

# Podstawowe zastosowania wzmacniaczy operacyjnych - układ całkujący

## 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 całkującego.

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

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

## 2. Opis badanego układu

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

### 2.1. Układ całkujący (integrator)

Układ całkujący realizuje funkcję:

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

Schemat idealnego układu całkującego pokazano na Rys. 1. Analizując układ w dziedzinie czasu można zapisać, że prąd:

$$I_C = C \frac{dU_{WY}(t)}{dt}, \quad (2)$$

natomiast prąd:

$$I_{WE} = \frac{U_{WE}(t)}{R}. \quad (3)$$

Ponieważ (I prawo Kirchhoffa):

$$I_{WE} + I_C = 0 \quad (4)$$

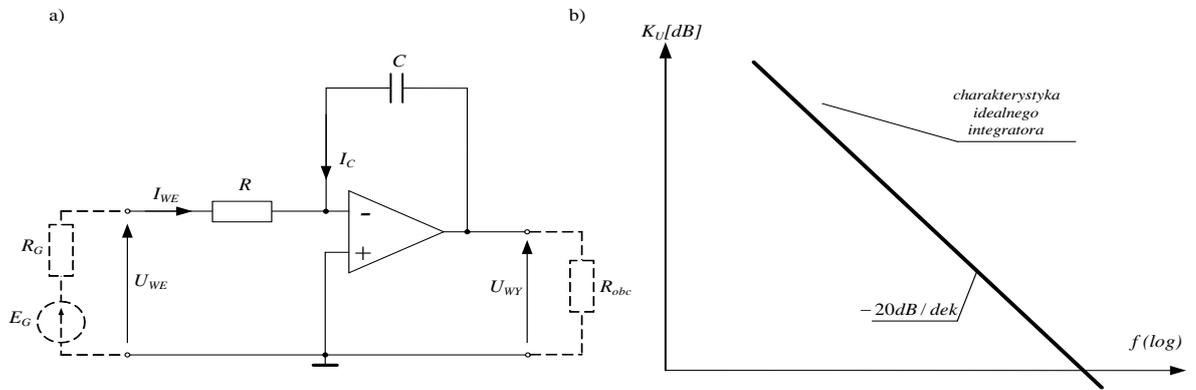
$$I_{WE} + I_C = \frac{U_{WE}(t)}{R} + C \frac{dU_{WY}(t)}{dt} = 0 \quad (5)$$

stąd:

$$U_{WY}(t) = -\frac{1}{RC} \int U_{WE}(t) dt. \quad (6)$$

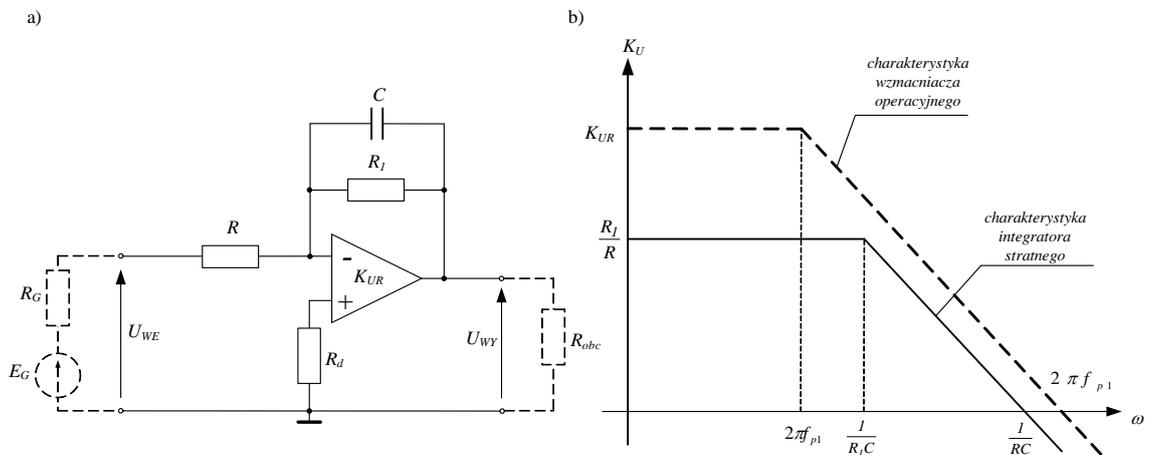
Transmitancję idealnego układu całkującego opisuje wyrażenie:

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



Rys. 1. Podstawowy układ całkujący: a) schemat; b) charakterystyka  $K_U(\omega)$  w skalach logarytmicznych (w skali logarytmiczno-logarytmicznej).

W układzie z Rys. 1 nie ma sprzężenia dla prądu stałego, co w praktyce oznacza nasycanie się wzmacniacza operacyjnego. Dlatego wprowadzono dodatkowy rezystor  $R_1$  (Rys. 2). Układ taki nosi nazwę integratora stratnego.



Rys. 2. Układ całkujący stratny: a) schemat; b) charakterystyka  $K_U(\omega)$  – skale logarytmiczne;  $K_{UR}$  - wzmacnienie napięciowe wzmacniacza operacyjnego,  $f_{p1}$  - górna częstotliwość graniczna wzmacniacza operacyjnego.

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

$$R_d = \frac{(R_G + R)R_1}{R_G + R + R_1}, \quad (8)$$

gdzie  $R_G$  jest rezystancją wewnętrzną generatora (50  $\Omega$  dla generatorów w laboratorium).

Transmitancję układu z Rys. 2 opisuje zależność:

$$K_U(j\omega) = -\frac{R_1}{R} \frac{1}{1 + j\omega R_1 C}. \quad (9)$$

Jak wynika z przebiegu charakterystyki tego układu (Rys. 2) poprawne całkowanie następuje dla pulsacji  $\omega$  (nachylenie  $-20$  dB/dek):

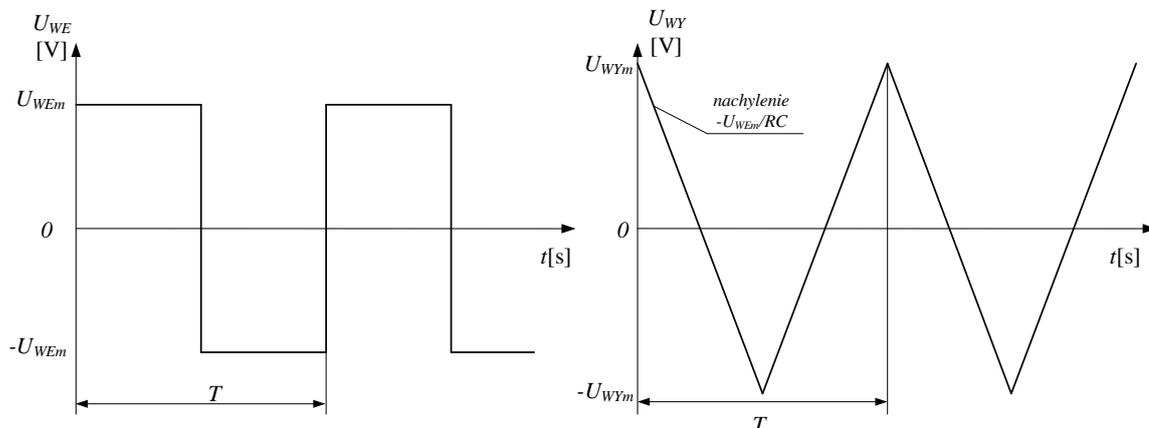
$$\frac{1}{R_1 C} \ll \omega \ll 2\pi K_{UR} f_{p1}, \quad (10)$$

co dla przebiegów sinusoidalnych odpowiada w dziedzinie czasu warunkowi:

$$\frac{1}{K_{UR} f_{p1}} \ll T \ll 2\pi R_1 C. \quad (11)$$

## 2.2. Projektowanie stratnego układu całkującego w dziedzinie czasu

Na wejście układu podajemy sygnał prostokątny o wartości międzyszczytowej  $U_{WEpp} = 2U_{WEEm}$  i częstotliwości  $f = 1/T$ , otrzymując na wyjściu sygnał trójkątny – Rys. 3. Zmiana fazy sygnału wyjściowego wynika ze wzoru (6).



Rys. 3. Pobudzenie prostokątne i odpowiedź na nie układu całkującego.

Dla  $0 \leq t \leq T/2$  opadające zbocze sygnału trójkątnego opisane jest funkcją:

$$U_{WY}(t) = -\frac{U_{WEEm}}{RC}t + U_{WYm}. \quad (12)$$

Dla  $t = T/2$ , na podstawie Rys. 3 otrzymujemy:

$$U_{WYm} = \frac{U_{WEEm}T}{4RC} = \frac{U_{WEEm}}{4RC} \frac{1}{f}. \quad (13)$$

Projektując integrator stratny dobieramy najpierw wartości  $R$  i  $C$ , a następnie z warunku na poprawne całkowanie (zal. 11), rezystor  $R_1$ .

## 2.3. Przykład projektowy

### Zadanie:

Zaprojektować integrator stratny, który będzie realizował funkcję całkowania sygnału prostokątnego o napięciu  $U_{WEEm} = \pm 1$  V i okresie  $T = 1$  ms na sygnał trójkątny o napięciu  $U_{WYm} = \pm 1,6$  V.

### Rozwiązanie:

- zakładamy wartość pojemności np.  $C = 15$  nF,
- dla założonego  $C$  dobieramy wartość  $R$  (zal. 13):

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

- z warunku (11) na poprawne całkowanie dobieramy  $R_1$ :

$$R_1 \gg \frac{T}{2\pi C} = \frac{1 \text{ ms}}{2\pi \cdot 15 \text{ n}} = 10615 \Omega$$

- przyjmujemy  $R_1$  wielokrotnie większy np.  $\Rightarrow R_1 = 120$  k $\Omega$

## 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 prostokątnego 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

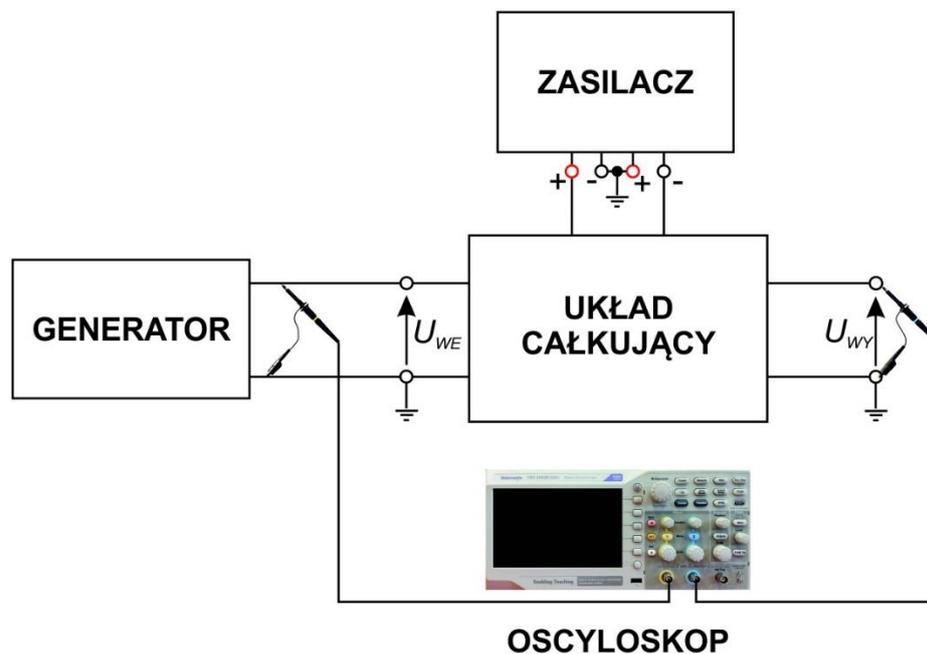
### 4.1. Montaż układu

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 prostokątną

1. Zmontować układ pomiarowy według schematu z Rys. 4; badany układ zasilić napięciem  $\pm 12V$ .
2. Z generatora podać sygnał prostokątny 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  $U_{WYm} = f(1/f)$  ( $1/f = T$  – okres sygnału); sygnał wyjściowy powinien zachowywać kształt trójkątny. Wykorzystać pomiar „Amplitude” zamiast „Peak-Peak” lub skorzystać z pomiaru za pomocą „Cursors”.
4. Wykreślić  $U_{WYm} = f(1/f) = f(T)$  i porównać z zależnością teoretyczną (równanie 13).

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



Rys.4. Schemat blokowy układu pomiarowego

## 4.3. Pomiary przy pobudzeniu sinusoidalnym

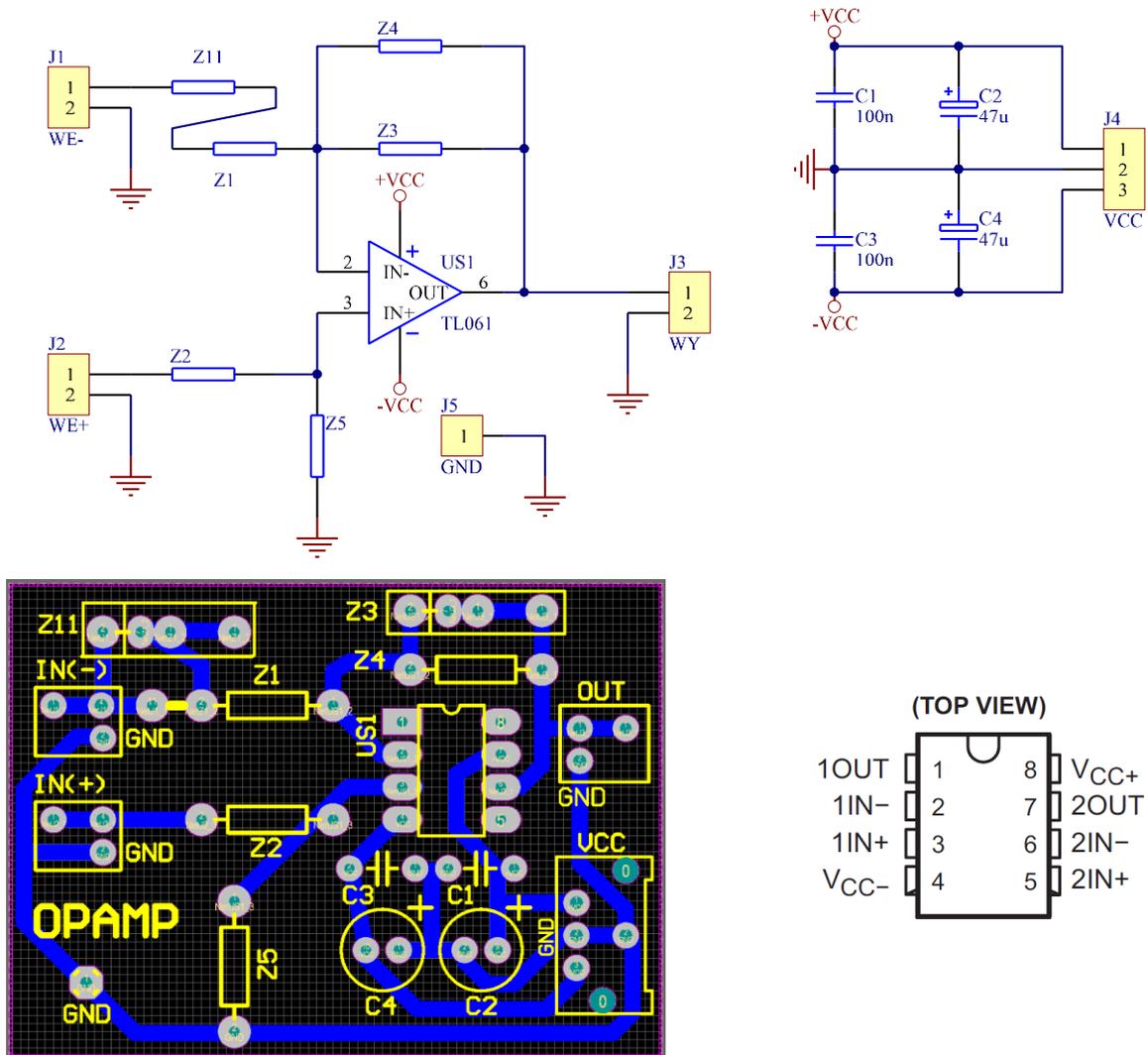
1. Zmierzyć charakterystyki amplitudowo-fazowe układu. Częstotliwości sygnału ustawiać według skali logarymicznej w zakresie od 10 Hz do około 5 MHz. Amplitudę sygnału wejściowego dobierać tak, by sygnał wyjściowy nie był w jakimkolwiek stopniu zniekształcony i aby jego poziom umożliwiał poprawny pomiar. 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 całkuje 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 prostokątnym umożliwiający odczyt parametrów sygnałów (amplitud i częstotliwości).

5. Tabela wyników pomiarów zależności  $U_{Wym} = f(T)$  (przy pobudzeniu sygnałem prostokątnym).
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**