

# Podstawowe zastosowania wzmacniaczy operacyjnych - układ całkujący

## 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 całkującego.

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

## 2. Opis badanego układu

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

### 2.1. Układ całkujący (integrator)

Układ całkujący realizuje funkcję:

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

Schemat idealnego układu całkującego pokazano na rys.2.

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):

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

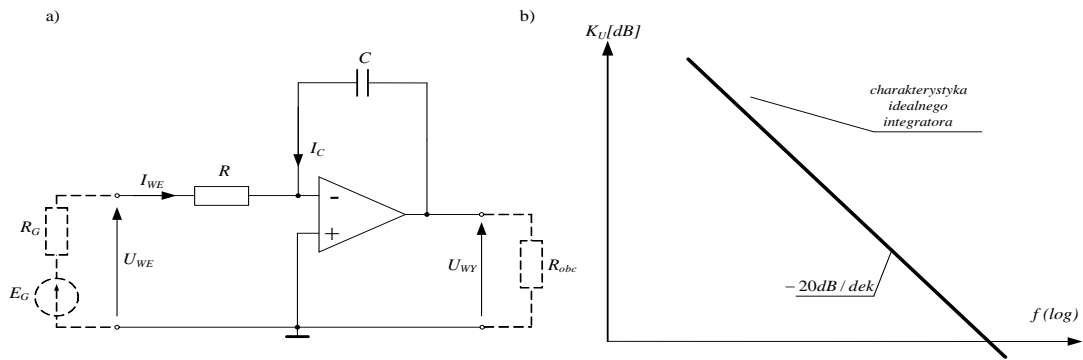
$$I_{WE} + I_C = \frac{U_{WE}(t)}{R} + C \frac{dU_{WY}(t)}{dt} = 0 \quad (5)$$

stąd:

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

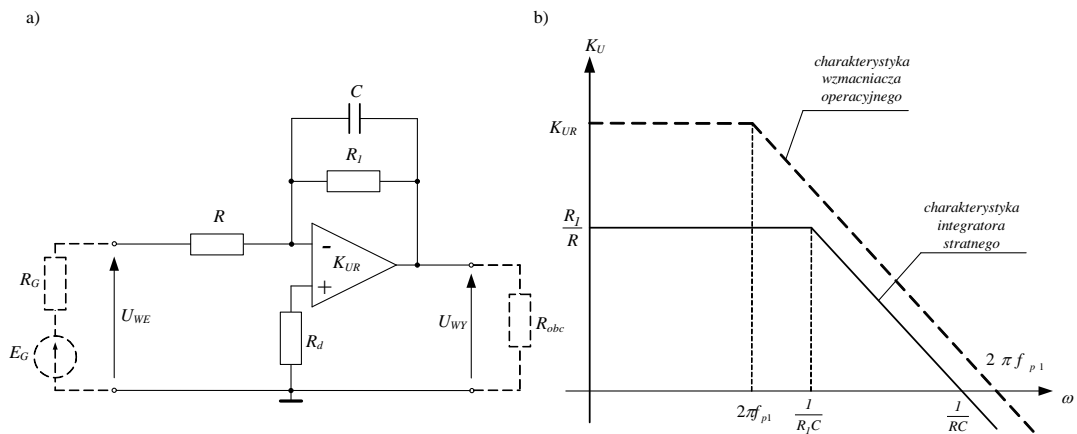
Transmitancję idealnego układu całkującego opisuje wyrażenie:

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



Rys.2. Podstawowy układ całkujący: a) schemat; b) charakterystyka  $K_U(\omega)$  w skalach logarytmicznych (w skali logarytmiczno-logarytmicznej).

W układzie z rys. 2 nie ma sprzężenia dla prądu stałego, co w praktyce oznacza nasycenie się wzmacniacza operacyjnego. Dlatego wprowadzono dodatkowy rezystor  $R_1$  (Rys.3). Układ taki nosi nazwę integratora stratnego.



Rys.3. 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.3 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. 3 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.3) poprawne całkowanie następuje dla pulsacji  $\omega$  (nachylenie  $-20\text{dB/dek}$ ):

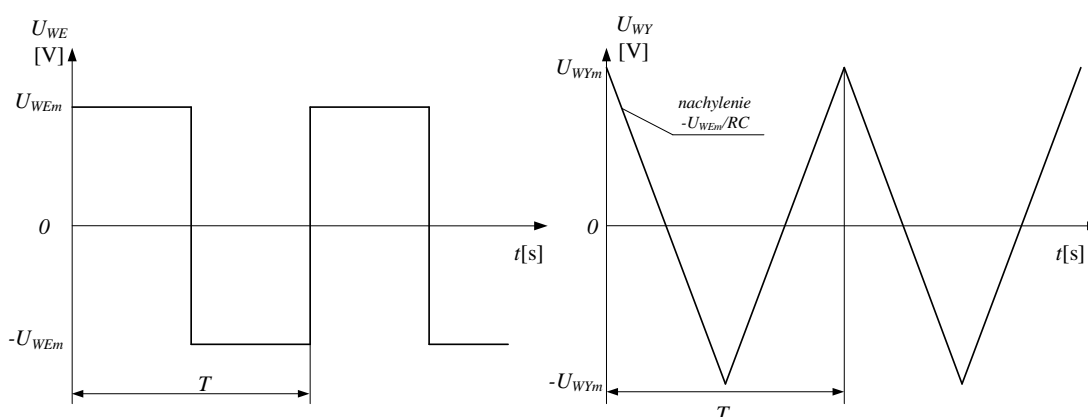
$$\frac{1}{R_1 C} \ll \omega \ll 2\pi K_{UR} f_{p1} \quad (10)$$

co, dla przebiegów sinusoidalnych, odpowiada w dziedzinie czasu warunkowi:

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

### 2.1.1. Projektowanie stratnego układu całkującego w dziedzinie czasu

Na wejście układu podajemy sygnał prostokątny o wartości międzyszczytowej  $U_{WEpp} = 2U_{WE m}$  i częstotliwości  $f=1/T$ , otrzymując na wyjściu sygnał trójkątny – rys. 4. Zmiana fazy sygnału wyjściowego wynika ze wzoru (6).



Rys.4. Pobudzenie prostokątne i odpowiedź na nie układu całkującego

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

$$U_{WY}(t) = -\frac{U_{WE m}}{RC} \frac{t}{2} + U_{WY m} \quad (12)$$

Dla  $t=T/2$ , na podstawie rys.4 otrzymujemy:

$$U_{WY m} = \frac{U_{WE m}}{RC} \frac{T}{4} = \frac{U_{WE m}}{RC} \frac{1}{4f} \quad (13)$$

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

### Przykład projektowy

#### Zadanie

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

## **Rozwiązanie**

zakładamy  $R = 10k\Omega$ ,

dla założonego  $R$  dobieramy wartość  $C$  (zal. 13):

$$C = \frac{U_{wEm} T}{4U_{wym} \cdot R} = \frac{0,001}{4 \cdot 1,6 \cdot 10k} \approx 15nF$$

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

$$R_1 \gg \frac{T}{2\pi C} = \frac{1m}{2\pi 15n} = 10615$$

przyjmujemy  $R_1$  wielokrotnie większy np.  $\Rightarrow R_1 = 620k\Omega$

## **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 wzmacnienie w dB.
  - 3) Szkic rozmieszczenia elementów na płytce montażowej.

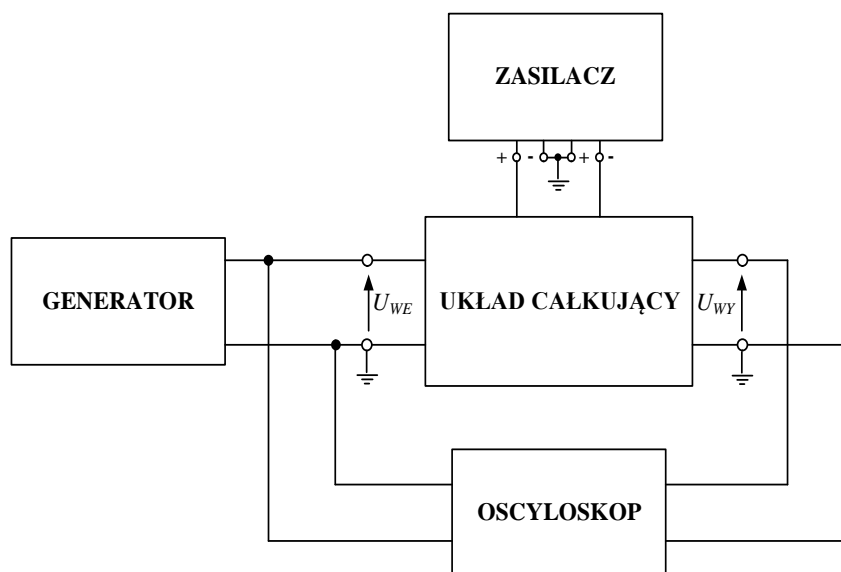
## 4. Program ćwiczenia

### 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 prostokątną

- 1) Zmontować układ pomiarowy według schematu z rys.9, badany układ zasilić napięciem  $\pm 12V$ .
- 2) Z generatora podać sygnał prostokątny o parametrach zgodnych z wymaganiami zadania projektowego. Na oscylogramie napięć wejściowego i wyjściowego zmierzyć jego wartość międzyszczytową  $U_{WYpp}=2U_{WYm}$  i obliczyć  $U_{WYm}$ . W razie potrzeby 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  $U_{WYm}=f(1/f)$  (sygnał wyjściowy powinien zachowywać kształt trójkątny, wykorzystać pomiar „amplitudy” zamiast „peak-peak”),
- 4) Wykreślić zależność  $U_{WYm} = U_{WYm}(1/f) = U_{WYm}(T)$  i porównać z teoretyczną (równanie 13).  
**UWAGA: Wykres  $U_{WYm} = U_{WYm}(1/f)$  nie opisuje wzmacnienia układu ani jego transmitancji !.**



Rys.9. Schemat blokowy układu pomiarowego

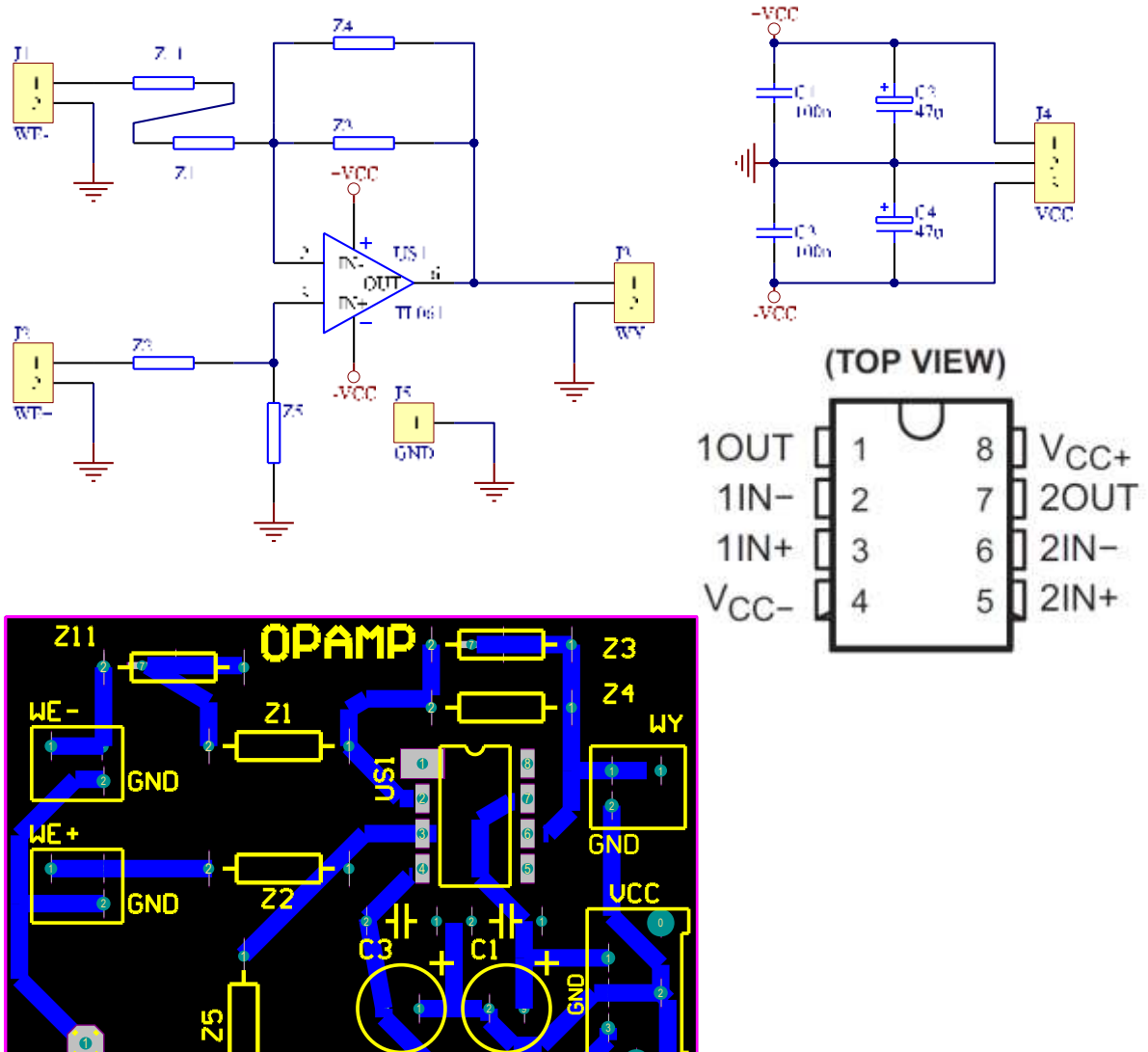
### **4.3. Pomiary przy pobudzeniu sinusoidalnym**

- 5) Zmierzyć charakterystyki amplitudowo-fazowe układu. Częstotliwości sygnału ustawiać według skali logarytmicznej w zakresie od 10Hz do około 5MHz. 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  $CycRMS$  obu przebiegów oraz ich przesunięcie fazowe.
- 6) Narysować zmierzone charakterystyki amplitudowo-fazowe układu. Z wykresów odczytać zakres częstotliwości, w którym układ poprawnie całkuje sygnał wejściowy.
- 7) 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 prostokątny umożliwiający odczyt parametrów sygnałów (amplitud i częstotliwości).
- 5) Tabela wyników pomiarów zależności  $U_{wym} = U_{wym}(T)$  (przy pobudzeniu sygnałem prostokątnym)
- 6) Wykres powyższej zależności w skali lin–lin.
- 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. 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 wlutowane na płytce