

Wzmacniacze operacyjne

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z podstawowymi zastosowaniami wzmacniaczy operacyjnych do przetwarzania sygnałów analogowych.

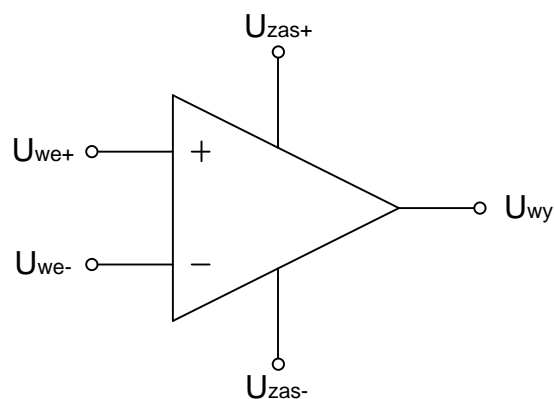
2. Wymagane informacje

Podstawowe parametry wzmacniaczy (wzmocnienie, pasmo), zasada działania układów różniczkujących, całkujących, sumujących, obsługa przyrządów pomiarowych.

3. Wprowadzenie teoretyczne

Historycznie, nazwa „operacyjny” odnosi się do zamierzonych czasów w elektronice, kiedy wzmacniacze te były stosowane w analogowych maszynach liczących (jeszcze przed erą komputerów) do wykonywania różnych operacji matematycznych, np. dodawania, odejmowania, mnożenia, całkowania i różniczkowania.

Nie wnikając w szczegóły, wzmacniacz operacyjny o symbolu przedstawionym na Rys.1 wykonywany jest obecnie jako struktura scalona składająca się z dziesiątek tranzystorów. W najprostszym rozwiązaniu posiada on dwa zaciski wejściowe U_{we+} i U_{we-} oraz jeden wyjściowy U_{wy} . Do podłączenia napięć zasilających wykorzystuje się zaciski U_{zas+} i U_{zas-} .



Rys.1. Symbol wzmacniacza operacyjnego.

Bez dodatkowych elementów zewnętrznych układ z Rys.1 realizuje funkcję:

$$U_{wy} = K_r(U_{we+} - U_{we-})$$

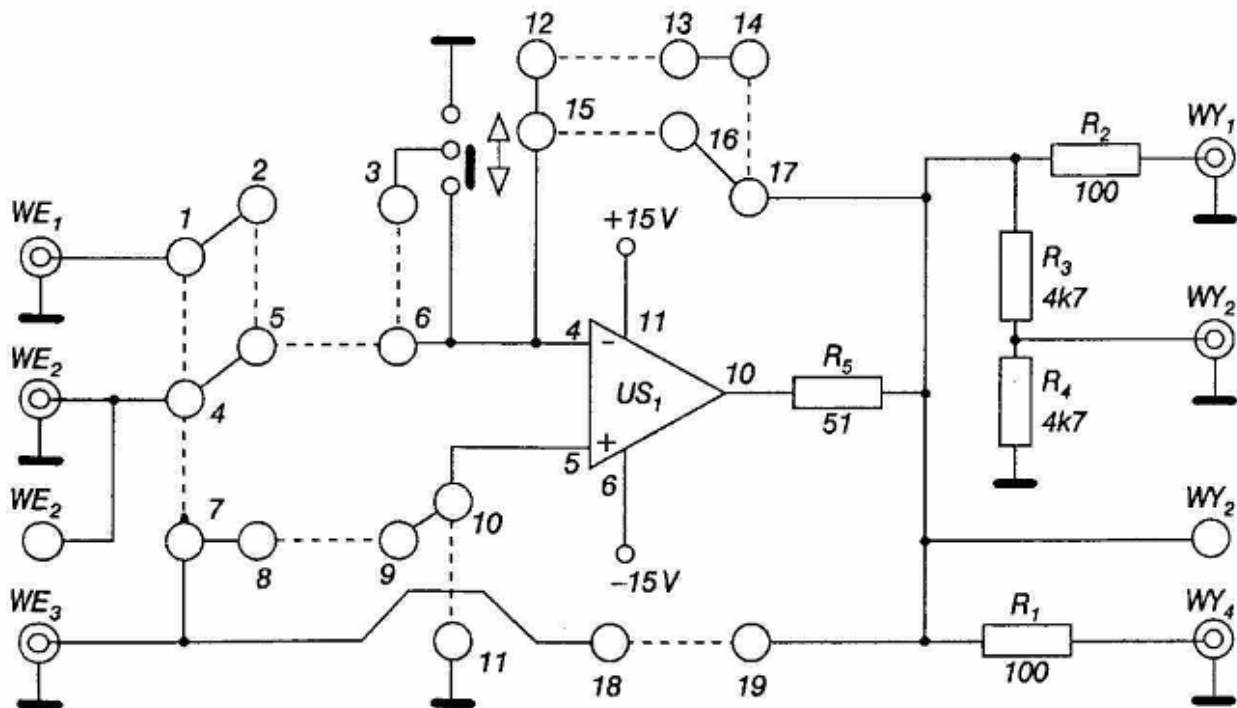
gdzie K_r jest wzmocnieniem różnicowym wzmacniacza i $K_r \rightarrow \infty$.

W praktyce wzmacniacz operacyjny wykorzystuje się prawie zawsze w konfiguracji z pętlą ujemnego sprzężenia zwrotnego, dzięki czemu otrzymujemy ciekawe rozwiązania układowe będące bezpośrednim i łatwym

przełożeniem zapisów funkcji matematycznych (co można w prosty sposób udowodnić wykorzystując teorię obwodów). Bardzo duże wzmocnienie wzmacniacza z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego sprawia, że parametry badanych poniżej układów zależą w znacznie większej mierze od elementów toru sprzężenia niż od samego wzmacniacza.

4. Budowa układu pomiarowego

W ćwiczeniu wykorzystany zostanie model dydaktyczny DWO1 ze wzmacniaczem operacyjnym do realizacji różnych wariantów układowych. Schemat modelu wkładki DWO1 przedstawiony jest na Rys.2. Zawiera on popularny wzmacniacz operacyjny $\mu A741$ oraz 19 zacisków pozwalających na dołączanie różnych elementów zewnętrznych: rezystorów, kondensatorów, zwór. Napięcia zasilania $+15V$ i $-15V$ są trwale podłączone do wzmacniacza operacyjnego (o ile wkładka DWO1 znajduje się w kasecie lub podłączona jest przez przedłużacz).

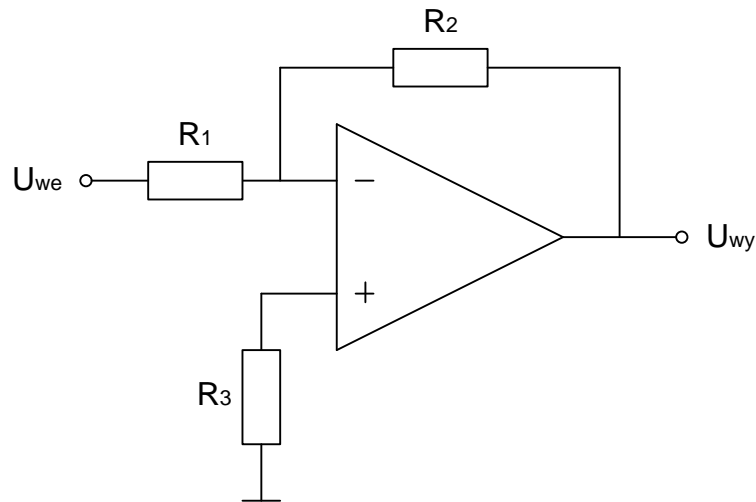


Rys.2. Schemat wkładki DWO1.

5. Wykonanie ćwiczenia

5.1. Badanie wzmacniacza odwracającego

Schemat wzmacniacza odwracającego realizującego funkcję $U_{wy} = -\frac{R_2}{R_1} U_{we}$ przedstawiony jest na Rys.3.



Rys.3. Schemat wzmacniacza odwracającego opartego o wzmacniacz operacyjny.

Rezystor R_3 nie bierze udziału w realizacji funkcji, ale zapewnia zmniejszenie niekorzystnego wpływu prądów niezrównoważenia. Jego wartość powinna w przybliżeniu być równa wartości rezystancji wynikającej z równoległego połączenia R_1 i R_2 . Aby zrealizować wzmacniacz odwracający za pomocą wkładki DWO1, należy przeprowadzić następujące czynności montażowe:

- przełącznik suwakowy przełączyć w pozycję dolną (jeżeli patrzymy na płytkę DWO1 od strony elementów, tak jak na Rys.2),
- rezystor $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ umieścić między zaciskami 15 i 16,
- rezystor $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ umieścić między zaciskami 2 i 3,
- rezystor $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$ umieścić między zaciskami 10 i 11,
- umieścić model DWO1 w kasecie lub połączyć z kasetą za pomocą kabla przedłużającego,
- połączyć wyjście generatora z oscyloskopem kablem BNC i ustawić napięcie o amplitudzie 100 mV i częstotliwości 100 Hz a za pomocą trójnika podłączyć ustawiony sygnał również do wejścia WE1 modelu DWO1,
- wyjście WY1 modelu DWO1 podłączyć kablem BNC do wejścia CH2 oscyloskopu.

Przeprowadzić następujące obserwacje i zanotować je w sprawozdaniu:

- a) zaobserwować na ekranie oscyloskopu w trybie pracy dwukanałowej przebiegi napięcia U_{we} i U_{wy} oraz określić wzmocnienie,
- b) przełączyć oscyloskop w tryb pracy XY. Wyjaśnić co przedstawia wykres na ekranie oscyloskopu i wyznaczyć wzmocnienie w tym przypadku,
- c) obliczyć teoretyczne wzmocnienie dla układu z podanego wzoru,
- d) wyjaśnić w czym przejawia się znak „-” ze wzoru na wykresach czasowych na oscyloskopie,
- e) zaobserwować zmianę kształtu charakterystyki w trybie XY podczas zwiększania częstotliwości. Wyjaśnić czym przejawia się ta zmiana w przebiegach czasowych po powrocie do dziedziny czasu,
- f) wrócić do częstotliwości 100 Hz . Zakładając, że dla tej częstotliwości występuje maksymalne wzmocnienie układu, wyznaczyć częstotliwość górną f_g

wzmacniacza (analogicznie do ćwiczenia ze wzmacniaczy RC). Wyjaśnić dlaczego nie musimy wyznaczać w tym przypadku częstotliwości dolnej f_d ,

g) należy doprowadzić do przesterowania wzmacniacza (zjawisko znane ze wzmacniaczy RC). Wyjaśnić na ile sposobów można to teoretycznie uczynić,

h) wymienić rezystor $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ na $51 \text{ k}\Omega$ i powtórzyć poprzednie punkty,

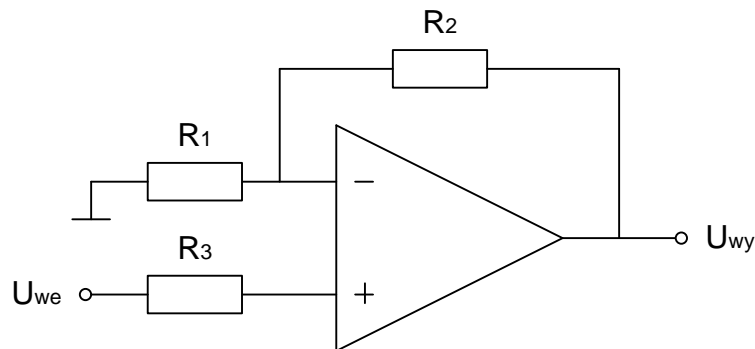
i) jakie można wysnuć wnioski przy porównaniu iloczynu wzmocnienia i częstotliwości górnych dla poszczególnych przypadków.

5.2. Badanie wzmacniacza nieodwracającego

Schemat wzmacniacza nieodwracającego realizującego funkcję

$$U_{wy} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) U_{we}$$

przedstawiony jest na Rys.4.



Rys.4. Schemat wzmacniacza nieodwracającego opartego o wzmacniacz operacyjny.

Aby zrealizować wzmacniacz nieodwracający za pomocą wkładki DWO1, należy przeprowadzić następujące czynności montażowe:

- przełącznik suwakowy przełączyć w pozycję górną,
- rezystor $R_2 = 51 \text{ k}\Omega$ umieścić między zaciskami 15 i 16,
- rezystor $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ umieścić między zaciskami 3 i 6,
- rezystor $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$ umieścić między zaciskami 8 i 9,
- połączyć wyjście generatora z oscyloskopem kablem BNC i ustawić napięcie o amplitudzie 100 mV i częstotliwości 100 Hz ,
- za pomocą trójnika podłączyć ustawiony sygnał również do wejścia WE3 modelu DWO1,
- wyjście WY1 modelu DWO1 podłączyć kablem BNC do wejścia CH2 oscyloskopu.

Przeprowadzić następujące obserwacje i zanotować je w sprawozdaniu:

a) zaobserwować na ekranie oscyloskopu w trybie pracy dwukanałowej przebiegi napięcia U_{we} i U_{wy} oraz określić wzmocnienie,

b) przełączyć oscyloskop w tryb pracy XY. Wyjaśnić co przedstawia wykres na ekranie oscyloskopu tym razem. W którą stronę zwrócona jest charakterystyka, co to oznacza, jakie odczytujemy wzmocnienie,

c) obliczyć teoretyczne wzmocnienie dla układu ze wzoru,

d) zaobserwować zmianę kształtu charakterystyki w trybie XY podczas zwiększania częstotliwości. Czym przejawia się ta zmiana w przebiegach czasowych po powrocie do dziedziny czasu,

e) wracamy do częstotliwości 100 Hz. Zakładając, że dla tej częstotliwości występuje maksymalne wzmocnienie układu, wyznaczyć częstotliwość górną f_g wzmacniacza (analogicznie do ćwiczenia ze wzmacniaczy RC). Wyjaśnić dlaczego nie musimy wyznaczać w tym przypadku częstotliwości dolnej f_d ,

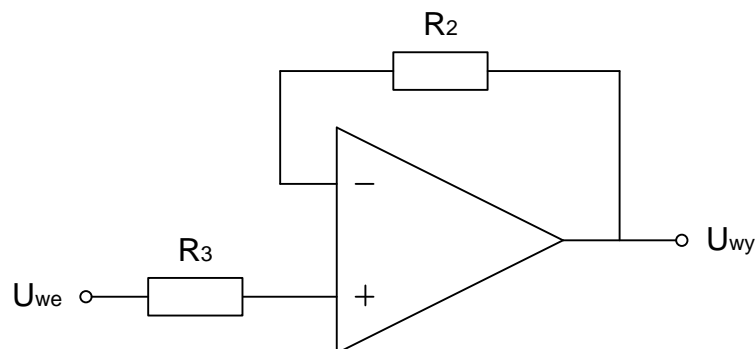
f) należy doprowadzić do przesterowania wzmacniacza (zjawisko znane ze wzmacniaczy RC). Na ile sposobów możemy to uczynić teoretycznie,

g) wymienić rezystor $R_2 = 51 \text{ k}\Omega$ na $100 \text{ k}\Omega$ i powtórzyć poprzednie punkty.

h) jakie można wysnuć wnioski przy porównaniu iloczynu wzmocnienia i częstotliwości górnych dla poszczególnych przypadków.

5.3. Badanie wtórnika napięciowego

Schemat wtórnika napięciowego realizującego funkcję $U_{wy} = U_{we}$ przedstawiony jest na Rys.5.



Rys.5. Schemat wtórnika napięciowego opartego o wzmacniacz operacyjny.

Aby zrealizować wtórnik napięciowy za pomocą wkładki DWO1, należy przeprowadzić następujące czynności montażowe:

- przełącznik suwakowy przełączyć w pozycję górną,
- rezystor $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ umieścić między zaciskami 15 i 16,
- rezystor $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$ umieścić między zaciskami 8 i 9,
- połączyć wyjście generatora z oscyloskopem kablem BNC i ustawić napięcie o amplitudzie 1V i częstotliwości 100 Hz,
- za pomocą trójnika podłączyć ustawiony sygnał również do wejścia WE3 modelu DWO1,
- wyjście WY1 modelu DWO1 podłączyć kablem BNC do wejścia CH2 oscyloskopu.

Przeprowadzić następujące obserwacje i zanotować je w sprawozdaniu:

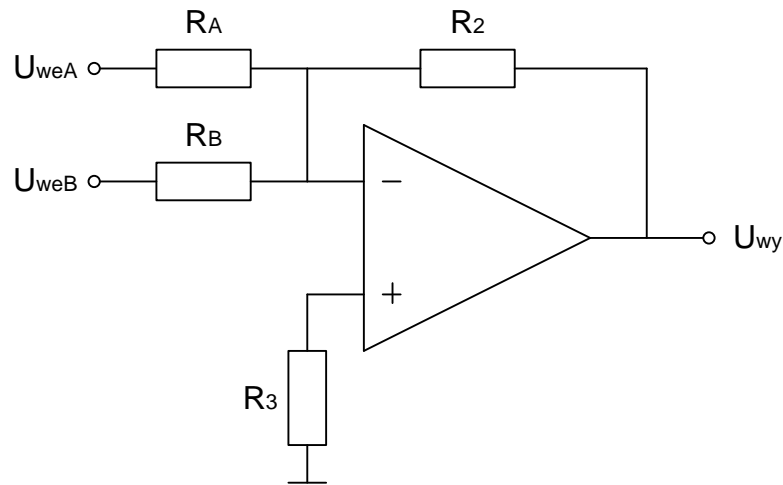
a) zaobserwować na ekranie oscyloskopu w trybie pracy dwukanałowej przebiegi napięcia U_{we} i U_{wy} i określić wzmocnienie,

b) przełączyć oscyloskop w tryb pracy XY. Wyjaśnić co przedstawia wykres na ekranie oscyloskopu tym razem. Jaka jest różnica między charakterystykami przejściowymi wzmacniacza nieodwracającego i wtórnika. Wyjaśnić czy nazwa „wtórnik” jest adekwatna dla badanego układu.

c) wyjaśnić gdzie znajdują zastosowanie wtórniki napięciowe.

5.4. Badanie sumatora

Schemat sumatora realizującego funkcję
$$U_{wy} = -\left(\frac{R_2}{R_A}U_{weA} + \frac{R_2}{R_B}U_{weB}\right)$$
 przedstawiony jest na Rys.6.



Rys.6. Schemat układu dodającego opartego o wzmacniacz operacyjny.

Aby zrealizować sumator za pomocą wkładki DWO1, należy przeprowadzić następujące czynności montażowe:

- przełącznik suwakowy przełączyć w pozycję dolną,
- rezystor $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ umieścić między zaciskami 15 i 16,
- rezystor $R_3 = 10 \text{ k}\Omega$ umieścić między zaciskami 10 i 11,
- rezystor $R_A = 10 \text{ k}\Omega$ umieścić między zaciskami 2 i 3,
- rezystor $R_B = 1 \text{ k}\Omega$ umieścić między zaciskami 5 i 6,
- połączyć przewodami BNC wyjścia generatora z wejściami modelu DWO1, odpowiednio: „sinus” z WE1, „trapez” z WE2 (wcześniej można sprawdzić poszczególne przebiegi z wyjść generatora na CH1 oscyloskopu),
- wyjście WY1 modelu DWO1 podłączyć kablem BNC do wejścia CH2 oscyloskopu.

Przeprowadzić następujące obserwacje i zanotować je w sprawozdaniu:

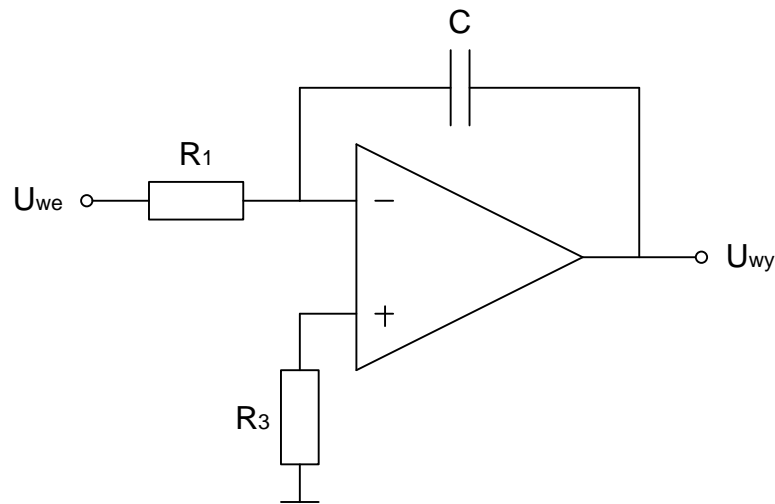
a) zaobserwować na ekranie oscyloskopu kształt sygnału z wyjścia sumatora, wyjaśnić czy takiego efektu należało oczekiwać. Można dobrać tak amplitudy „sinusa” i „trapezu” aby otrzymać „ładny” efekt wizualny,

b) wyjaśnić dlaczego stabilny obraz na oscyloskopie otrzymuje się przy synchronizacji do przebiegu o mniejszej częstotliwości (poprosić prowadzącego o demonstrację tego zjawiska). Ile wynosi różnica częstotliwości między „sinus” i „trapez”,

c) z pomocą prowadzącego dokonać sumowania tych samych przebiegów za pomocą oscyloskopu. Zastanowić się jaką techniką może być dokonywane sumowanie w oscyloskopie.

5.5. Badanie układu całkującego

Schemat układu całkującego realizującego funkcję $U_{wy} = -\frac{1}{R_1 C} \int U_{we} dt$ przedstawiony jest na Rys.7.



Rys.7. Schemat układu całkującego opartego o wzmacniacz operacyjny.

Aby zrealizować układ całkujący za pomocą wkładki DWO1, należy przeprowadzić następujące czynności montażowe:

- przełącznik suwakowy przełączyć w pozycję dolną,
- kondensator $C = 680 \text{ pF}$ umieścić między zaciskami 15 i 16,
- rezystor $R_1 = 39 \text{ k}\Omega$ umieścić między zaciskami 2 i 3,
- rezystor $R_3 = 39 \text{ k}\Omega$ umieścić między zaciskami 10 i 11,
- umieścić model DWO1 w kasecie lub połączyć z kasetą za pomocą kabla przedłużającego,
- połączyć przewodem BNC wyjście generatora funkcyjnego z wejściem CH1 oscyloskopu i ustawić przebieg napięcia prostokątnego o amplitudzie $\pm 100 \text{ mV}$ i częstotliwości 100 Hz ,
- za pomocą trójnika podłączyć ustawiony sygnał również do wejścia WE1 modelu DWO1,
- wyjście WY1 modelu DWO1 podłączyć kablem BNC do wejścia CH2 oscyloskopu.

Przeprowadzić następujące obserwacje i zanotować je w sprawozdaniu:

a) zaobserwować na ekranie oscyloskopu przebiegi napięć U_{we} i U_{wy} . Wyjaśnić czy takiego kształtu napięcia U_{wy} należało oczekiwać,

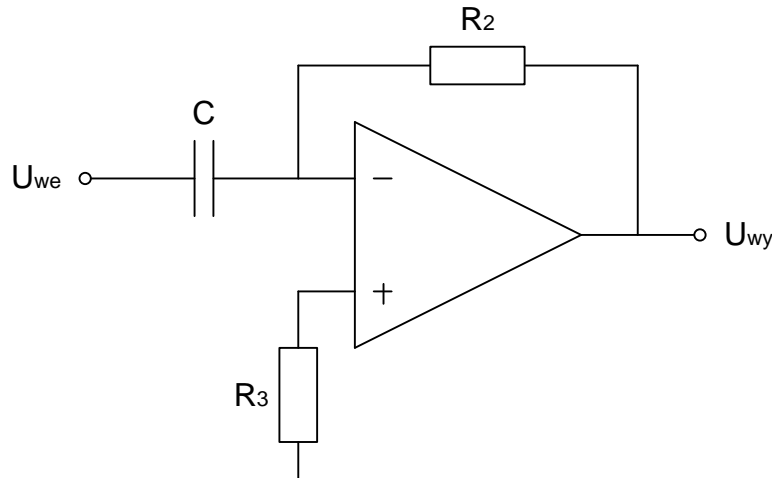
b) zmieniając amplitudę, częstotliwość i składową stałą przebiegu napięcia U_{we} zaobserwować zmiany przebiegu napięcia U_{wy} . Odrysować kilka przebiegów, sformułować wnioski. Zastanowić się czy istnieją i jeśli tak to z czego mogą wynikać ograniczenia operacji całkowania,

c) podać z generatora funkcyjnego na WE1 wkładki DWO1 przebieg napięcia sinusoidalnego o amplitudzie $\pm 100 \text{ mV}$ i częstotliwości 100 Hz . Zanotować otrzymany kształt przebiegu napięcia U_{wy} . Wyjaśnić czy tego oczekiwano,

d) podać z generatora funkcyjnego na WE1 wkładki DWO1 przebieg napięcia trójkątnego o amplitudzie ± 100 mV i częstotliwości 100 Hz. Zanotować otrzymamy kształt przebiegu napięcia U_{wy} . Wyjaśnić czy tego oczekiwano.

5.6. Badanie układu różniczkującego

Schemat układu różniczkującego realizującego funkcję $U_{wy} = -R_2 C \frac{dU_{we}}{dt}$ przedstawiony jest na Rys.8.



Rys.8. Schemat układu różniczkującego opartego o wzmacniacz operacyjny.

Aby zrealizować układ różniczkujący za pomocą wkładki DWO1, należy przeprowadzić następujące czynności montażowe:

- przełącznik suwakowy przełączyć w pozycję dolną,
- kondensator $C = 680$ pF umieścić między zaciskami 2 i 3,
- rezystor $R_2 = 39$ k Ω umieścić między zaciskami 15 i 16,
- rezystor $R_3 = 39$ k Ω umieścić między zaciskami 10 i 11,
- umieścić model DWO1 w kasecie lub połączyć z kasetą za pomocą kabla przedłużającego,
- połączyć przewodem BNC wyjście generatora funkcyjnego z wejściem CH1 oscyloskopu i ustawić przebieg napięcia trójkątnego o amplitudzie ± 100 mV i częstotliwości 100 Hz,
- za pomocą trójnika podłączyć ustawiony sygnał również do wejścia WE1 modelu DWO1,
- wyjście WY1 modelu DWO1 podłączyć kablem BNC do wejścia CH2 oscyloskopu.

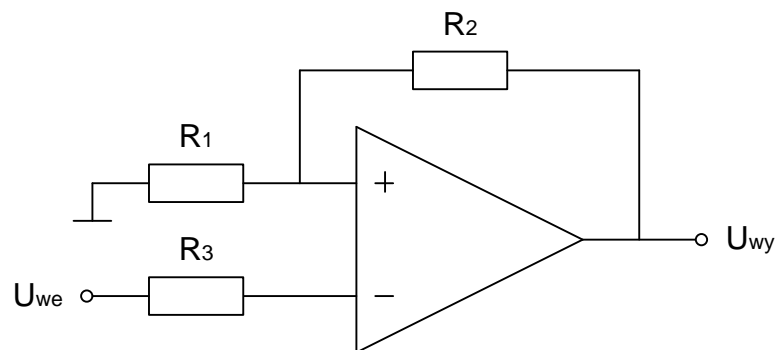
Przeprowadzić następujące obserwacje i zanotować je w sprawozdaniu:

- a) zaobserwować na ekranie oscyloskopu przebiegi napięć U_{we} i U_{wy} . Wyjaśnić czy takiego kształtu napięcia U_{wy} należało oczekiwać,
- b) zmieniając amplitudę, częstotliwość i składową stałą przebiegu napięcia U_{we} zaobserwować zmiany przebiegu napięcia U_{wy} . Odrysować kilka przebiegów, sformułować wnioski,

c) podać z generatora funkcyjnego na WE1 wkładki DWO1 przebieg napięcia sinusoidalnego o amplitudzie ± 100 mV i częstotliwości 100 Hz. Zanotować otrzymamy kształt przebiegu napięcia U_{wy} . Wyjaśnić czy tego oczekiwano?

5.7. Badanie przerzutnika Schmitta

Schemat przerzutnika Schmitta o punktach przełączania $U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2}(U_{zas-} - U_{sat})$ i $U_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2}(U_{zas+} - U_{sat})$ oraz szerokości pętli histerezy $P = U_2 - U_1$ przedstawiony jest na Rys.9. Jest to jedyny w tym ćwiczeniu przykład wykorzystania wzmacniacza operacyjnego do realizacji układu nieliniowego, poprzez zastosowanie dodatniego sprzężenia zwrotnego. Należy zwrócić uwagę na subtelna różnicę między Rys.9 i Rys.4 oraz wynikające z tego konsekwencje zupełnie różnego działania opisywanych nimi układów.



Rys.9. Schemat przerzutnika Schmitta.

Aby zrealizować przerzutnik Schmitta za pomocą wkładki DWO1, należy przeprowadzić następujące czynności montażowe:

- przełącznik suwakowy przełączyć w pozycję dolną,
- rezystor $R_2 = 51$ k Ω umieścić między zaciskami 18 i 19,
- rezystor $R_1 = 1$ k Ω umieścić między zaciskami 10 i 11,
- rezystor $R_3 = 1$ k Ω umieścić między zaciskami 2 i 3,
- zaciski 8 i 9 zewrzeć zworką,
- połączyć wyjście generatora funkcyjnego z wejściem CH1 oscyloskopu i ustawić przebieg trójkątny o amplitudzie ± 3 V i częstotliwości 100 Hz,
- za pomocą trójnika podłączyć ustawiony sygnał również do wejścia WE1 modelu DWO1,
- wyjście WY1 modelu DWO1 podłączyć kablem BNC do wejścia CH2 oscyloskopu.

Przeprowadzić następujące obserwacje i zanotować je w sprawozdaniu:

- a) zaobserwować na ekranie oscyloskopu przebiegi napięć U_{we} i U_{wy} . Wyjaśnić czy takiego kształtu napięcia U_{wy} należało oczekiwać,
- b) przełączyć oscyloskop w tryb XY, przerysować otrzymaną charakterystykę, określić napięcia przełączania i szerokość pętli histerezy,
- c) zmienić wartość rezystora $R = 1$ k Ω na 10 k Ω . Wyjaśnić jak zmieni się szerokość pętli histerezy,

- d) podać z generatora na wejście przerzutnika Schmitta przebieg sinusoidalny o częstotliwości 100 Hz i amplitudzie 2 V. Wyjaśnić czy takiego kształtu przebiegu spodziewano się na wyjściu,
- e) zastanowić się gdzie może znaleźć zastosowanie powyższy układ.

6. Opracowanie wyników

W sprawozdaniu z ćwiczenia należy:

- narysować schematy badanych układów,
- zamieścić zaobserwowane przebiegi oscyloskopowe,
- wyznaczyć wzmocnienie napięciowe wzmacniacza oraz inne parametry wymienione w instrukcji i porównać je z wartościami teoretycznymi,
- wyciągnąć wnioski.

7. Literatura

- [1] U. Tietze, Ch. Schenk „Układy półprzewodnikowe”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996, Rozdział 7 „Wzmacniacze operacyjne” (s. 141-157)
- [2] P. Horowitz, W. Hill „Sztuka elektroniki. Część 1.”, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1995, Rozdziały 4.01-4.06 (s. 186194)