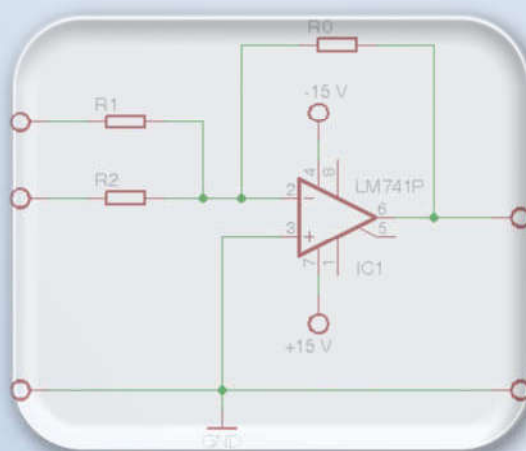
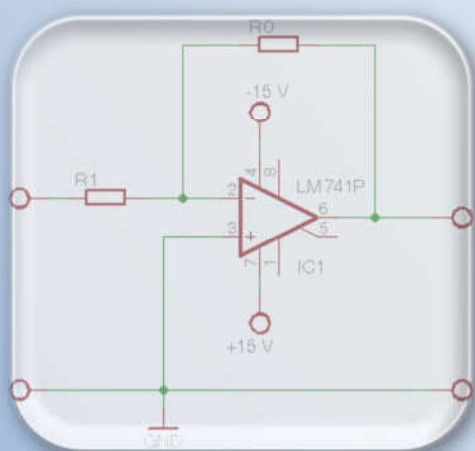


Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UMK

Pracownia Elektroniczna

ZESTAW 6

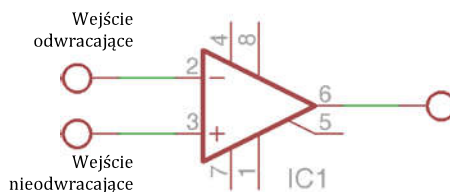
PRZYKŁADOWE ZASTOSOWANIA WZMACNIACZY OPERACYJNYCH



I. WSTĘP TEORETYCZNY

Wzmacniacze operacyjne są najczęściej stosowanymi analogowymi układami scalonymi. O ich popularności decyduje ich uniwersalność i wielość możliwych zastosowań. Nazwa "operacyjne" wiąże się z pierwszymi historycznie ich zastosowaniami do wykonywania operacji matematycznych.

Na rysunku 1 przedstawiono symbol wzmacniacza operacyjnego.



Rys. 1. Symbol wzmacniacza operacyjnego.

Typowy wzmacniacz operacyjny posiada symetryczne (różnicowe) wejście oraz niesymetryczne wyjście. Biorąc pod uwagę fazę sygnału wyjściowego, względem fazy sygnału doprowadzanego do poszczególnych wejść, wejście oznaczone "+" nosi nazwę wejścia nieodwracającego, a wejście oznaczone "-" nosi nazwę wejścia odwracającego. Doprowadzając sygnał wejściowy między oba wejścia wzmacniacza tworzymy tak zwany sygnał różnicowy. Napięcie wyjściowe wzmacniacza operacyjnego U_{wy} jest proporcjonalne do wartości napięcia sygnału różnicowego

$$U_{wy} = k_U^{(o)}(U_+ - U_-) \quad (R1)$$

$k_U^{(o)}$ - współczynnik wzmocnienia napięciowego wzmacniacza operacyjnego pracującego w układzie z otwartą pętlą (symbol - (o)) sprzężenia zwrotnego,

U_+ oraz U_- napięcia wejściowe doprowadzone odpowiednio do wejścia nieodwracającego i odwracającego.

W podstawowej analizie układów elektronicznych wykorzystujących wzmacniacze operacyjne stosowany jest model idealnego wzmacniacza operacyjnego. W modelu tym zakłada się:

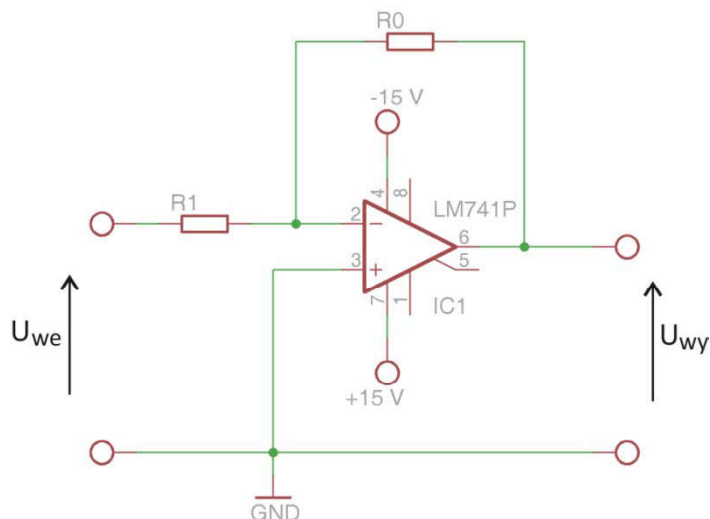
- nieskończenie duże wzmocnienie w układzie pracy z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego
 $k_U^{(o)} = \infty$,
- nieskończenie szerokie pasmo przenoszenia sygnału - zakres częstotliwości od zera do plus nieskończoności,
- nieskończenie duży opór wejściowy - pomiędzy każdym z wejść a masą oraz pomiędzy oboma wejściami,
- zerowy opór wyjściowy.

W zastosowaniach praktycznych wzmacniacze operacyjne stosowane są w układach z zewnętrznym ujemnym sprzężeniem zwrotnym, realizowanym przy pomocy zewnętrznych elementów elektronicznych, doprowadzających sygnał z wyjścia do wejścia odwracającego wzmacniacza operacyjnego.

Jak widać z równania (R1) wartość napięcia na wyjściu wzmacniacza operacyjnego jest określona iloczynem współczynnika wzmocnienia napięciowego i napięcia różnicowego. Aby był spełniony warunek skończonej wartości napięcia wyjściowego (ograniczonej przez wartości napięcia zasilania), przy zakładanym w modelu idealnym nieskończonym (a w praktyce bardzo dużym) współczynniku wzmocnienia napięciowego, ujemne sprzężenie zwrotne będzie zawsze utrzymywać napięcie różnicowe bliskie zeru, czyli w analizie układów można przyjąć że $U_+ = U_-$.

1. WZMACNIACZ ODWRACAJĄCY FAZĘ

Na rysunku 2 przedstawiono schemat układu wzmacniacza odwracającego fazę, zbudowanego z wykorzystaniem scalonego wzmacniacza operacyjnego.



Rys. 2. Wzmacniacz odwracający fazę

Wejście nieodwracające wzmacniacza operacyjnego połączone jest do masy, więc napięcie $U_+ = 0$. Zgodnie z założeniami modelu idealnego wzmacniacza operacyjnego oporność wejściowa wejścia odwracającego jest nieskończenie duża i prąd wpływający do tego wejścia wzmacniacza jest równy zero. Oznacza to, że taki sam prąd płynie przez oporniki R_1 oraz R_0 :

$$I = \frac{U_{we} - U_-}{R_1} = \frac{U_- - U_{wy}}{R_0}$$

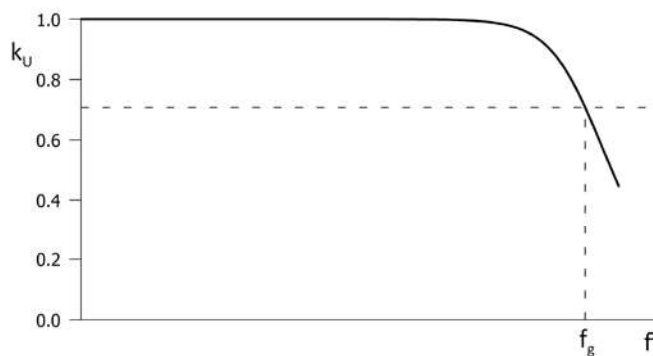
Korzystając z zależności $U_+ = U_- = 0$ otrzymujemy wartość współczynnika wzmocnienia napięciowego wzmacniacza odwracającego fazę

$$k_U = \frac{U_{wy}}{U_{we}} = -R_0/R_1$$

Wartość wzmocnienia zależy tutaj tylko od wartości oporności elementów zewnętrznych, nie zależy zaś od parametrów układu wzmacniacza operacyjnego. Znak minus oznacza, że zbudowany w tej konfiguracji wzmacniacz odwraca fazę sygnału.

Wzmacniacz operacyjny jest wzmacniaczem prądu stałego i w zakresie niższych częstotliwości sygnału wejściowego wykazuje stałą wartość współczynnika wzmocnienia napięciowego. W zakresie wyższych częstotliwości istotny staje się wpływ pojemności pasozytniczych występujących w układzie i wzmocnienie wzmacniacza maleje.

Rysunek 3 przedstawia przykład charakterystyki częstotliwościowej amplitudowej wzmacniacza zbudowanego z wykorzystaniem operacyjnego.



Rys. 3. Charakterystyka częstotliwościowa amplitudowa wzmacniacza.

Górna częstotliwość graniczna - f_g , jest zdefiniowana jako częstotliwość dla której współczynnik wzmocnienia napięciowego wzmacniacza maleje do wartości $\frac{1}{\sqrt{2}}k_U$ (tłumienie - 3 dB).

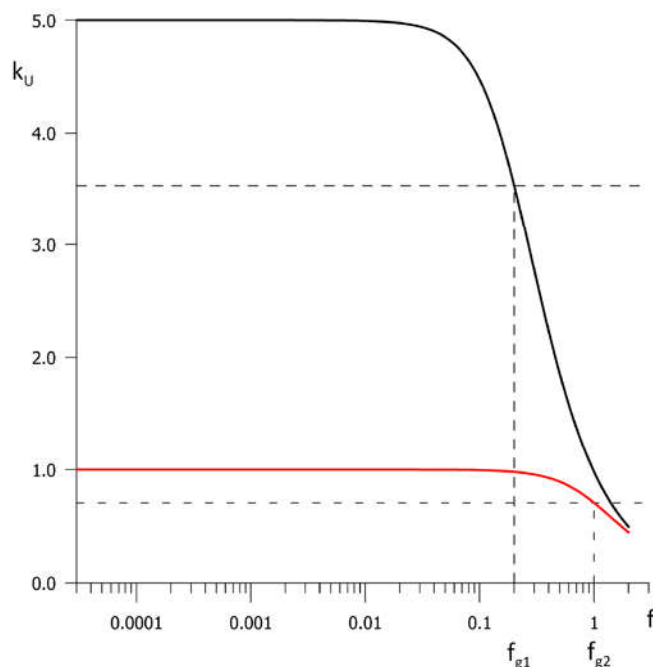
Pasmo przenoszenia wzmacniacza B rozciąga się w tym przypadku od częstotliwości $f = 0$, do górnej częstotliwości granicznej - f_g :

$$B = f_g.$$

Zastosowanie w układzie wzmacniacza ujemnego sprzężenia zwrotnego powoduje zmniejszenie wzmocnienia napięciowego oraz poszerzenie pasma przenoszenia B . Zachowany jest przy tym iloczyn wzmocnienia napięciowego i pasma przenoszenia:

$$k_U B = const$$

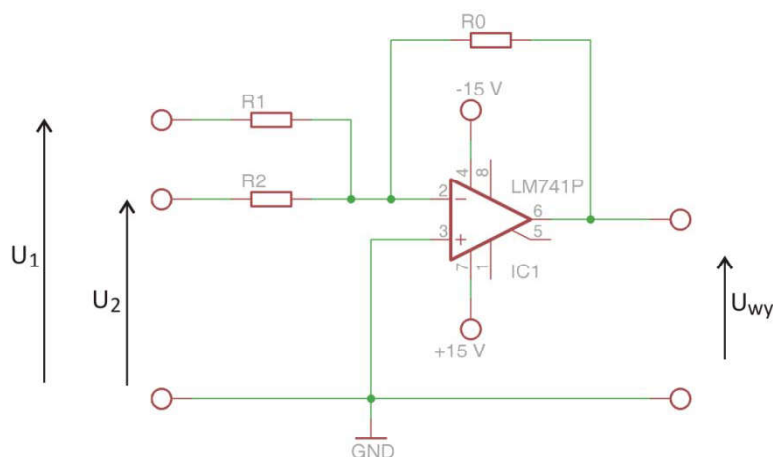
Na rysunku 4 przedstawiono dwie przykładowe charakterystyki amplitudowe wzmacniacza uzyskane dla różnych wartości wzmocnienia napięciowego oraz odpowiadające im wartości górnych częstotliwości granicznych.



Rys. 4. Przykładowe charakterystyki amplitudowe wzmacniacza uzyskane dla różnych wartości wzmocnienia napięciowego oraz odpowiadające im wartości górnych częstotliwości granicznych.

2. WZMACNIACZ SUMUJĄCY

Modyfikując nieznacznie układ wzmacniacza odwracającego fazę, otrzymujemy układ umożliwiający sumowanie kilku sygnałów wejściowych.



Rys. 5. Wzmacniacz sumujący.

Na rysunku 5 przedstawiono schemat układu wzmacniacza umożliwiającego sumowanie dwóch sygnałów wejściowych o napięciach U_1 oraz U_2 .

Wejście nieodwracające wzmacniacza operacyjnego połączone jest do masy, więc napięcie $U_+ = 0$. Zgodnie z założeniami modelu idealnego wzmacniacza operacyjnego oporność wejściowa wejścia odwracającego jest nieskończenie duża i prąd wpływający do tego wejścia wzmacniacza jest równy zero. Zgodnie z I prawem Kirchhoffa prąd I płynący przez opornik sprzężenia zwrotnego R_0 , jest równy sumie prądów I_1 oraz I_2 płynących przez oporniki wejściowe R_1 oraz R_2 :

$$I = I_1 + I_2$$

$$I = \frac{U_- - U_{wy}}{R_0}$$

$$I_1 = \frac{U_1 - U_-}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{U_2 - U_-}{R_2}$$

Korzystając z zależności $U_+ = U_- = 0$ otrzymujemy

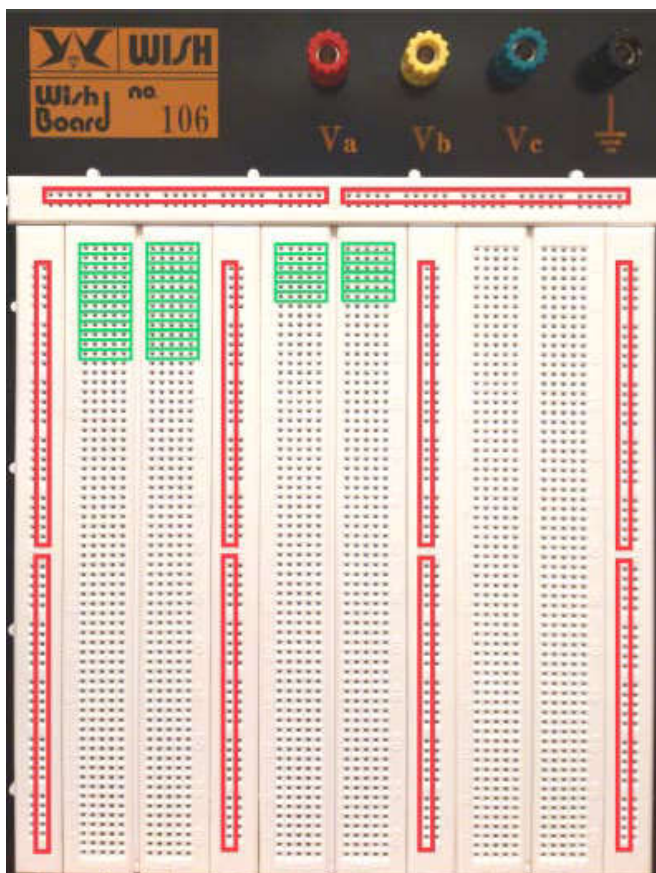
$$U_{wy} = -\left(\frac{R_0}{R_1}U_1 + \frac{R_0}{R_2}U_2\right) = -(w_1U_1 + w_2U_2)$$

Napięcie wyjściowe układu U_{wy} jest więc sumą ważoną napięć U_1 oraz U_2 . Wagi $w_1 = R_0/R_1$ oraz $w_2 = R_0/R_2$ określone są przez odpowiedni dobór wartości oporników R_1 , R_2 oraz R_0 . W przypadku

gdy $R_1 = R_2 = R_0$, wagi $w_1 = w_2 = 1$ i otrzymujemy $U_{wy} = -(U_1 + U_2)$.

Znak minus oznacza, że zbudowany w tej konfiguracji wzmacniacz odwraca fazę sygnału. Przedstawiony powyżej układ przeznaczony jest do sumowania dwóch sygnałów, lecz można go dowolnie rozbudować, zwiększając liczbę wejść dla dodawanych sygnałów.

II. POMIARY I ICH OPRACOWANIE



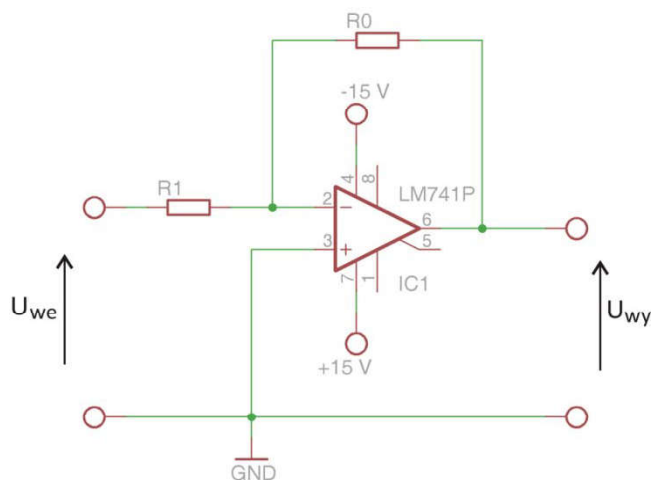
Stykowa płytki prototypowa posiada pod plastikową obudowę miedziane paski tworzące ścieżki połączeń umożliwiające połączenia z innymi elementami układu.

Na rysunku obok zaznaczono sposób poprowadzenia ścieżek.

Połączenie kolumnowe (oznaczone na czerwono) często stosuje się do prowadzenia zasilania i masy układu.

1. WZMACNIACZ ODWRACAJĄCY FAZĘ.

- 1) Korzystając z zestawu elementów elektronicznych oraz płytki prototypowej zbudować układ przedstawiony na rysunku poniżej:



Jako opornik R_0 zamontować opornik $20\text{ k}\Omega$.

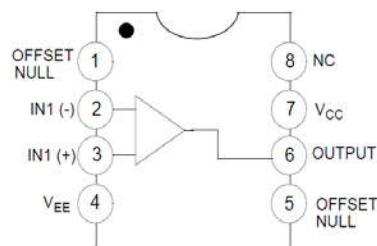
Wykaz elementów:

$R_0 = 20\text{ k}\Omega$ (później zmiana na $2\text{ k}\Omega$)

$R_1 = 2\text{ k}\Omega$

wzmacniacz operacyjny – układ LM741

Układ LM741 – wyprowadzenia pinów



- 2) Do wejścia odwracającego wzmacniacza doprowadzić z generatora sygnał sinusoidalny o częstotliwości 1 kHz i napięciu (międzyszczytowym) $U_{we} = 1$ V. Do wejść oscyloskopu doprowadzić sygnał wejściowy i sygnał z wyjścia wzmacniacza. Zarejestrować (dokonać zrzutu z oscyloskopu) sygnał wejściowy i wyjściowy wzmacniacza, zwracając uwagę na zależności fazowe między sygnałami. Zmierzyć wartość napięcia wyjściowego U_{wy} (napięcie międzyszczytowe) i wyznaczyć współczynnik wzmocnienia napięciowego k_U wzmacniacza.
- 3) Postępując analogicznie jak w punkcie 2 wykonać pomiary współczynnika wzmocnienia napięciowego k_U , dla częstotliwości sygnału wejściowego 10 Hz, 100 Hz, 316 Hz, 1 kHz, 3.16 kHz, 10 kHz, 31.6 kHz, 100 kHz, 316 kHz, 1 MHz, 3.16 MHz
Wyniki pomiarów przedstawić w postaci tabeli (Tabela 1).
Dla każdej wyznaczonej wartości współczynnika wzmocnienia napięciowego k_U , oszacować jej błąd Δk_U i przedstawić ją w tabeli oraz zaznaczyć ją na wykresie.

Tabela 1. Wartości napięcia wyjściowego - U_{wy} i współczynnika wzmocnienia napięciowego wzmacniacza - k_U , w funkcji częstotliwości sygnału wejściowego - f . ($R_0=20$ k Ω , $R_1=2$ k Ω)

f [kHz]	0.01	0.1	0.316	1.0	3.16	10.0	31.6	100.0	316.0	1000.0	3160.0
U_{wy} [V]											
$k_U = U_{wy} / U_{we}$											
Δk_U											

- 4) Z badać działanie wzmacniacza dla innej wartości wzmocnienia napięciowego. W tym celu zmienić wartość opornika R_0 z 20 k Ω na 2 k Ω . Powtórzyć pomiary opisane w punktach 2 i 3. Wyniki pomiarów przedstawić w postaci tabeli (Tabela 2).

Tabela 2. Wartości napięcia wyjściowego - U_{wy} i współczynnika wzmocnienia napięciowego wzmacniacza - k_U , w funkcji częstotliwości sygnału wejściowego - f . ($R_0=2$ k Ω , $R_1=2$ k Ω)

f [kHz]	0.01	0.1	0.316	1.0	3.16	10.0	31.6	100.0	316.0	1000.0	3160.0
U_{wy} [V]											
$k_U = U_{wy} / U_{we}$											
Δk_U											

Zebrane wyniki dla obu serii pomiarowych przedstawić w postaci wspólnego wykresu (patrz rysunek 4). Częstotliwość odkładać w skali logarytmicznej.

Z prostoliniowych części obu charakterystyk wyznaczyć średnie wartości współczynnika wzmocnienia napięciowego k_U , oraz oszacować ich niepewności.

Następnie porównać je z wartościami obliczonymi z zależności $k_U = - R_0 / R_1$, przyjmując $R_0 = 20$ k Ω (oraz 2 k Ω), $R_1 = 2$ k Ω oraz tolerancję elementów 10%

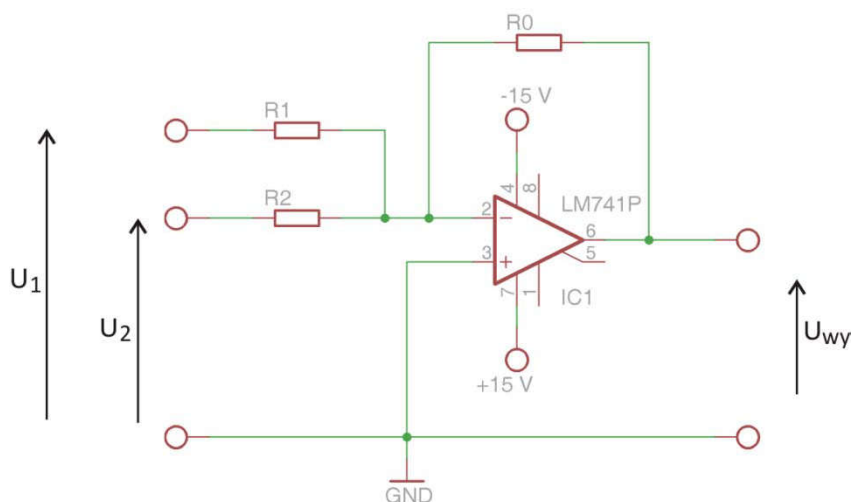
Tolerancja - określa maksymalne dopuszczalne odchyłki, wyrażone w procentach wartości znamionowej.

- 5) Korzystając z wykonanych wykresów współczynnika wzmocnienia napięciowego - k_U w funkcji częstotliwości sygnału wejściowego - f , wyznaczyć metodą graficzną dla obu przypadków:
- wartości górnej częstotliwości granicznej - f_g ,
 - wyznaczyć pasmo przenoszenia wzmacniacza: $B = f_g$,
 - sprawdzić spełnienie zależności $k_U B = \text{const}$.
- Oszacować błędy wyznaczonych wartości.

2. WZMACNIACZ SUMUJĄCY.

Badanie działania układu wzmacniacza sumującego będzie polegało na sumowaniu różnych sygnałów o jednakowych częstotliwościach. Wykorzystany będzie sygnał prostokątny TTL (sygnał o polaryzacji dodatniej i stałej amplitudzie) oraz sygnały przemienne: sinusoidalny, trójkątny i prostokątny o regulowanej amplitudzie.

- 1) Korzystając z zestawu elementów elektronicznych oraz płytki prototypowej zbudować układ przedstawiony na rysunku poniżej:



Wykaz elementów:

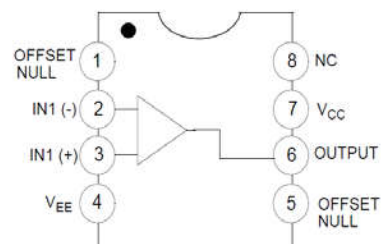
$$R_0 = 2 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = 2 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 2 \text{ k}\Omega$$

wzmacniacz operacyjny – układ LM741

Układ LM741 – wyprowadzenia pinów



- 2) Do wejścia pierwszego (rezystor R_1) układu wzmacniacza sumującego doprowadzić z generatora sygnał prostokątny TTL o częstotliwości 1 kHz, a do wejścia drugiego (rezystor R_2) układu wzmacniacza sumującego z tego samego generatora sygnał sinusoidalny o napięciu (międzyszczytowym) 4 V.

Zarejestrować (dokonać zrzutu z oscyloskopu) sygnały wejściowe i sygnał wyjściowy wzmacniacza, zwracając uwagę na zależności fazy między sygnałami. Aby uzyskać zarejestrowany komplet trzech sygnałów (dwa sygnały wejściowe i sygnał wyjściowy), najpierw zarejestrować oba sygnały wejściowe, a potem nie zmieniając nastaw oscyloskopu, sinusoidalny sygnał wejściowy i sygnał wyjściowy.

- 3) Do wejścia pierwszego (rezystor R_1) układu wzmacniacza sumującego doprowadzić z generatora sygnał prostokątny TTL o częstotliwości 1 kHz, a do wejścia drugiego (rezystor R_2) układu wzmacniacza sumującego z tego samego generatora sygnał trójkątny o napięciu (międzyszczytowym) 4 V.

Zarejestrować (dokonać zrzutu z oscyloskopu) sygnały wejściowe i sygnał wyjściowy wzmacniacza, zwracając uwagę na zależności fazy między sygnałami. Aby uzyskać zarejestrowany komplet trzech sygnałów (dwa sygnały wejściowe i sygnał wyjściowy) najpierw zarejestrować oba sygnały wejściowe, a potem nie zmieniając nastaw oscyloskopu trójkątny

sygnał wejściowy i sygnał wyjściowy. Zmieniając wartość napięcia sygnału trójkątnego zaobserwować zmiany sygnału wyjściowego wzmacniacza.

- 4) Do wejścia pierwszego (rezystor R_1) układu wzmacniacza sumującego doprowadzić z generatora sygnał prostokątny TTL o częstotliwości 1 kHz, a do wejścia drugiego (rezystor R_2) układu wzmacniacza sumującego z tego samego generatora sygnał prostokątny o napięciu (międzyszczytowym) 4 V.

Zarejestrować (dokonać zrzutu z oscyloskopu) sygnały wejściowe i sygnał wyjściowy wzmacniacza, zwracając uwagę na zależności fazowe między sygnałami. Aby uzyskać zarejestrowany komplet trzech sygnałów (dwa sygnały wejściowe i sygnał wyjściowy) najpierw zarejestrować oba sygnały wejściowe, a potem nie zmieniając nastaw oscyloskopu prostokątny sygnał wejściowy i sygnał wyjściowy.

Dla powyższych sygnałów prostokątnych wykonać pomiary wartości napięć międzyszczytowych sygnałów wejściowych oraz sygnału wyjściowego.

Oszacować błędy zmierzonych wartości.

Obliczyć wartości wag w_1 i w_2 oraz oszacować ich błędy wynikające z przyjętej tolerancję elementów 10%.

Sprawdzić spełnienie zależności $U_{wy} = - [w_1 U_1 + w_2 U_2]$.

Zmieniając wartość napięcia sygnału prostokątnego zaobserwować zmiany sygnału wyjściowego wzmacniacza.

LITERATURA

1. U. Tietze, C. Schenk " Układy półprzewodnikowe" Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 2009
2. R. Śledziwski "Elektronika dla fizyków" Państwowe Wydawnictwo Naukowe 1984
3. T. Stacewicz, A. Kotlicki "Elektronika w laboratorium naukowym" Państwowe Wydawnictwo Naukowe 1994
4. Z. Kulka, M. Nadachowski "Linowe układy scalone" Wydawnictwa Komunikacji i Łączności 1979
5. M. Nadachowski, Z. Kulka "Analogowe układy scalone" Wydawnictwa Komunikacji i Łączności 1985
6. Ch. Platt "Elektronika - Od praktyki do teorii" Wydawnictwo Helion 2013
7. A. Bielski, R. Ciuryło "Podstawy metod opracowania pomiarów" Wydawnictwo Uniwersytetu Mikołaja Kopernika 2001