



Politechnika Wrocławska

Instytut Telekomunikacji, Teleinformatyki i Akustyki

Zakład Układów Elektronicznych

Instrukcja do ćwiczenia laboratoryjnego

**ZASTOSOWANIE WZMACNIACZY
OPERACYJNYCH DO LINIOWEGO
PRZEKSZTAŁCANIA SYGNAŁÓW**

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest praktyczne poznanie układów ze wzmacniaczami operacyjnymi stosownych do liniowego przekształcania sygnałów. Zakres ćwiczenia obejmuje podstawy projektowania i sposoby pomiarów parametrów układów całkującego i różniczkującego.

2. Opis badanych układów

W ćwiczeniu możliwe jest badanie właściwości układu różniczkującego lub całkującego. Układy te zbudowane z wykorzystaniem wzmacniaczy operacyjnych omówiono w kolejnych podpunktach.

2.1. Układ całkujący (integrator)

Układ całkujący realizuje funkcję:

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

Napięcie wyjściowe rzeczywistego układu całkującego różni się od powyższej funkcji o błąd całkowania. W przypadku pobudzenia sinusoidalnego (rys.1) błąd ten jest zdefiniowany jako:

- a) błąd amplitudy,
– względny,

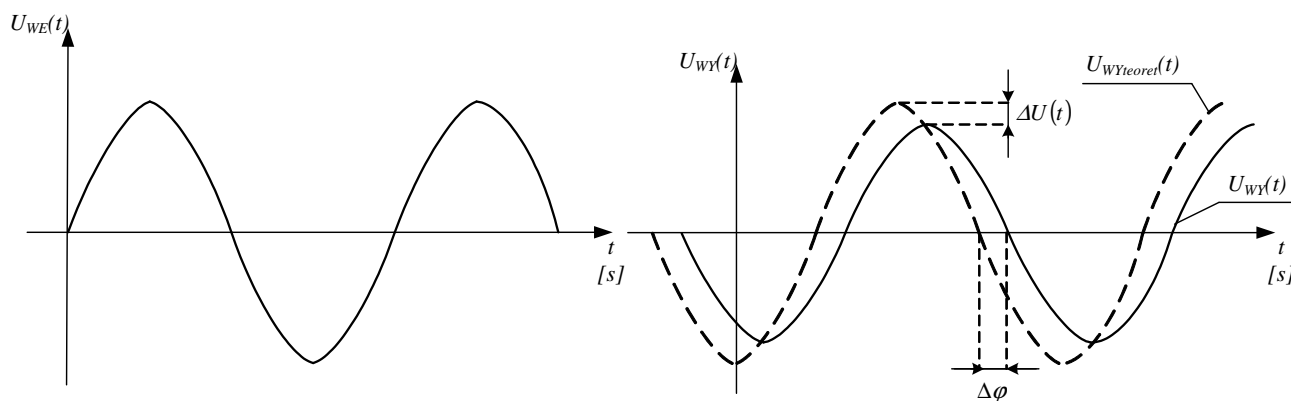
$$\Delta U = U_{WYteoret}(t) - U_{WY}(t) \quad , \quad (2)$$

- bezwzględny,

$$\delta = \frac{\Delta U}{U_{WYteoret}(t)} 100\% \quad , \quad (3)$$

- b) błąd fazy,

$$\Delta\varphi = \arg[U_{WYteoret}(t)] - \arg[U_{WY}(t)] \quad . \quad (4)$$



Rys.1. Interpretacja graficzna błędów całkowania przy pobudzeniu sinusoidalnym

Idealny układ całkujący pokazano na rys.2.

Analizując układ w dziedzinie czasu możemy zapisać, że prąd $I_C = -C \frac{dU_{WY}(t)}{dt}$ natomiast prąd $I_{WE} = \frac{U_{WE}(t)}{R}$. Ponieważ prądy te są sobie równe, otrzymujemy:

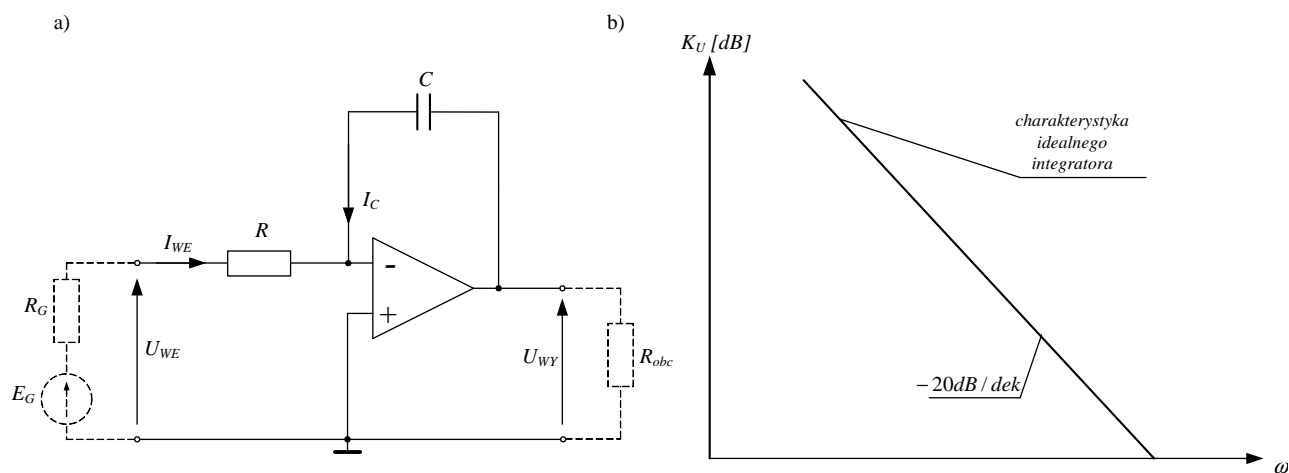
$$\frac{U_{WE}(t)}{R} = -C \frac{dU_{WY}(t)}{dt} \quad , \quad (5)$$

stąd:

$$U_{wy}(t) = -\frac{1}{RC} \int U_{we}(t) dt \quad , \quad (6)$$

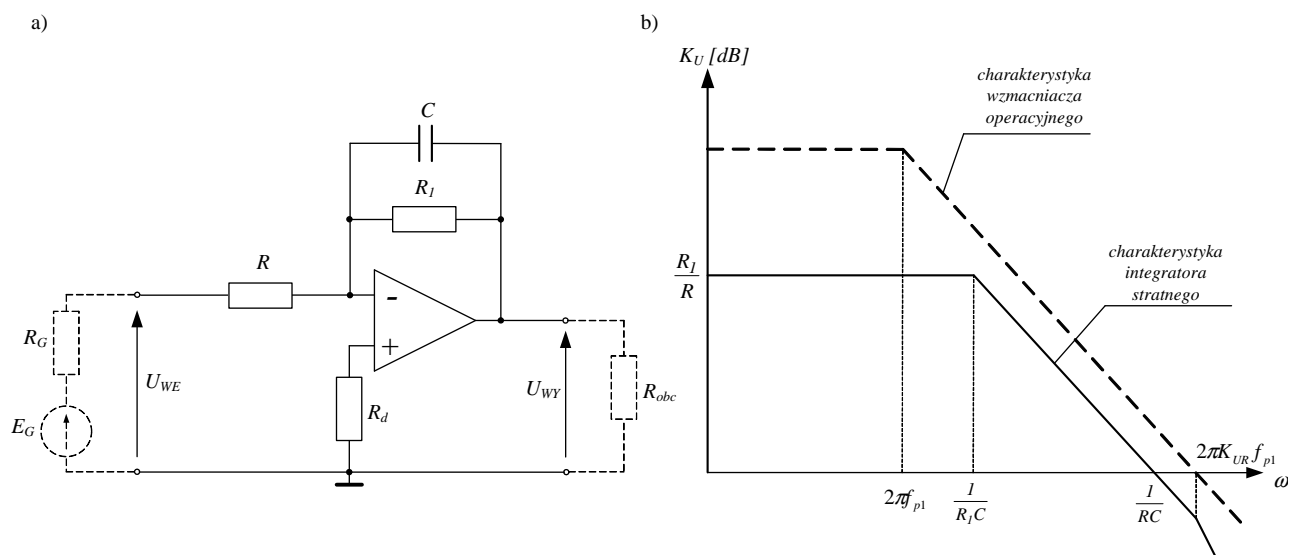
Transmitancja układu jest równa:

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



Rys.2. Podstawowy układ całkujący: a) schemat; b) charakterystyka $K_u(f)$

Ponieważ w układzie nie ma sprzężenia dla prądu stałego wzmacniacz operacyjny może się nasycać dla niskich częstotliwości. Aby poprawić warunki pracy układu wprowadza się dodatkowy rezystor R_I (rys.3). Układ taki nosi nazwę integratora stratnego.



Rys.3. Układ całkujący stratny: a) schemat; b) charakterystyka $K_u(f)$; 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,

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

gdzie R_G jest rezystancją wewnętrzną generatora (50 lub 600Ω dla generatorów w laboratorium).

Transmitancję układu w dziedzinie częstotliwości można zapisać zależnością:

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

Jak wynika z przebiegu charakterystyki tego układu (rys.3) poprawne całkowanie następuje w przedziale częstotliwości (nachylenie -20dB/dek):

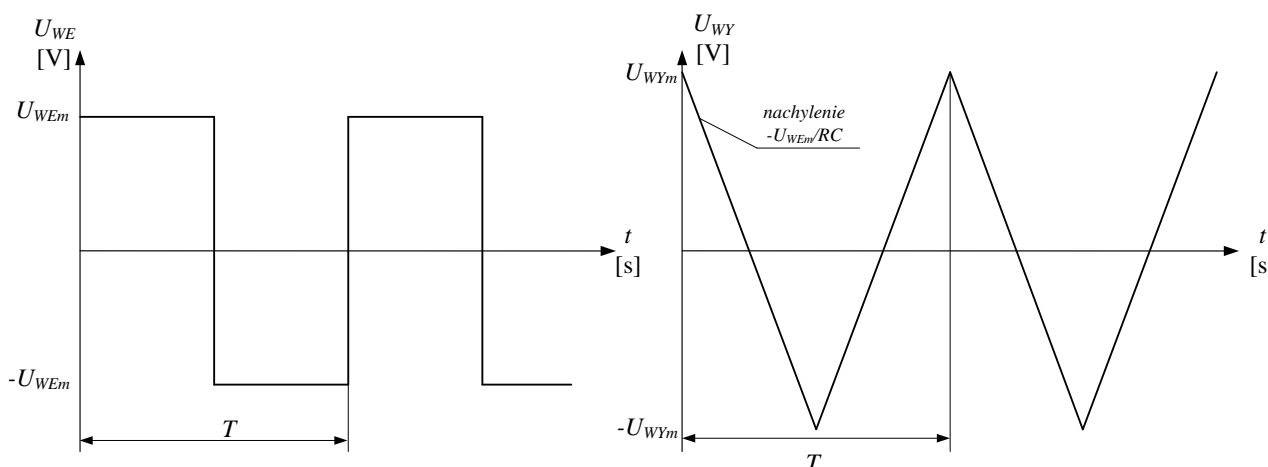
$$\frac{1}{R_1 C} \ll \omega \ll 2\pi K_{UR} f_{p1} \quad (10)$$

co 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 układu stratnego w dziedzinie czasu

Jeśli na wejście układu podamy sygnał prostokątny o wartości amplitudy U_{WEm} i czasie trwania impulsu $T/2$, na wyjściu otrzymamy całkę tego sygnału czyli przebieg trójkątny (rys.4).



Rys.4. Pobudzenie i odpowiedź układu całkującego

Zbocze opadające sygnału trójkątnego opisane jest funkcją:

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

Gdy amplituda sygnału wejściowego zmieni znak na ujemny $-U_{WE m}$ funkcja opisująca zbocze trójkąta (12) zmieni także swój znak na przeciwny (zbocze narastające). Czas trwania zbocza równy jest $T/2$. W tym czasie sygnał trójkątny przyrasta o wartość $2U_{WY m}$. Na podstawie rys.4 można zapisać:

$$2U_{WY m} = \pm \frac{U_{WE m}}{RC} \frac{T}{2} \quad (13)$$

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

Przykład projektowy

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

Rozwiązanie

zakładamy $R = 10k\Omega$,

dla założonego R dobieramy wartość C ,

$$C = \frac{U_{WE m}}{2U_{WY m} \cdot R} \cdot \frac{T}{2} = \frac{1}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^4} \cdot \frac{0,001}{2} \approx 15nF$$

z warunku na poprawne całkowanie $T \ll 2\pi R_1 C$ dobieramy R_1 ,

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

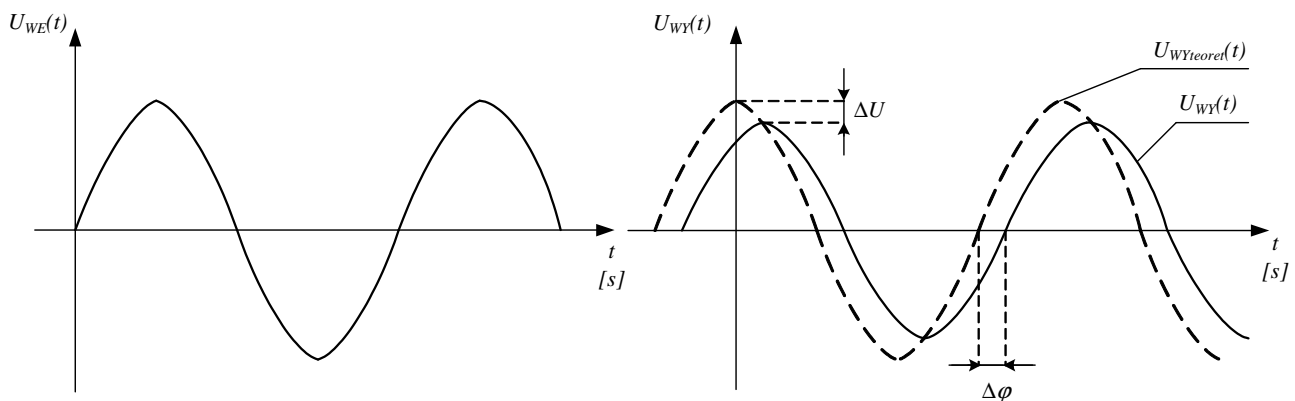
przyjmujemy R_1 silnie większy $\Rightarrow R_1 = 100 k\Omega$

2.2. Układu różniczkujący

Układ różniczkujący realizuje funkcję:

$$U_{WY}(t) = k \frac{dU_{WE}(t)}{dt} \quad (14)$$

Napięcie wyjściowe rzeczywistego układu różniczkującego różni się od powyższej funkcji o błąd różniczkowania. W przypadku pobudzenia sinusoidalnego (rys.5) błąd ten jest zdefiniowany podobnie jak dla integratora i słuszne są zależności (2) – (4).



Rys.5. Interpretacja graficzna błędów różniczkowania

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 prądy te są sobie równe, otrzymujemy:

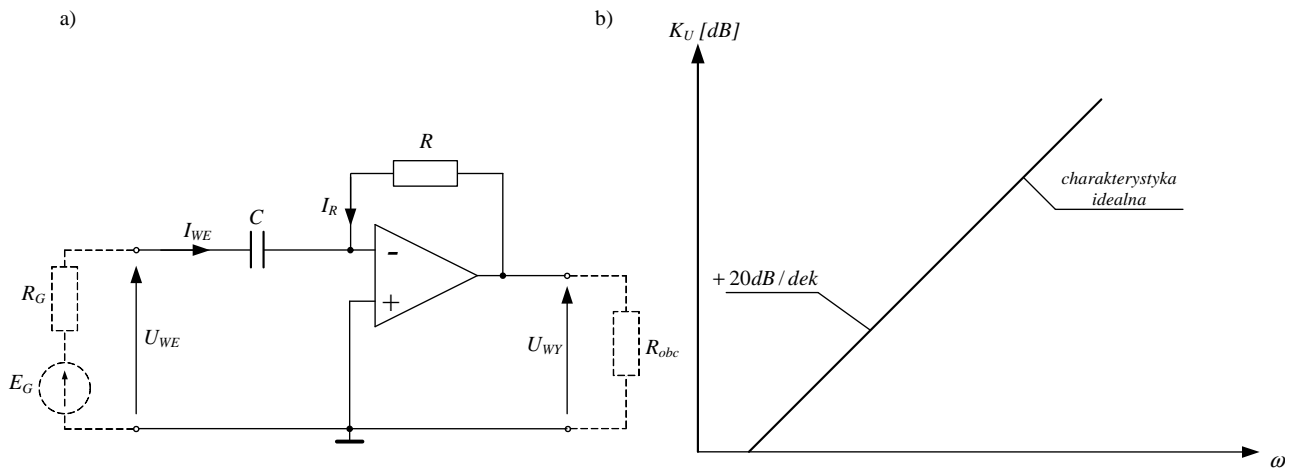
$$C \frac{dU_{WE}(t)}{dt} = -\frac{U_{WY}(t)}{R}, \quad (15)$$

stąd:

$$U_{wy}(t) = -RC \frac{dU_{we}(t)}{dt} \quad , \quad (16)$$

Transmitancja układu:

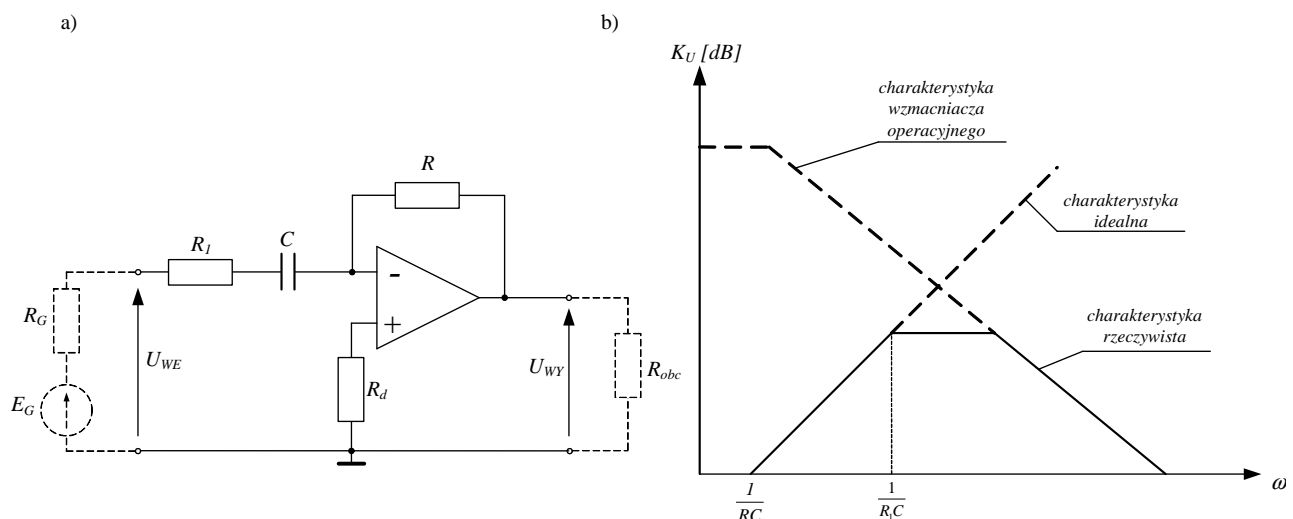
$$K_U(j\omega) = -j\omega RC \quad . \quad (17)$$



Rys.6. Podstawowy układ różniczkujący: a) schemat; b) charakterystyka $K_U(f)$

Układ realizuje funkcję całkowania przy częstotliwościach przy których nachylenie charakterystyki $K_U(f)$ wynosi +20dB/dek.

Podstawowy układ różniczkujący ma wiele wad: skłonność do oscylacji, spadek wzmocnienia 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 rysunku 7.



Rys.7. Zmodyfikowany układ różniczkujący: a)schemat; b) charakterystyka $K_u(f)$

Rezystor R_d stosowany jest w celu zminimalizowania błędu niezrównoważenia,

$$R_d = R \quad . \quad (18)$$

Transmitancję układu określa zależność:

$$K_U(j\omega) = -\frac{j\omega RC}{1 + j\omega CR_1} \quad (19)$$

Jak wynika z przebiegu charakterystyki tego układu (rys.7) różniczkowanie następuje przy częstotliwości mniejszej od:

$$\omega \ll \frac{1}{R_1 C} \quad (20)$$

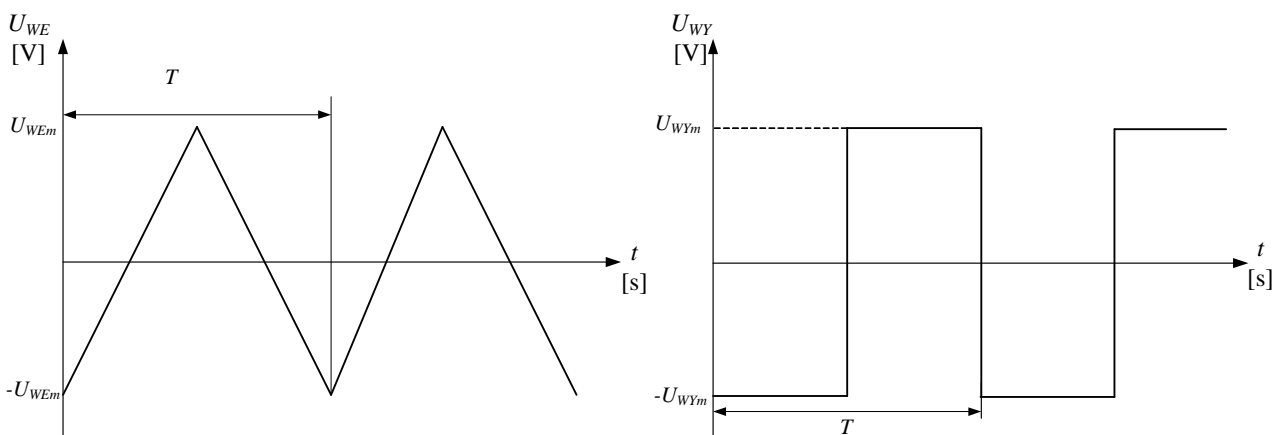
co odpowiada w dziedzinie czasu warunkowi:

$$T \gg 2\pi R_1 C \quad (21)$$

2.2.1. Projektowanie zmodyfikowanego układu w dziedzinie czasu

Podając na wejście sygnał trójkątny o amplitudzie U_{WEm} i czasie trwania zbocza narastającego $T/2$ (rys.8) na wyjściu układu otrzymamy sygnał prostokątny. W czasie $T/2$ sygnał trójkątny przyrasta o wartość $2U_{WEm}$:

$$U_{WYm} = -RC \frac{2U_{WEm}}{\frac{T}{2}} = -RC \frac{4U_{WEm}}{T} \quad (22)$$



Rys.8. Pobudzenie i odpowiedź układu różniczkującego

Gdy sygnał wejściowy zmieni znak na ujemny (zbocze opadające) amplituda sygnału wyjściowego zmieni także swój znak na przeciwny.

Projektując rzeczywisty układ różniczkujący dobieramy najpierw wartości R i C , a następnie z warunku na poprawne różniczkowanie (25) rezystor R_1 .

Przykład projektowy

Zadanie Zaprojektować układ różniczkujący, który będzie realizował funkcję różniczkowania sygnału trójkątnego o amplitudzie $U_{WEm} = 1,6V$ i okresie $T = 1ms$ na sygnał prostokątny o amplitudzie $U_{WYm} = 1V$.

Rozwiązanie

zakładamy $R = 10k\Omega$

dla założonego R dobieramy wartość C

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

z warunku na poprawne różniczkowanie $T \gg 2\pi R_1 C$ dobieramy R_1 ,

$$R_1 \ll \frac{T}{2\pi C} = \frac{1m}{2\pi 15n} = 10k\Omega$$

przyjmujemy $R_1 = 1k\Omega$

3. Przygotowanie do ćwiczenia

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.

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

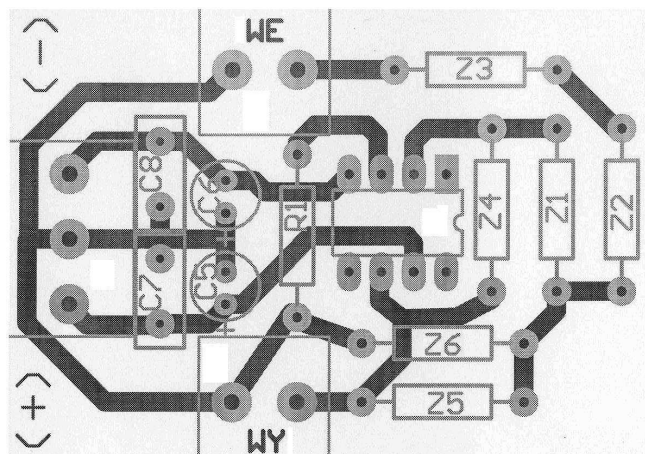
- 1) obliczenia elementów układu. Należy pamiętać o doborze wartości elementów biernych ze znormalizowanych szeregów wartości – rezystory dobierać z szeregu 5 %-ego, kondensatory z wartości dostępnych w laboratorium (100p, 240p, 360p, 1n, 1n5, 3n3, 4n7, 6n8, 10n, 15n, 22n, 100nF),
- 2) wykreślenie teoretycznej charakterystyki amplitudowej i fazowej układu przy pobudzeniu sinusoidalnym w skali lin-log (przebiegi wykreślić np. w programie PSpice). Wartość wzmocnienia napięciowego nanosić w decybelach,
- 3) rozmieszczenie elementów filtra na uniwersalnej płycie montażowej (rys.9).

3.2. Szablon sprawozdania (sprawozdanie powinno zawierać 8 stron):

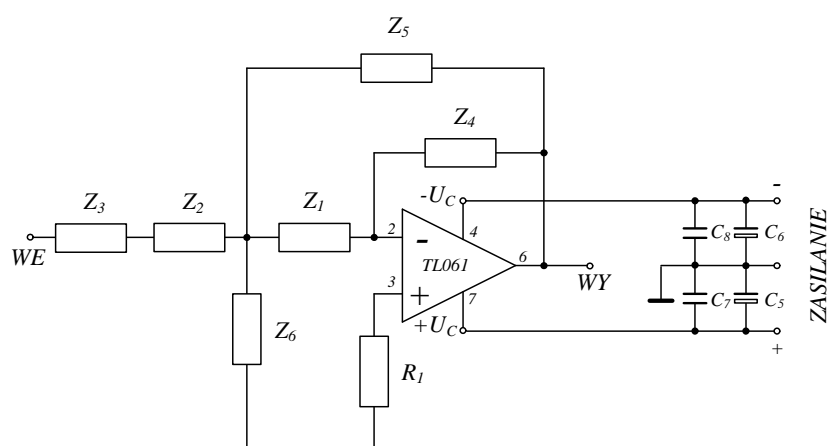
- 1) strona tytułowa (szablon na stronie <http://qe.ita.pwr.wroc.pl/~zue/>),
- 2) schemat układu filtra z naniesionymi wartościami elementów przyjętych w projekcie i wolnym miejscem przeznaczonym na wpisanie rzeczywistych wartości mierzonych na stanowisku laboratoryjnym,
- 3) tabela na wyniki pomiarów charakterystyki $U_{wym} = f(f)$ przy pobudzeniu prostokątnym (układ całkujący) lub trójkątnym (układ różniczkujący),
- 4) siatka w skali lin–lin na wykres $U_{wym} = f(f)$,
- 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) wolna strona na wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

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

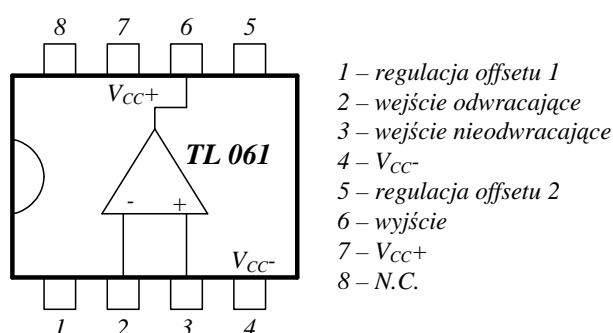
a)



b)



c)



Rys.9. Uniwersalna płytką drukowana: a) widok płytki z rozmieszczeniem elementów, b) schemat ideowy układu, c) wzmacniacz operacyjny TL061 – wyprowadzenie pinów; kondensatory C1-C4 służą odprężaniu zasilania i wraz z układem TL 061 są wlotowane na płytce

4. Montaż układu

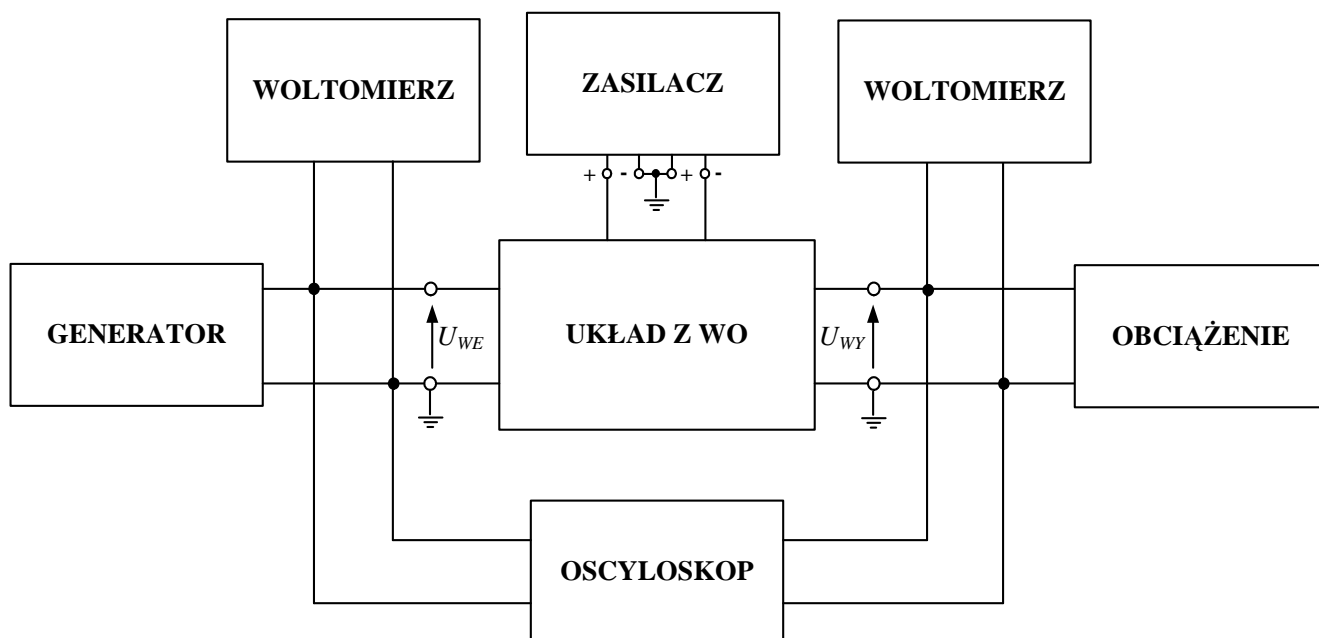
- 1) mając na uwadze, że każdy element bierny wykonany jest z pewną dokładnością, przed przystąpieniem do montażu układu, należy za pomocą miernika (dostępnego na stanowisku) zmierzyć rzeczywiste wartości używanych elementów,
- 2) zmierzone rzeczywiste wartości elementów nanieść na przygotowany schemat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

5. Program ćwiczenia

5.1. Integrator

Pomiary przy pobudzeniu falą prostokątną

- 1) zmontować układ pomiarowy według schematu z rys.10,
- 2) z generatora podać sygnał prostokątny o parametrach zgodnych z wymaganiami zadania projektowego. Na oscylogramie napięcia wyjściowego określić amplitudę uzyskanego przebiegu. W razie potrzeby skorygować wartości elementów układu tak aby uzyskać sygnał wyjściowy o zadanych parametrach,
- 3) zmieniając częstotliwość sygnału z generatora ocenić jej wpływ na amplitudę sygnału wyjściowego (pomiarów prowadzić dla częstotliwości zapewniających poprawne całkowanie – sygnał wyjściowy powinien zachować kształt trójkątny),
- 4) wykreślić charakterystykę $U_{wy} = f(f)$,
- 5) wyznaczyć zakres częstotliwości, w którym układ ma właściwości układu całkującego (nachylenie charakterystyki -20dB/dek),



Rys.10. Schemat blokowy układu pomiarowego

Pomiary przy pobudzeniu sinusoidalnym

- 1) przy stałej amplitudzie napięcia wejściowego U_{WE} zmieniać częstotliwość generatora, odczytując amplitudę napięcia wyjściowego U_{WY} oraz przesunięcie fazowe pomiędzy sygnałami wyjściowym a wejściowym (metoda oscyloskopowa),
- 2) na przygotowanych rysunkach z teoretycznymi charakterystykami amplitudową i fazową nanieść charakterystyki pomiarowe,
- 3) wyznaczyć zakres częstotliwości, w którym układ ma właściwości układu całkującego (nachylenie charakterystyki -20dB/dek),
- 4) porównać uzyskane przebiegi z wykreślonymi teoretycznie.

5.2. Układ różniczkujący

Pomiary przy pobudzeniu falą trójkątną

- 1) zmontować układ pomiarowy zgodnie ze schematem z rys.10,
- 2) z generatora podać sygnał trójkątny o parametrach zgodnych z wymaganiami zadania projektowego. Na oscylogramie napięcia wyjściowego określić amplitudę uzyskanego

przebiegu. W razie potrzeby skorygować wartości elementów układu tak aby uzyskać sygnał wyjściowy o zadanych parametrach,

- 3) zmieniając częstotliwość sygnału z generatora ocenić jej wpływ na amplitudę sygnału wyjściowego (pomiar prowadzić dla częstotliwości zapewniających poprawne różniczkowanie – sygnał wyjściowy powinien zachować kształt prostokątny),
- 4) wykreślić charakterystykę $U_{WYm} = f(f)$,
- 5) wyznaczyć zakres częstotliwości, w którym układ ma właściwości układu różniczkującego (nachylenie charakterystyki $+20\text{dB/dek}$),

Pomiary przy pobudzeniu falą sinusoidalną

- 1) przy stałej amplitudzie napięcia wejściowego U_{WE} zmieniać częstotliwość generatora, odczytując amplitudę napięcia wyjściowego U_{WY} oraz przesunięcie fazowe pomiędzy sygnałami wyjściowym a wejściowym (metoda oscyloskopowa),
- 2) na przygotowanych rysunkach z teoretycznymi charakterystykami amplitudową i fazową nanieść charakterystyki pomiarowe,
- 3) wyznaczyć zakres częstotliwości, w którym układ ma właściwości układu różniczkującego (nachylenie charakterystyki $+20\text{dB/dek}$),
- 4) porównać uzyskane przebiegi z wykreślonymi teoretycznie.

6. Uwagi odnośnie sprawozdania.

We wnioskach do sprawozdania 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.