

# Podstawowe zastosowania wzmacniaczy operacyjnych - układ różniczkujący

## 1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest praktyczne poznanie układów ze wzmacniaczami operacyjnymi stosowanych do liniowego przekształcania sygnałów. Zakres ćwiczenia obejmuje projektowanie i pomiary podstawowych parametrów układu różniczkującego.

Na montaż i pomiary układu przeznaczono trzy godziny lekcyjne (135minut).

**UWAGA: Szacowany czas przygotowania do zajęć wynosi od 3 do 6 godzin.**

## 2. Opis badanego układu

W ćwiczeniu bada się właściwości układu różniczkującego. Układ ten, zbudowany z wykorzystaniem wzmacniacza operacyjnego, omówiono w kolejnych podpunktach.

### 2.1. Układ różniczkujący

Układ różniczkujący realizuje funkcję:

$$U_{WY\ teoret}(t) = k \frac{dU_{WE}(t)}{dt} \quad (1)$$

Schemat podstawowego układu różniczkującego pokazano na Rys. 1. Analizując układ w dziedzinie czasu można zapisać, że prąd  $I_R = \frac{U_{WY}(t)}{R}$ , natomiast prąd  $I_{WE} = C \frac{dU_{WE}(t)}{dt}$ .

Ponieważ (I prawo Kirchhoffa):

$$I_{WE} + I_C = 0, \quad (2)$$

$$I_{WE} + I_C = C \frac{dU_{WE}(t)}{dt} + \frac{U_{WY}(t)}{R} = 0, \quad (3)$$

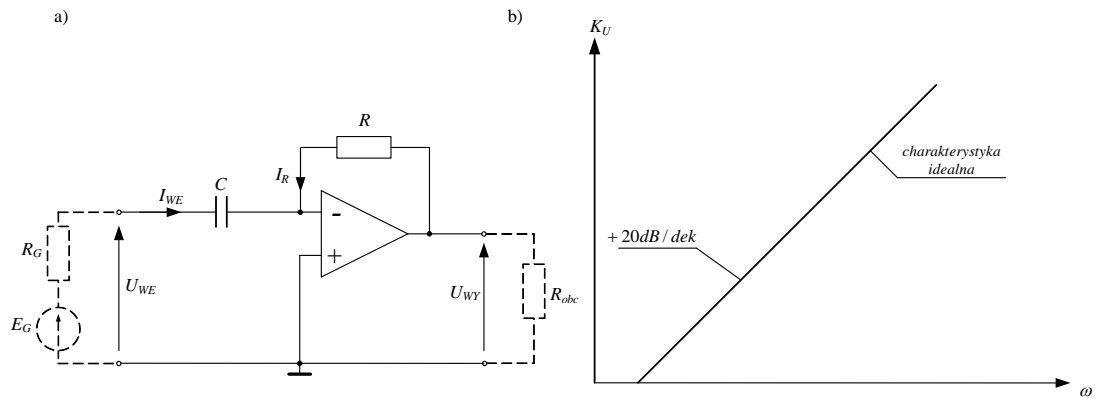
stąd:

$$U_{WY}(t) = -RC \frac{dU_{WE}(t)}{dt}. \quad (4)$$

Transmitancję układu z Rys. 1 opisuje wyrażenie:

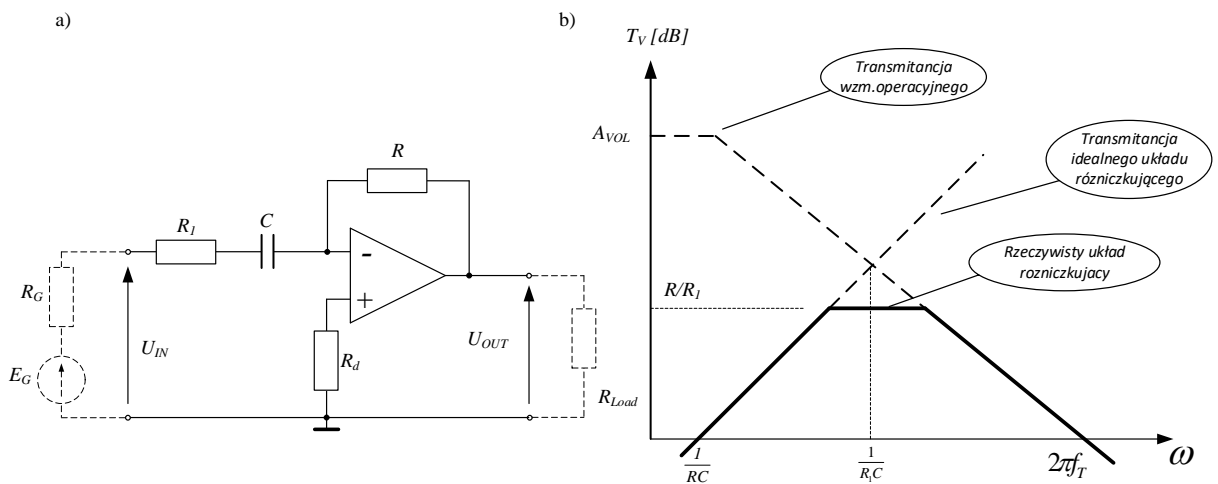
$$K_U(j\omega) = -j\omega RC. \quad (5)$$

Układ realizuje funkcję różniczkowania przy pulsacjach, dla których nachylenie charakterystyki  $K_U(\omega)$  wynosi +20dB/dek.



Rys. 1. Podstawowy układ różniczkujący: a) schemat; b) charakterystyka  $K_u(\omega)$  w skalach logarytmicznych

Podstawowy układ różniczkujący ma wiele wad: skłonność do oscylacji, spadek wzmacnienia dla wyższych częstotliwości związany z charakterystyką częstotliwościową WO, bardzo małą impedancję wejściową przy wielkich częstotliwościach, duże wejściowe napięcie szumów własnych. Wady te można zmniejszyć wprowadzając do układu dodatkowy rezystor  $R_1$ . Schemat zmodyfikowanego układu różniczkującego przedstawiono na Rys. 2.



Rys. 2. Zmodyfikowany układ różniczkujący: a) schemat; b) charakterystyka  $K_u(\omega)$  w skalach logarytmicznych

Rezystor  $R_d$  w układzie z Rys. 2 stosowany jest w celu zminimalizowania błędu niezrównoważenia:

$$R_d = R, \quad (6)$$

Transmitancję układu z Rys. 2 opisuje zależność:

$$K_u(j\omega) = -\frac{j\omega RC}{1 + j\omega CR_1}. \quad (7)$$

Jak wynika z przebiegu charakterystyki tego układu (Rys. 2) różniczkowanie sygnałów sinusoidalnych następuje przy częstotliwościach  $f$ :

$$f < \frac{1}{2\pi R_1 C} \ll f_T, \quad (8)$$

Praktyczne należy dobrać  $R_1$ , tak aby spełniona była zależność:

$$\frac{R}{R_1} \sqrt{\frac{1}{2\pi RC}} \cdot f_T < f_T, \quad (9)$$

czyli:

$$R_1 > \sqrt{\frac{R}{2\pi f_T C}}, \quad (10)$$

gdzie  $f_T$  jest częstotliwością graniczną wzmacniacza (dla TL061  $f_T = 1\text{MHz}$ ).

## 2.2. Projektowanie zmodyfikowanego układu różniczkującego w dziedzinie czasu

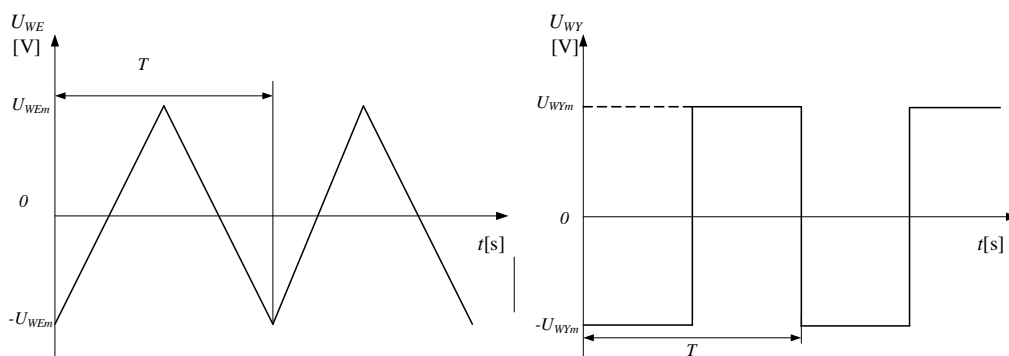
Podając na wejście układu różniczkującego z Rys. 2 sygnał trójkątny o wartości międzyszczytowej  $U_{WEpp} = 2U_{WEEm}$  i częstotliwości  $f$ , na wyjściu układu otrzymamy sygnał prostokątny o wartości międzyszczytowej  $U_{WYpp} = 2U_{WYm}$  – Rys. 3.

Dla  $0 \leq t \leq T/2$  sygnał wejściowy opisuje wyrażenie:

$$U_{WE}(t) = \frac{2U_{WEEm}}{T}t - U_{WEEm}. \quad (11)$$

Stąd, na podstawie wyrażień (4) i (11) i Rys. 3, dla  $t=T/2$ , otrzymujemy:

$$U_{WYm} = RC \frac{2U_{WEEm}}{T} = RC \frac{4U_{WEEm}}{T} = 4U_{WEEm}RCf. \quad (12)$$



Rys. 3. Pobudzenie trójkątne i odpowiedź na nie układu różniczkującego.

Projektując rzeczywisty układ różniczkujący dobieramy najpierw wartości  $R$  i  $C$ , a następnie z warunku na poprawne różniczkowanie (zal. 10) rezystor  $R_1$ .

## 2.3. Przykład projektowy

### Zadanie:

Zaprojektować układ różniczkujący, który będzie realizował funkcję różniczkowania sygnału trójkątnego o napięciu  $U_{WEEm} = \pm 1,6\text{ V}$  i okresie  $T = 1\text{ ms}$  na sygnał prostokątny o napięciu  $U_{WYm} = \pm 1\text{ V}$ .

### Rozwiązanie:

- zakładamy wartość pojemności, np.  $C = 15\text{ nF}$ ,
- dla założonego  $C$  dobieramy wartość  $R$  (zal. 12):

$$R = \frac{U_{WYm}T}{4U_{WEEm} \cdot C} = \frac{0,001}{4 \cdot 1,6 \cdot 15\text{ nF}} \approx 10\text{ k}\Omega,$$

- z warunku (10) dobieramy  $R_1$ :

$$R_1 > \sqrt{\frac{R}{2\pi f_T C}} = \sqrt{\frac{10^4}{2\pi \cdot 10^6 \cdot 15 \cdot 10^{-9}}} \approx 325\ \Omega$$

- przyjmujemy  $R_1 \approx (1,5 \div 2) \cdot 325 \approx 560\ \Omega$ .

## 3. Przygotowanie

### 3.1. Literatura

- [1] Materiały Laboratorium i Wykładów Zespołu Układów Elektronicznych.
- [2] U. Tietze, Ch. Schenk, Układy półprzewodnikowe, WNT, Warszawa, 1996, s. 586-611.
- [3] S. Kuta, Elementy i układy elektroniczne, AGH, 2000, s. 375-415.
- [4] Kulka Z., Nadachowski M., Wzmacniacze operacyjne i ich zastosowania, cz.2, Realizacje praktyczne, Warszawa, WNT, 1982.
- [5] Prałat A., Laboratorium układów elektronicznych, cz2, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2001.

### 3.2. Pytania kontrolne

1. Wyprowadzić wzór na napięcie wyjściowe układu całkującego w dziedzinie czasu?
2. Wyprowadzić wzór na napięcie wyjściowe układu różniczkującego w dziedzinie czasu?
3. Naszkicować charakterystykę amplitudowa i fazową układu całkującego idealnego i rzeczywistego (wzmocnienie w [dB], logarytmiczna skala częstotliwości?)
4. Naszkicować charakterystykę amplitudowa i fazową układu różniczkującego idealnego i rzeczywistego (wzmocnienie w [dB], logarytmiczna skala częstotliwości?)
5. Wyprowadzić wzory na amplitudę przebiegu wyjściowego układu całkującego przy pobudzeniu przebiegiem prostokątnym o zadanej amplitudzie?
6. Wyprowadzić wzory na amplitudę przebiegu wyjściowego układu różniczkującego przy pobudzeniu przebiegiem trójkątnym o zadanej amplitudzie?

### 3.3. Przygotowanie do zajęć

Przed realizacją ćwiczenia studenci otrzymają od prowadzącego zajęcia zadanie projektowe.

W zadaniu określony jest rodzaj układu 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.

### 3.4. Projekt powinien zawierać:

1. Zadanie projektowe, schemat i obliczenia elementów układu. Należy pamiętać by dobierać wartości elementów biernych ze znormalizowanych szeregów wartości – rezystory dobierać z szeregu 5 %, kondensatory z wartości dostępnych w laboratorium (1n, 1n5, 3n3, 4n7, 6n8, 10n, 15n, 22n, 39n, 47n, 100nF).
2. Symulację komputerową układu (np. w programie *LTspice*):
  - a) dla pobudzenia trójkątnego o parametrach jak w zadaniu projektowym.
  - b) dla pobudzenia sinusoidalnego (analiza AC) - częstotliwość wyrazić w skali logarytmicznej, wzmocnienie w dB.
3. Szkic rozmieszczenia elementów na płytce montażowej.

## 4. Program ćwiczenia

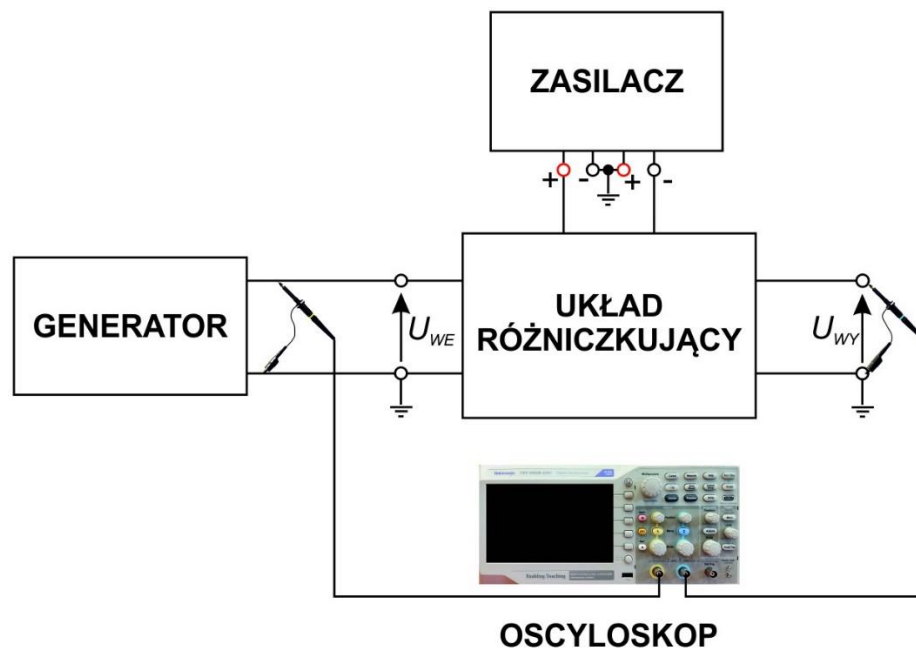
### 4.1. Montaż układu

1. Mając na uwadze, że każdy element bierny wykonany jest z pewną dokładnością, przed przystąpieniem do montażu układu, należy za pomocą multimetru (dostępnego na stanowisku) zmierzyć rzeczywiste wartości używanych elementów.
2. Zmierzone rzeczywiste wartości elementów nanieść na przygotowany schemat układu.
3. Zmontować układ na płytce drukowanej.

## 4.2. Pomiary przy pobudzeniu falą trójkątną

1. Zmontować układ pomiarowy według schematu z Rys. 4; badany układ zasilić napięciem  $\pm 12V$ .
2. Z generatora podać sygnał trójkątny o parametrach zgodnych z wymaganiami zadania projektowego. Na oscylogramie zmierzyć międzyszczytową wartość napięcia wyjściowego:  $U_{WYpp} = 2U_{WYm}$  i obliczyć  $U_{WYm}$ . W razie dużych rozbieżności skorygować wartości elementów tak, aby uzyskać sygnał wyjściowy o zadanych parametrach. Zrzut ekranu oscyloskopu (lub zdjęcie przebiegów) załączyć do sprawozdania.
3. Zmieniając częstotliwość sygnału z generatora zmierzyć zależność  $U_{WYm} = f(f)$ ; sygnał wyjściowy powinien zachowywać kształt prostokątny. Wykorzystać pomiar „Amplitude” zamiast „Peak-Peak” lub skorzystać z pomiaru za pomocą „Cursors”.
4. Wykreślić  $U_{WYm} = f(f)$  i porównać z zależnością teoretyczną (równanie 12).

**UWAGA: Wykres  $U_{WYm} = f(f)$  nie opisuje wzmocnienia układu ani jego transmitancji!**



Rys.4. Schemat blokowy układu pomiarowego

## 4.3. Pomiary przy pobudzeniu sinusoidalnym

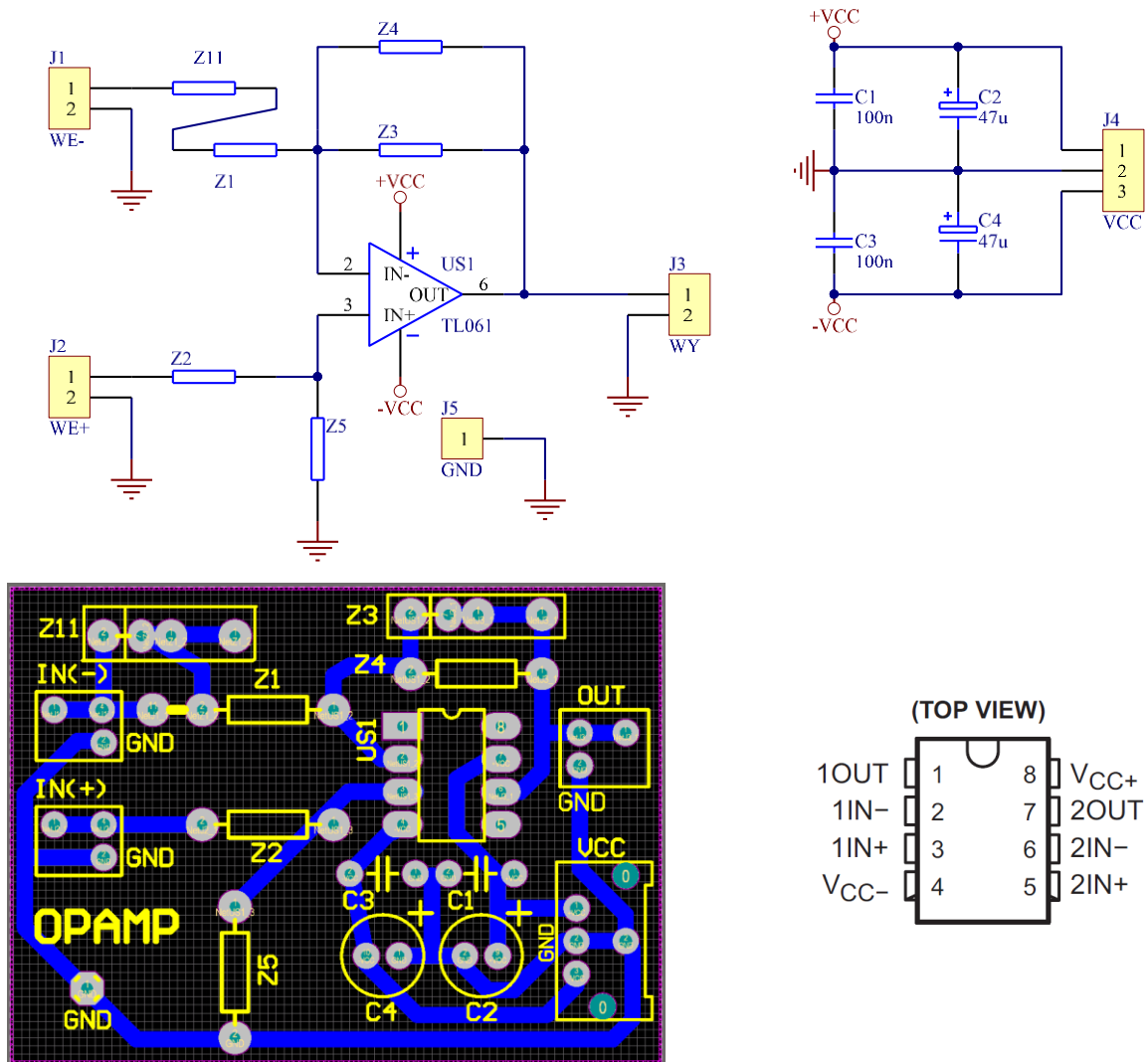
1. Zmierzyć charakterystyki amplitudowo-fazowe układu. Częstotliwości sygnału ustawiać według skali logarytmicznej w zakresie od 10 Hz do około 1 MHz. Amplitudę sygnału wejściowego dobierać tak, by sygnał wyjściowy nie był w jakimkolwiek stopniu zniekształcony i aby jego poziom umożliwiał poprawny pomiar. Pomiary wykonujemy za pomocą oscyloskopu, mierząc wartości „Amplitude” (ewentualnie „CycRMS”) obu przebiegów oraz przesunięcie fazowe pomiędzy nimi.
2. Narysować zmierzone charakterystyki amplitudowo-fazowe układu. Z wykresów odczytać zakres częstotliwości, w którym układ poprawnie różniczuje sygnał wejściowy.
3. Porównać uzyskane przebiegi z teoretycznymi oraz uzyskanymi w symulacji komputerowej.

## 4.4. Sprawozdanie:

1. Strona tytułowa.
2. Obliczenia projektowe (p. 3.4).
3. Schemat układu z naniesionymi wartościami elementów obliczonych w projekcie i wolnym miejscem, przeznaczonym na wpisanie rzeczywistych wartości zmierzonych na stanowisku laboratoryjnym.
4. Zrzut ekranu oscyloskopu przy pobudzeniu trójkątnym umożliwiający odczyt parametrów sygnałów (amplitud i częstotliwości).

5. Tabela wyników pomiarów zależności  $U_{Wym} = f(f)$  (przy pobudzeniu sygnałem trójkątnym).
6. Wykres powyższej zależności w skali liniowo – liniowej.
7. Tabela wyników pomiarów charakterystyk amplitudowej i fazowej (pobudzenie sinusoidalne).
8. Wykres z teoretyczną (symulowana komputerowo) charakterystyką amplitudową układu, w skali log–log (lub dB–log) na którą nanoszona będzie rzeczywista charakterystyka, mierzona na stanowisku.
9. Wnioski - należy przeprowadzić dyskusję różnic pomiędzy uzyskanymi wynikami rzeczywistymi i teoretycznymi, podejmując próbę wyjaśnienia powodów powstawania tych różnic.

## 5. Dodatek: Schemat i widok płytki PCB



Rys. 5. Widok płytki z rozmieszczeniem elementów, schemat ideowy układu, wzmacniacz operacyjny TL061 – wprowadzenia; kondensatory C1-C4 służą odprężaniu zasilania i wraz z układem TL 061 są wlutowane na płytce.

**UWAGA: zwrócić uwagę którym elementom „Z” przyporządkowane są elementy z Rys. 2**