

Podstawowe zastosowania wzmacniaczy operacyjnych - układ różniczkujący

1. Cel ćwiczenia

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

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

2. Opis badanego układu

W ćwiczeniu bada się właściwości układu różniczkującego. Układ ten, zbudowane z wykorzystaniem wzmacniaczy operacyjnych, omówiono w kolejnych podpunktach.

2.2. Układu różniczkujący

Idealny układ różniczkujący realizuje funkcję:

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

Podstawowy układ różniczkujący przedstawiono na rysunku 6.

Analizując układ w dziedzinie czasu możemy zapisać, że prąd $I_R = \frac{U_{WY}(t)}{R}$ natomiast prąd $I_{WE} = C \frac{dU_{WE}(t)}{dt}$. Ponieważ (I prawo Kirchhoffa):

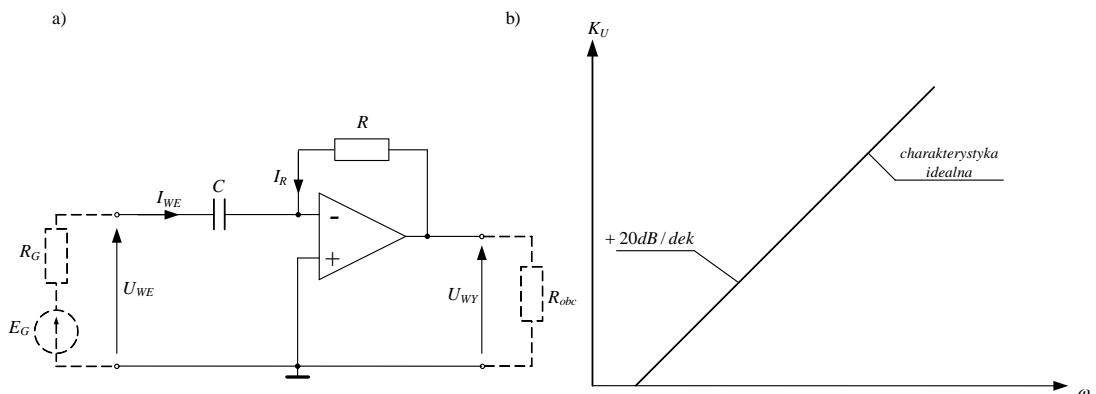
$$I_{WE} + I_C = C \frac{dU_{WE}(t)}{dt} + \frac{U_{WY}(t)}{R} = 0 \quad (2)$$

Stąd:

$$U_{WY}(t) = -RC \frac{dU_{WE}(t)}{dt} \quad (3)$$

Transmitancję układu z rys. 6 opisuje funkcja:

$$K_U(j\omega) = -j\omega RC \quad (4)$$



Rys.6. Podstawowy układ różniczkujący: a) schemat; b) charakterystyka $K_U(\omega)$ w skalach logarytmicznych

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

Podstawowy układ różniczkujący ma wiele wad: skłonność do oscylacji, spadek wzmocnienia dla wyższych częstotliwości związany z charakterystyką częstotliwościową WO, bardzo małą impedancją 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. 7.

Rys.7. Zmodyfikowany układ różniczkujący: a) schemat; b) charakterystyka $K_U(\omega)$ w skalach logarytmicznych

Rezystor R_d stosowany jest w celu zminimalizowania błędu niezrównoważenia,

$$R_d = R. \quad (5)$$

Transmitancję układu określa zależność:

$$K_U(j\omega) = -\frac{j\omega RC}{1 + j\omega CR_1}. \quad (6)$$

Jak wynika z przebiegu charakterystyki tego układu (rys.7) różniczkowanie sygnałów sinusoidalnych następuje przy częstotliwościach f :

$$f < \frac{1}{2\pi RC_1} \ll f_T, \quad (7)$$

Praktycznie należy dobrać R_1 , tak aby spełniona była zależność:

$$\frac{R}{R_1} \sqrt{\frac{1}{2\pi RC} \cdot f_T} < f_T \quad (8)$$

czyli:

$$R_1 > \sqrt{\frac{R}{2\pi C f_T}} \quad (9)$$

gdzie f_T jest częstotliwością graniczną wzmacniacza (dla TL061 – 1MHz).

2.2.1. Projektowanie zmodyfikowanego układu w dziedzinie czasu

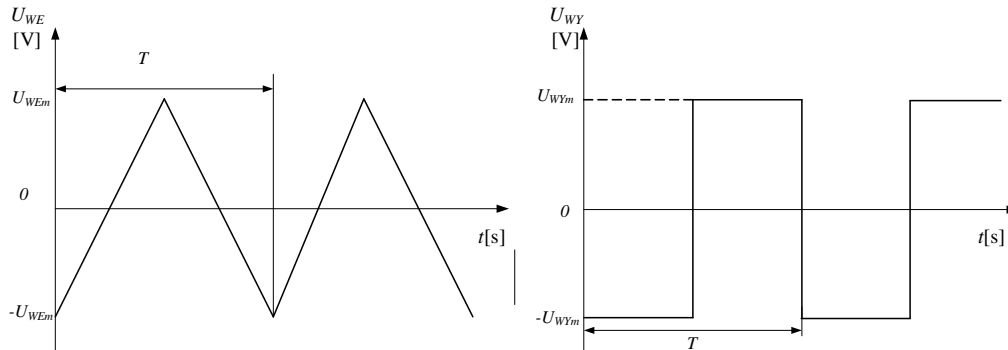
Podając ma wejście układu różniczkującego z rys.7 sygnał trójkątny o wartości międzyszczytowej $U_{WEpp} = 2U_{WEm}$ i częstotliwości f , na wyjściu układu otrzymamy sygnał prostokątny o wartości międzyszczytowej $U_{WYpp} = 2U_{WYm}$ – rys.8.

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

$$U_{WE}(t) = \frac{2U_{WEm}}{T} t - U_{WEm} \quad (10)$$

Stąd, na podstawie wyrażenia (16) i rys. 8, dla $t=T/2$, otrzymujemy:

$$U_{WYm} = RC \frac{2U_{WE m}}{\frac{T}{2}} = RC \frac{4U_{WE m}}{T} = 4U_{WE m} RCf \quad (11)$$



Rys.8. Pobudzenie i odpowiedź układu różniczkującego

Projektując rzeczywisty układ różniczkujący dobieramy najpierw wartości R i C , a następnie z warunku na poprawne różniczkowanie (21) rezystor R_1 .

Przykład projektowy

Zadanie Zaprojektować układ różniczkujący, który będzie realizował funkcję różniczkowania sygnału trójkątnego o napięciach $\pm U_{WE m} = 1,6V$ i okresie $T = 1ms$ na sygnał prostokątny o napięciach $\pm U_{WY m} = 1V$.

Rozwiązanie

Zakładamy $R = 10k\Omega$.

Dla założonego R dobieramy wartość C (zal. 23):

$$C = \frac{U_{WY m}}{4 \cdot U_{WE m} \cdot R} \cdot T = \frac{1}{4 \cdot 1,6 \cdot 10^4} \cdot 0,001 \approx 15nF$$

dobieramy R_1 ,

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

przyjmujemy $R_1 \approx (1.5 \div 2) \cdot 325 \approx 560\Omega$.

3. Przygotowanie

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

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 amplitudową i fazową układu całkującego idealnego i rzeczywistego (wzmocnienie w [dB], logarytmiczna skala częstotliwości) ?
4. Naszkicować charakterystykę amplitudową 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 otrzymują 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 %-ego, kondensatory z wartości dostępnych w laboratorium (360p, 1n, 1n5, 3n3, 4n7, 6n8, 10n, 15n, 22n, 39n, 47n, 100nF).
- 2) Symulacje komputerową układu (np. w programie *PSpice*):
 - a. dla pobudzenia prostokątnego o parametrach jak w zadaniu projektowym.
 - b. dla pobudzenia sinusoidalnego (analiza AC) - częstotliwości wyrazić w skali logarytmicznej, a wzmocnienie w dB.
- 3) Szkic rozmieszczenia elementów na płytce montażowej.

4. Program ćwiczenia

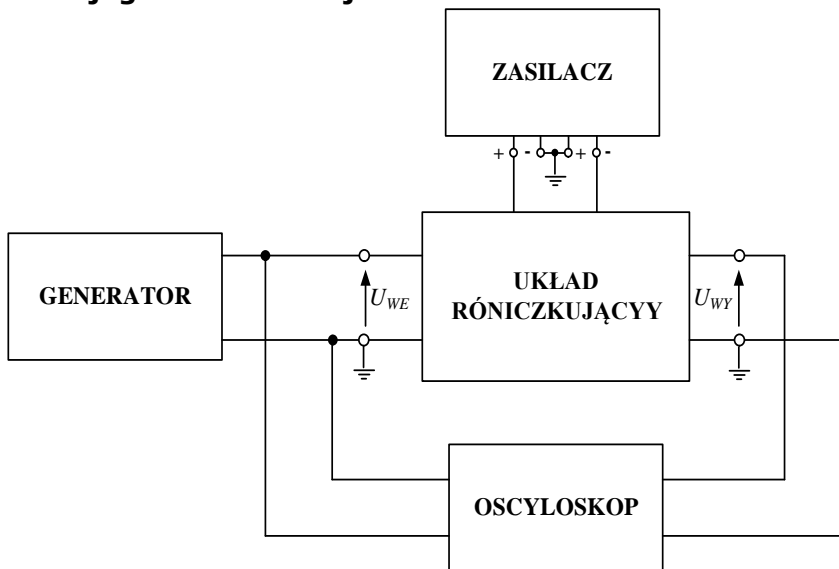
4.1. Montaż układu

- 1) Mając na uwadze, że każdy element bierny wykonany jest z pewną dokładnością, przed przystąpieniem do montażu układu, należy za pomocą miernika (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 zgodnie ze schematem z rys. 9. badany układ zasilić napięciem $\pm 12V$.
- 2) Z generatora podać sygnał trójkątny o parametrach zgodnych z wymaganiami zadania projektowego. Na oscylogramie napięcia wyjściowego określić wartość międzyszczytową $U_{WYpp} = 2U_{WYm}$ i obliczyć U_{WYm} . W razie potrzeby skorygować wartości elementów układu 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 „amplitudy” zamiast „peak-peak”).
- 4) Wykreślić zależność $U_{WYm} = U_{WYm}(f) = U_{WYm} (1/T)$ i porównać z teoretyczną (wzór 11).

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



Rys.9. Schemat blokowy układu pomiarowego

4.3. **Pomiary przy pobudzeniu falą sinusoidalną**

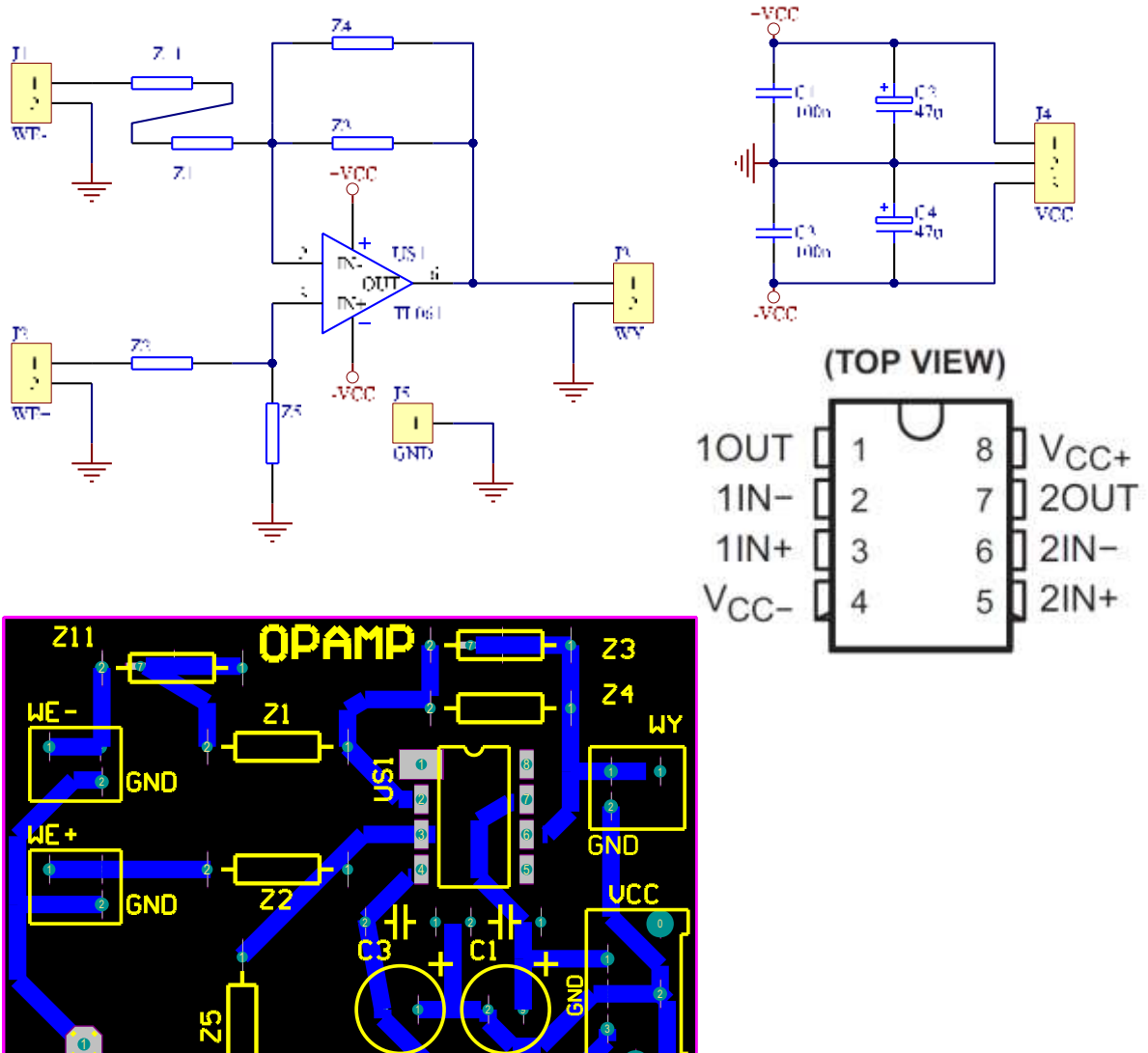
- 5) Zmierzyć charakterystyki amplitudowo-fazowe układu. Częstotliwość sygnału ustawiać według skali logarytmicznej w zakresie od 10Hz do około 1MHz. Amplitudę sygnału wejściowego dobierać tak, by sygnał wyjściowy nie był w jakimkolwiek stopniu zniekształcony i aby jego poziom umożliwiał poprawny pomiar. Pomiary wykonujemy przy pomocy oscyloskopu, mierząc wartości Cyc_{RMS} obu przebiegów oraz ich przesunięcie fazowe.
- 6) Narysować zmierzone charakterystyki amplitudowo-fazowe. Z wykresów odczytać zakres częstotliwości, w którym układ poprawnie różniczuje sygnał wejściowy.
- 7) Porównać uzyskane przebiegi z wykreślonymi teoretycznie 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 prostokątny umożliwiający odczyt parametrów sygnałów (amplitud i częstotliwości).
- 5) Tabela na wyniki pomiarów zależności $U_{WYm} = U_{WYm}(1/f)$ (przy pobudzeniu sygnałem trójkątnym).
- 6) Wykres jednej z powyższych zależności w skali lin–lin.
- 7) Tabela na wyniki pomiarów charakterystyk amplitudowej i fazowej.

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