



**Politechnika Wrocławska**

**Instytut Telekomunikacji, Teleinformatyki i Akustyki**

**Zakład Układów Elektronicznych**

*Instrukcja do ćwiczenia laboratoryjnego*

## **FILTRY AKTYWNE**

## 1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest praktyczne poznanie podstawowych filtrów aktywnych, metod ich projektowania oraz pomiaru ich podstawowych parametrów.

## 2. Opis badanych układów

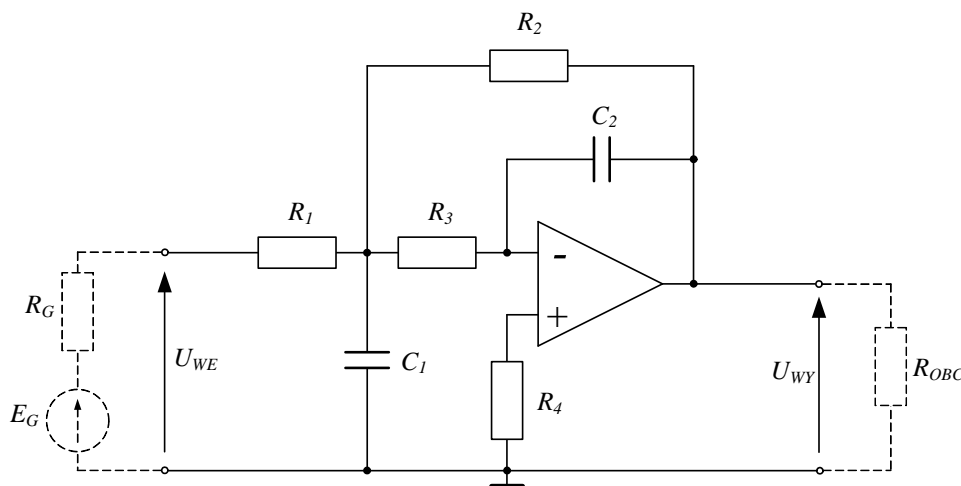
W ćwiczeniu proponuje się badanie właściwości układów filtrów II rzędu z wielokrotną pętlą sprzężenia zwrotnego. W tej strukturze filtrów można realizować filtry dolno-, górno- i środkowoprzepustowe. W kolejnych podpunktach omówiono ich struktury.

### 2.1. Filtr dolnoprzepustowy

Transmitancja filtru dolnoprzepustowego II rzędu z rys.1 ma postać:

$$H_D = \frac{U_{WY}(s)}{U_{WE}(s)} = \frac{\frac{K_u}{R_2 R_3 C_1 C_2}}{s^2 + \frac{s}{C_1} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) + \frac{1}{R_2 R_3 C_1 C_2}}, \quad (1)$$

gdzie:  $K_u = -\frac{R_2}{R_1}$  – wzmacnienie.



Rys.1. Filtr dolnoprzepustowy II rzędu z wielokrotną pętlą sprzężenia zwrotnego

Wyznaczenie parametrów filtru dolnoprzepustowego dla zadanych:  $\alpha, f_{gran}, C_1, C_2, (C_1 > C_2)$ :

$$|K_u| = \frac{C_1 \alpha^2}{4C_2} - 1, \quad (2)$$

$$R_2 = \frac{\alpha}{4\pi f_{char} C_2}, \quad (3)$$

$$R_1 = \frac{R_2}{|K_u|}, \quad (4)$$

$$R_3 = \frac{\alpha}{4\pi f_{char} C_2 (|K_u| + 1)}, \quad (5)$$

$$R_4 = R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad , \quad (6)$$

$$f_{char} = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_2 R_3 C_1 C_2}} \quad , \quad (7)$$

gdzie:  $\alpha$  – współczynnik tłumienia filtru (tabela 1),

$f_{gran}$  – częstotliwość graniczna tj. częstotliwość przy 3dB spadku wzmacnienia,

$f_{char}$  – częstotliwość charakterystyczna filtru tj. częstotliwość przy której przesunięcie fazy równe jest  $90^\circ$ ,

$R_4$  – rezystor stosowany w celu zminimalizowania błędu niezrównoważenia.

Tabela 1. Typy filtrów drugiego rzędu i ich współczynniki

| Typ filtru       | Współczynnik tłumienia<br>$\alpha$ | Współczynnik korekcyjny<br>$k_p$ |
|------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| Bessela          | 1,732                              | 0,786                            |
| Butterwortha     | 1,414                              | 1                                |
| Czebyszewa 0,5dB | 1,158                              | 1,158                            |
| Czebyszewa 1dB   | 1,054                              | 1,240                            |
| Czebyszewa 2dB   | 0,886                              | 1,333                            |
| Czebyszewa 3dB   | 0,766                              | 1,389                            |

Częstotliwość graniczna jedynie dla filtru Butterwortha pokrywa się z częstotliwością charakterystyczną. Podczas projektowania pozostałych typów filtrów zachodzi konieczność pomnożenia częstotliwości charakterystycznej przez odpowiedni współczynnik korekcyjny  $k_p$ .

$$f_{gran} = f_{char} k_p \quad . \quad (8)$$

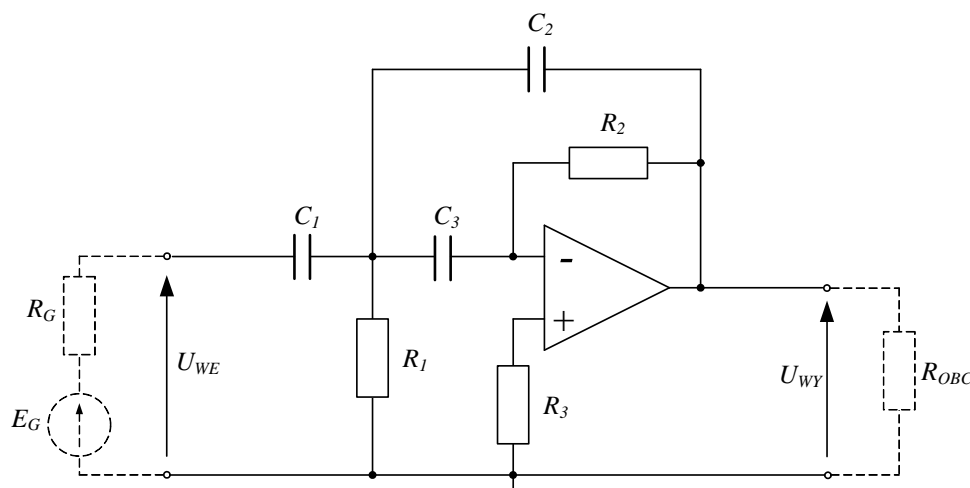
Wartości współczynników dla danych typów filtrów umieszczono w tabeli 1.

## 2.2. Filtr górnoprzepustowy

Transmitancja filtru górnoprzepustowego II rzędu z rys.2 ma postać:

$$H_G = \frac{U_{wy}(s)}{U_{we}(s)} = \frac{K_u s^2}{s^2 + \frac{s}{R_2} \left( \frac{C_1}{C_2 C_3} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right) + \frac{1}{R_1 R_2 C_2 C_3}} \quad , \quad (9)$$

gdzie:  $K_u = -\frac{C_1}{C_2}$  – wzmacnienie.



Rys.2. Filtr górnoprzepustowy II rzędu z wielokrotną pętlą sprzężenia zwrotnego

Wyznaczenie parametrów filtra górnoprzepustowego dla zadanych:  $\alpha, f_{gran}, C_1, C_2, C_3, (C_1 = C_3)$ :

$$|K_u| = \frac{C_1}{C_2} \quad , \quad (10)$$

$$R_1 = \frac{\alpha}{2\pi f_{char} C_1 \left(2 + \frac{1}{|K_u|}\right)} \quad , \quad (11)$$

$$R_2 = \frac{(1 + 2|K_u|)}{2\pi f_{char} \alpha C_1} \quad , \quad (12)$$

$$C_3 = \frac{1}{4\pi^2 R_1 R_2 C_2 f_{char}^2} \quad , \quad (13)$$

$$f_{char} = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 R_2 C_2 C_3}} \quad , \quad (14)$$

gdzie:  $R_3$  – rezystor stosowany w celu zminimalizowania błędu niezrównoważenia (w przybliżeniu równy  $R_2$ ).

Częstotliwość graniczna jedynie dla filtra Butterwortha pokrywa się z częstotliwością charakterystyczną. Podczas projektowania pozostałych typów filtrów zachodzi konieczność podzielenia częstotliwości charakterystycznej przez odpowiedni współczynnik korekcyjny  $k_p$ .

$$f_{gran} = \frac{f_{char}}{k_p} \quad . \quad (15)$$

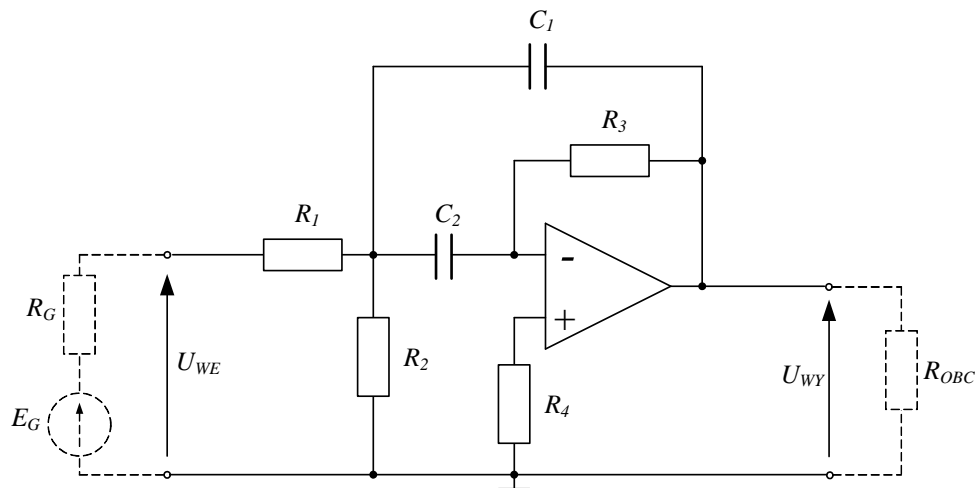
Wartości współczynników dla danych typów filtrów umieszczono w tabeli 1.

### 2.3. Filtr środkowoprzepustowy

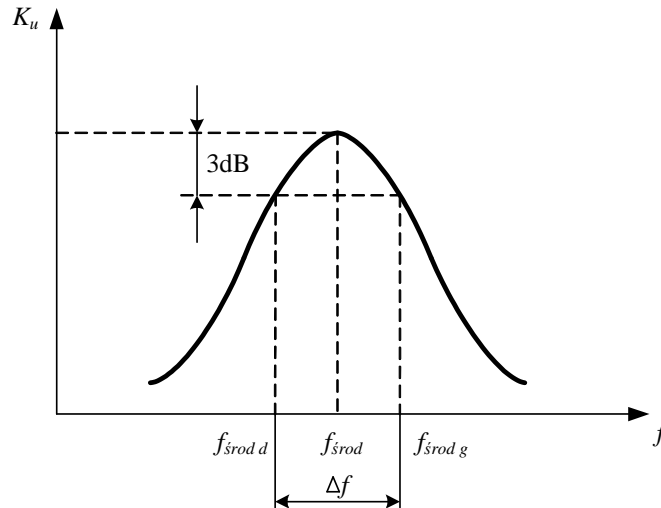
Transmitancja filtra środkowoprzepustowego II rzędu z rys.3 ma postać:

$$H_s = \frac{U_{wy}(s)}{U_{we}(s)} = \frac{-\frac{s}{R_1 C_1}}{s^2 + s \left( \frac{1}{R_3 C_1} + \frac{1}{R_3 C_2} \right) + \frac{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}{R_3 C_1 C_2}} \quad , \quad (16)$$

a)



b)



Rys.3. Filtr środkowoprzepustowy II rzędu z wielokrotną pętlą sprzężenia zwrotnego: a) realizacja filtru, b) charakterystyka filtru

Wartości elementów filtru środkowoprzepustowego dla zadanych  $f_{\text{środ}}$ ,  $K_u$ ,  $Q$ :

$$|K_u| = \frac{R_3}{2R_1} \quad , \quad (17)$$

$$C_1 = C_2 = C \quad , \quad (18)$$

$$C = \frac{Q}{2\pi f_{\text{środ}} R_1 |K_u|} \quad , \quad (19)$$

$$R_2 = \frac{Q}{2\pi f_{\text{środ}} C (2Q^2 - |K_u|)} \quad , \quad (20)$$

$$R_3 = \frac{Q}{\pi f_{\text{nom}} C} \quad , \quad (21)$$

$$Q = \frac{f_{\text{środ}}}{\Delta f} = \frac{f_{\text{środ}}}{f_{\text{środ g}} - f_{\text{środ d}}} \quad , \quad (22)$$

$$f_{\text{środ}} = \frac{1}{2\pi C} \sqrt{\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 R_3}} \quad , \quad (23)$$

gdzie:  $R_4$  – rezystor stosowany w celu zminimalizowania błędu niezrównoważenia (w przybliżeniu równy  $R_3$ ).

### 3. Przygotowanie do ćwiczenia

Przed realizacją ćwiczenia, studenci otrzymują od prowadzącego zajęcia zadanie projektowe. W zadaniu określony jest typ filtra oraz jego parametry. Student dopuszczony będzie do ćwiczenia na podstawie znajomości zagadnień teoretycznych (kartkówka) oraz pod warunkiem przygotowania projektu i szablonu sprawozdania według poniższych podpunktów.

**3.1.** Projekt powinien zawierać (szablon na stronie <http://qe.ita.pwr.wroc.pl/~zue/>):

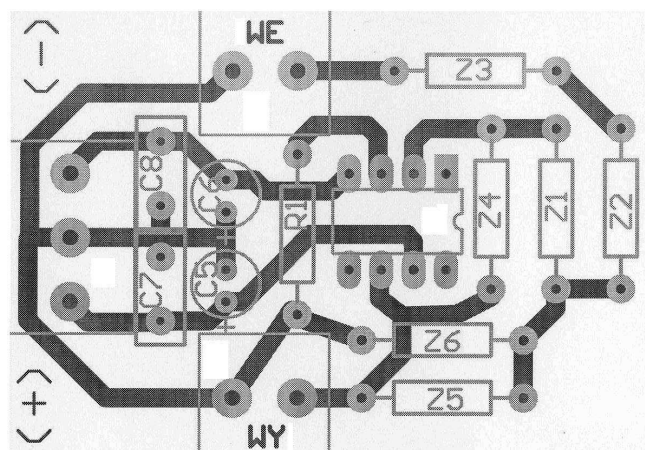
- 1) obliczenia filtra aktywnego II rzędu z wielokrotnym sprzężeniem zwrotnym. Należy pamiętać o doborze wartości elementów biernych ze znormalizowanych szeregów wartości – rezystory dobierać z szeregu 5 %-ego, kondensatory z wartości dostępnych w laboratorium (1n, 1n5, 3n3, 4n7, 6n8, 10n, 15n, 22n, 100nF),
- 2) wykreślenie teoretycznej charakterystyki amplitudowej i fazowej projektowanego filtra w skali lin-log (przebiegi wykreślić np. w programie PSpice). Wartość wzmocnienia napięciowego nanosić w decybelach,
- 3) narysowanie przewidywanej odpowiedzi na skok jednostkowy układu,
- 4) naszkicowanie rozmieszczenia elementów filtra na uniwersalnej płycie drukowanej (rys.4),

**3.2.** Szablon sprawozdania (sprawozdanie powinno zawierać 9 stron):

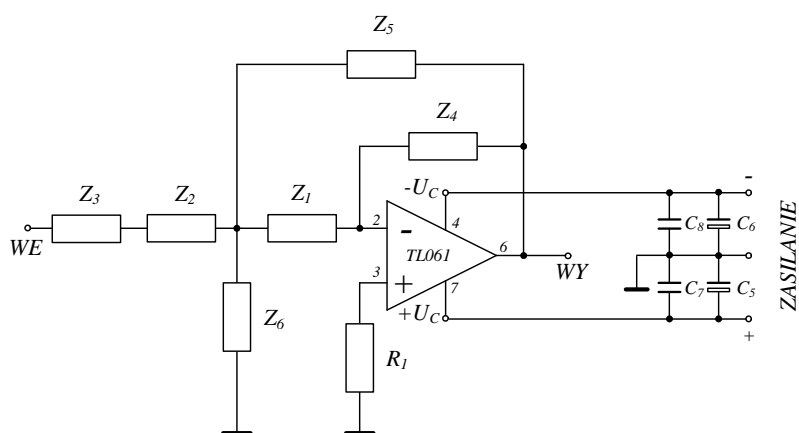
- 1) strona tytułowa (szablon na stronie <http://qe.ita.pwr.wroc.pl/~zue/>),
- 2) schemat układu filtra z naniesionymi wartościami elementów przyjętych w projekcie i wolnym miejscem przeznaczonym na wpisanie ich rzeczywistych wartości mierzonych na stanowisku laboratoryjnym,
- 3) tabela na wyniki pomiarów charakterystyki  $U_{WY} = f(U_{WE})$ ,
- 4) siatka w skali liniowo liniowej na wykres  $U_{WY} = f(U_{WE})$ ,
- 5) tabela na wyniki pomiarów charakterystyki amplitudowej i fazowej  $U_{WY} = f(f)$ ,
- 6) wykres z teoretyczną charakterystyką amplitudową filtra w skali lin-log na którą nanoszona będzie rzeczywista charakterystyka, mierzona na stanowisku,
- 7) wykres z teoretyczną charakterystyką fazową filtra w skali lin-log na którą nanoszona będzie rzeczywista charakterystyka, mierzona na stanowisku,
- 8) rysunek z odpowiedzią jednostkową filtra przewidzianą przy projektowaniu, na który naniesiona będzie rzeczywista odpowiedź zaobserwowana w czasie ćwiczeń,
- 9) wolna strona na wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

**Sprawozdanie powinno być wykonane w czasie zajęć laboratoryjnych  
i oddane bezpośrednio po ich zakończeniu.**

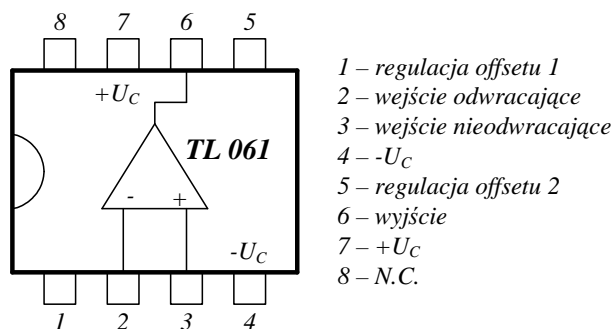
a)



b)



c)



Rys.4. Uniwersalna płytką drukowaną: a) widok płytki z rozmieszczeniem elementów, b) schemat ideowy układu, c) wzmacniacz operacyjny TL061 – wyprowadzenie pinów; kondensatory C5-C8 służą odprężaniu zasilania i wraz z układem TL 061 są wlutowane na płytce

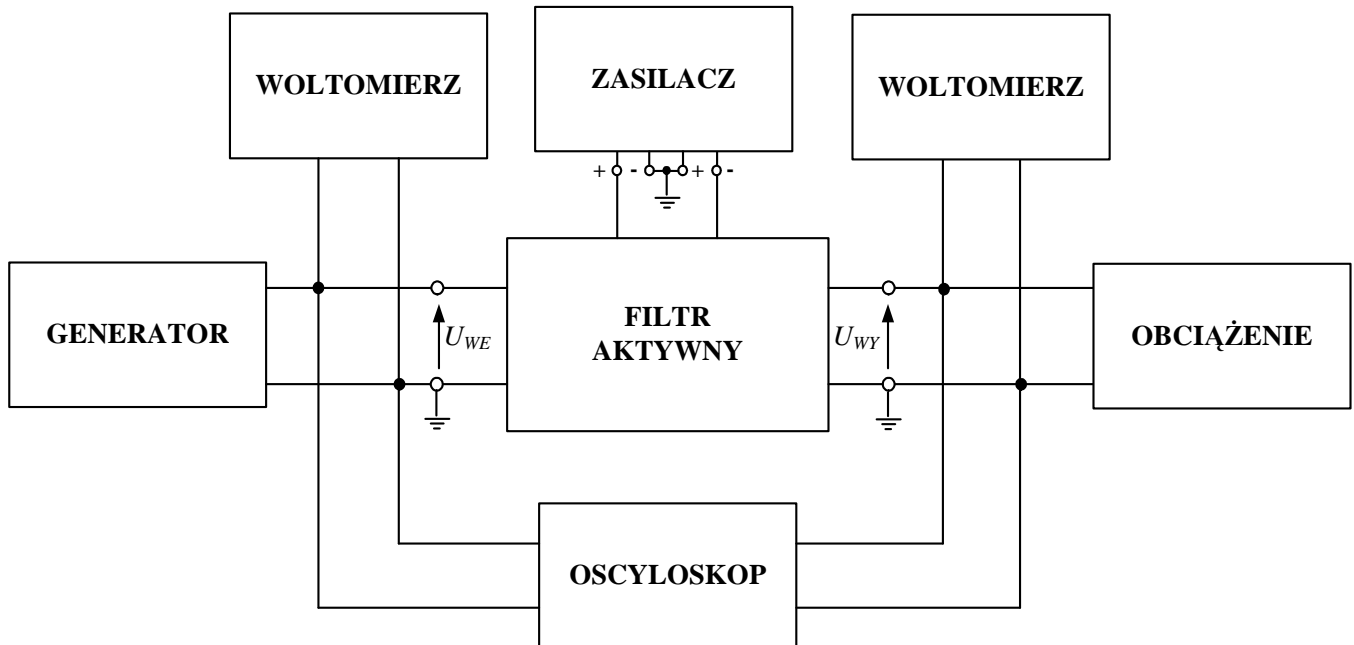
#### 4. Montaż układu

- 1) mając na uwadze, że każdy element bierny wykonany jest z pewną dokładnością, przed przystąpieniem do składania układu filtru, należy za pomocą miernika (dostępnego na stanowisku) zmierzyć rzeczywiste wartości używanych elementów,
- 2) zmierzone rzeczywiste wartości elementów nanieść na przygotowany schemat układu,
- 3) rozmieścić elementy na uniwersalnej płytce montażowej i przystąpić do składania filtru.

## 5. Program ćwiczenia

### 5.1. Pomiar zależności $U_{WY} = f(U_{WE})$

- 1) złożyć układ pomiarowy według schematu z rys.5,
- 2) napięcie generatora zmieniać od 0 V aż do wartości, przy której mierzona charakterystyka staje się nieliniowa, pomiary wykonać dla kilku zadanych przez prowadzącego częstotliwości,
- 3) dla badanych częstotliwości sporządzić na wspólnym rysunku wykresy  $U_{WY} = f(U_{WE})$ .



Rys.5. Schemat blokowy układu do pomiaru  $U_{WY} = f(U_{WE})$  przy  $f = \text{const}$  i do pomiaru  $U_{WY} = f(f)$  przy  $U_{WE} = \text{const}$

### 5.2. Pomiary charakterystyk amplitudowych i fazowych

- 1) w układzie z rys.5, przy stałej amplitudzie sygnału wejściowego  $U_{WE}$  tak dobranej by filtr pracował liniowo, zmieniać częstotliwość generatora w zakresie ustalonym z prowadzącym ćwiczenie. Odczytywać wartość napięcia wyjściowego oraz przesunięcie fazowe pomiędzy sygnałami wyjściowym a wejściowym (metoda oscyloskopowa – Dodatek A).
- 2) na przygotowanych do ćwiczenia rysunkach z teoretycznymi charakterystykami amplitudową i fazową filtra nanieść jego pomiarowe charakterystyki,
- 3) na podstawie wykonanych pomiarów określić:
  - częstotliwości graniczne filtra,
  - współczynnik tłumienia (dobroć filtra  $Q$ ),
  - wzmacnienie filtra,
  - rodzaj charakterystyki filtra.

### 5.3. Pomiar odpowiedzi impulsowej

- 1) na wejście filtra podać falę prostokątną o częstotliwości powtarzania kilkakrotnie niższej od częstotliwości granicznej filtra (w przypadku filtra pasmowego podać falę prostokątną o częstotliwości równej częstotliwości środkowej),
- 2) na przygotowany wykres nanieść przebiegi napięcia wejściowego i wyjściowego,
- 3) wyznaczyć następujące parametry przebiegów: czas narastania, opadania i ustalania.



## 6. Uwagi odnośnie sprawozdania

Wszystkie zmierzone parametry filtru należy porównać z parametrami wyznaczonymi analitycznie lub założonymi podczas projektowania układu. W sprawozdaniu należy także porównać rzeczywiste charakterystyki filtru otrzymane z pomiarów z charakterystykami uzyskanymi na drodze symulacji. We wnioskach należy przeprowadzić dyskusję różnic pomiędzy uzyskanymi wynikami rzeczywistymi i teoretycznymi, podejmując próbę wyjaśnienia powodów powstawania tych różnic.

**Sprawozdanie należy oddać bezpośrednio po wykonaniu ćwiczenia.**

## 7. Literatura

- [1] Golde W., Śliwa L., *Wzmacniacze operacyjne i ich zastosowania, cz.1, Podstawy teoretyczne*, Warszawa, WNT, 1982.
- [2] Guziński A., *Liniowe elektroniczne układy analogowe*, Warszawa, WNT, 1993.
- [3] Kulka Z., Nadachowski M., *Wzmacniacze operacyjne i ich zastosowania, cz.2, Realizacje praktyczne*, Warszawa, WNT, 1982.
- [4] Kuta S., *Elementy i układy elektroniczne, cz.1*, Kraków, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, 2001.
- [5] Prałat A., *Laboratorium układów elektronicznych, cz.2*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2001.

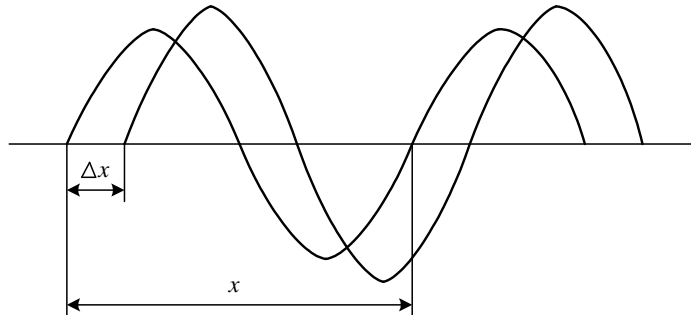
## DODATEK A

### Pomiar przesunięcia fazowego metoda oscyloskopową

Pomiar przesunięcia fazowego pomiędzy dwoma sygnałami najprościej wykonać na ekranie oscyloskopu. Podczas pomiaru należy pamiętać, że osie zerowe obu przebiegów muszą się pokrywać jak pokazano na rys.A.1. Wówczas przesunięcie pomiędzy przebiegami obliczamy:

$$\varphi = 360^\circ \frac{\Delta x}{x}, \quad (\text{A.1})$$

gdzie:  $\Delta x$ ,  $x$  - odstępów odczytywane z ekranu oscyloskopu rys.A.1

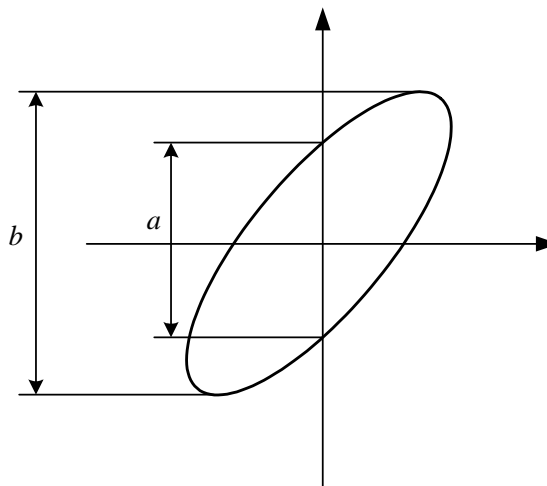


Rys.A.1. Idea pomiaru przesunięcia fazowego w trybie pracy dwukanałowej oscyloskopu

Przesunięcie to można również zmierzyć przy wykorzystaniu krzywej Lissajous uzyskanej na ekranie oscyloskopu pracującego w trybie X-Y (rys.A.2). Przesunięcie fazowe pomiędzy przebiegami obliczamy ze wzoru:

$$\varphi = \arcsin \frac{a}{b}, \quad (\text{A.2})$$

gdzie:  $a$ ,  $b$  - odstępów odczytywane z ekranu oscyloskopu rys.A.2



Rys.A.2. Idea pomiaru przesunięcia fazowego w trybie pracy X-Y oscyloskopu