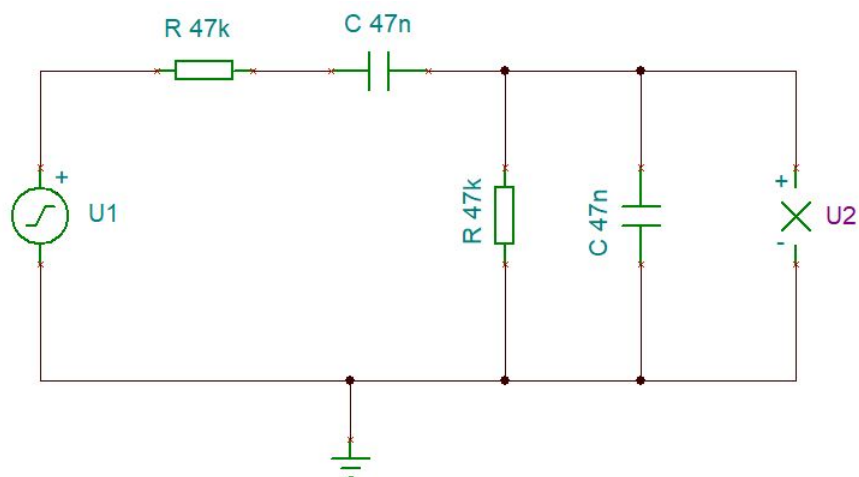
Częstotliwość sygnału sinusoidalnego zmieniać w zakresie od 20Hz do 1MHz.

Narysować otrzymane charakterystyki stosując skalę logarymiczną dla osi częstotliwości.

Jak wpływa zmiana wartości: odpowiednio R i C na zachowanie się filtra?

- Filtr pasmowy RC

Używając programu komputerowego podanego przez prowadzącego należy wykonać układ przedstawiony na rys. 13.



Rys. 13. Układ do badania filtru pasmowego RC

Należy dokonać pomiarów charakterystyk:

- amplitudowej $k_u = f(f)$ dla $U_1 = \text{const.}$
- fazowej $\varphi = f(f)$ dla $U_1 = \text{const.}$

dla wartości R i C podanych w punkcie C.5 dla filtra pasmowego.

Częstotliwość sygnału sinusoidalnego zmieniać w zakresie od 10Hz do 1MHz.

Narysować otrzymane charakterystyki stosując skalę logarytmiczną dla osi częstotliwości.

Jak wpływa zmiana wartości: odpowiednio R_1 i R_2 oraz C_1 i C_2 na zachowanie się filtra?

E. Wyposażenie

Elementy układu:

Rezystor R = 0,1 M Ω	szt. 1
Rezystor R = 47 Ω	szt. 2
Rezystor R = 20 k Ω	szt. 1
Rezystor R = 10 k Ω	szt. 2
Rezystor $R_1 = \dots$ k Ω (wartość do obliczenia przez studenta).....	szt. 1
Rezystor $R_2 = \dots$ k Ω (wartość do obliczenia przez studenta).....	szt. 1
Kondensator C = 0,1 μ F	szt. 1
Kondensator C = 47 nF.....	szt. 2
Kondensator C = 10 nF.....	szt. 2
Kondensator $C_1 = \dots$ F (wartość do obliczenia przez studenta).....	szt. 1
Kondensator $C_2 = \dots$ F (wartość do obliczenia przez studenta).....	szt. 1

Sprzęt pomiarowy:

Cyfrowy miernik uniwersalny	szt. 2
Oscyloskop dwukanałowy.....	szt. 1

Źródło zasilania:

Generator funkcyjny.....	szt. 1
--------------------------	--------

Akcesoria:

Płyta montażowa	szt. 1
Komplet przewodów	szt. 1

Komputer wraz z oprogramowaniem do symulacji elementów i układów elektronicznych analogowych i cyfrowych

F. Zagadnienia do przygotowania

1. Narysować schemat ideowy, charakterystyki częstotliwościowe i przesunięcia fazowego dla filtra dolnoprzepustowego.
2. Narysować schemat ideowy, charakterystyki częstotliwościowe i przesunięcia fazowego dla filtra górnoprzepustowego.

3. Narysować schemat ideowy, charakterystyki częstotliwościowe i przesunięcia fazowego dla filtra środkowoprzepustowego.
4. Zdefiniować pojęcie transmitancji i podać wyrażenia określające transmitancje filtrów dolnoprzepustowego, górnoprzepustowego i środkowoprzepustowego.
5. Narysować przebieg odpowiedzi filtra dolnoprzepustowego na wejściowy przebieg prostokątny. Uzasadnić kształt przebiegu wyjściowego. Jaką funkcję matematyczną ten układ realizuje?
6. Narysować przebieg odpowiedzi filtra górnoprzepustowego na wejściowy przebieg prostokątny. Uzasadnić kształt przebiegu wyjściowego. Jaką funkcję matematyczną ten układ realizuje?

G. Literatura

1. Dobrowolski A., Jachna Z., Majda E., Wierzbowski M.: „Elektronika - ależ to bardzo proste!”. Wydawnictwo BTC, 2013.
2. Horowitz P., Hill W.: „Sztuka elektroniki. Tom I i II”. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2013.
3. Rosiński A., Dudek E., Krzykowska K., Kasprzyk Z., Stawowy M., Szmigiel A.: Podstawy elektroniki. Laboratorium, 2019, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, ISBN 978-83-7814-991-0, 155 s.
4. Rosiński A., Dudek E., Krzykowska K., Kasprzyk Z., Stawowy M., Szmigiel A.: Elektronika. Laboratorium, 2019, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, ISBN 978-83-7814-992-7, 181 s.
5. Tietze U., Schenk C.: „Układy półprzewodnikowe”. Wydawnictwa Naukowo Techniczne, 2009.
6. Wawrzyński W.: „Podstawy współczesnej elektroniki”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2003.

Tabele pomiarowe

$U_1 = \text{const.} = \dots\dots\dots [\text{V}]$

f [Hz]																
U ₂ [V]																
a																
b																
φ																

dla R = $\dots\dots\dots$ [...Ω], C = $\dots\dots\dots$ [...F]

$U_1 = \text{const.} = \dots\dots\dots [\text{V}]$

f [Hz]																
U ₂ [V]																
a																
b																
φ																

dla R = $\dots\dots\dots$ [...Ω], C = $\dots\dots\dots$ [...F]

$U_1 = \text{const.} = \dots\dots\dots [\text{V}]$

f [Hz]																
U ₂ [V]																
a																
b																
φ																

dla R = $\dots\dots\dots$ [...Ω], C = $\dots\dots\dots$ [...F]

$U_1 = \text{const.} = \dots\dots\dots [\text{V}]$

f [Hz]																	
U_2 [V]																	
a																	
b																	
φ																	

dla $R = \dots\dots\dots [\dots \Omega]$, $C = \dots\dots\dots [\dots \text{F}]$

$U_1 = \text{const.} = \dots\dots\dots [\text{V}]$

f [Hz]																	
U_2 [V]																	
a																	
b																	
φ																	

dla $R = \dots\dots\dots [\dots \Omega]$, $C = \dots\dots\dots [\dots \text{F}]$

$U_1 = \text{const.} = \dots\dots\dots [\text{V}]$

f [Hz]																	
U_2 [V]																	
a																	
b																	
φ																	

dla $R = \dots\dots\dots [\dots \Omega]$, $C = \dots\dots\dots [\dots \text{F}]$

$U_1 = \text{const.} = \dots\dots\dots [\text{V}]$

f [Hz]																
U_2 [V]																
a																
b																
φ																

dla $R = \dots\dots\dots [\dots \Omega]$, $C = \dots\dots\dots [\dots \text{F}]$

$U_1 = \text{const.} = \dots\dots\dots [\text{V}]$

f [Hz]																
U_2 [V]																
a																
b																
φ																

dla $R = \dots\dots\dots [\dots \Omega]$, $C = \dots\dots\dots [\dots \text{F}]$