

Wydział Fizyki UW

**Pracownia elektroniczna dla nanoinżynierii
(1100-2INZ25)**

Ćwiczenie C3

Wzmacniacze operacyjne

Streszczenie

W tym ćwiczeniu zapoznajemy się z ważną klasą analogowych układów elektronicznych – wzmacniaczy operacyjnych. Korzystać będziemy z układu scalonego typu $\mu A741$, który przez wiele lat był jednym z najbardziej rozpowszechnionych wzmacniaczy operacyjnych o uniwersalnym zastosowaniu. Obecnie jest on zastępowany przez bardziej nowoczesne konstrukcje. W ćwiczeniu zmierzone zostaną wzmocnienie i charakterystyki częstotliwościowe układów ze wzmacniaczem operacyjnym, w których zastosowano sprzężenie zwrotne. Badać będziemy układy całkujące i różniczkujące wykorzystujące wzmacniacze operacyjne.

Wstęp

Wzmacniacz operacyjny to układ scalony, silnie wzmacniający, o bardzo uniwersalnych zastosowaniach.

Wzmacniacz operacyjny posiada dwa wejścia: nieodwracające i odwracające, oznaczane U_+ i U_- . Natomiast na wyjściu daje napięcie: $U_{wy} = A_U \cdot (U_+ - U_-)$, gdzie współczynnik A_U nosi nazwę wzmocnienia napięciowego. Wzmocnienie napięciowe wzmacniacza operacyjnego jest bardzo duże, w założeniach nieskończone. W praktyce osiąga wartości $10^5 - 10^7$, co oznacza, że wystarczy napięcie wejściowe 1 - 100 μV , aby osiągnąć napięcie wyjściowe 10 V. Wzmacniacz posiada bardzo dużą oporność wejściową, rzędu $10^6 - 10^{13} \Omega$, to znaczy prąd wpływający przez wejścia U_+ oraz U_- jest bardzo mały, nawet poniżej pikoampera. Wzmacniacz posiada bardzo mały opór wyjściowy, to znaczy napięcie wyjściowe U_{wy} prawie nie zależy od prądu wpływającego z wyjścia.

Własności układów budowanych z użyciem wzmacniaczy operacyjnych kształtuje się poprzez stosowanie sprzężenia zwrotnego. Sprzężenie zwrotne to takie połączenie obwodów wyjściowego i wejściowego dla pojedynczego wzmacniacza, w którym część sygnału wyjściowego trafia z powrotem do wejścia tego wzmacniacza. Jest to konstrukcja bardzo często wykorzystywana w elektronice np. do stabilizowania własności układu. Sprzężenie zwrotne w technice jest podstawą metod regulacji, to znaczy takiego sterowania układem, aby na jego wyjściu określony parametr zmieniał się w zadany sposób, w szczególności, aby nie zmieniał się w czasie. Przykładem takiej regulacji może być utrzymywanie stałej temperatury wymaganej w reaktorze chemicznym w przeprowadzanych reakcjach chemicznych lub w pewnym procesie technologicznym. Odbывается to poprzez wykorzystanie sygnału pomiarowego (np. temperatury mierzonej poprzez pomiar napięcia z termopary) do sterowania zasilaczem o zmiennej mocy wyjściowej dostarczającym moc grzejącą do tego reaktora. Wzmacniacze operacyjne doskonale obrazują zasadę sprzężenia zwrotnego, której będziemy się przyglądać w tym ćwiczeniu.

Jeśli część sygnału wyjściowego U_{wy} jest podawana na wejście odwracające U_- wzmacniacza operacyjnego, to wzmocnienie wynikowe ulega zmniejszeniu (mówimy wtedy o sprzężeniu zwrotnym ujemnym). Stosując w sprzężeniu zwrotnym obwody RLC można kształtować zależność napięcia wyjściowego od częstotliwości. Można budować w ten sposób tak zwane filtry aktywne. Jednocześnie mogą to być układy różniczkujące lub całkujące, zgodnie z zasadami poznanymi wcześniej przy ćwiczeniach B1 i B2.

Gdy część sygnału wyjściowego jest podawana na wejście nieodwracające U_+ , to wzmocnienie wynikowe układu ulega znacznemu zwiększeniu i układ może wzbudzać się samoczynnie, to znaczy generować sygnały zmienne na wyjściu – mówimy wtedy o sprzężeniu zwrotnym dodatnim. W ten sposób można budować generatory dające przebiegi zmienne, na przykład sygnał prostokątny lub sinusoidalny. W poniższym ćwiczeniu będziemy wykorzystywać tylko sprzężenie zwrotne ujemne.

Dwa podstawowe układy ze wzmacniaczem operacyjnym to: (1) wzmacniacz odwracający (fazę), przedstawiony dalej na rys. 1 oraz wzmacniacz nieodwracający (fazy) przedstawiony na rys. 2. Wzmocnienie napięciowe układów z rys. 1 i rys. 2 można zdefiniować jako:

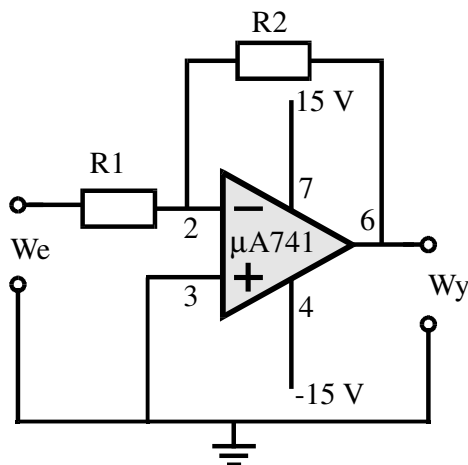
$$K = U_{wy}/U_{we}. \quad (1)$$

Sposób analizy działania tych wzmacniaczy jest następujący:

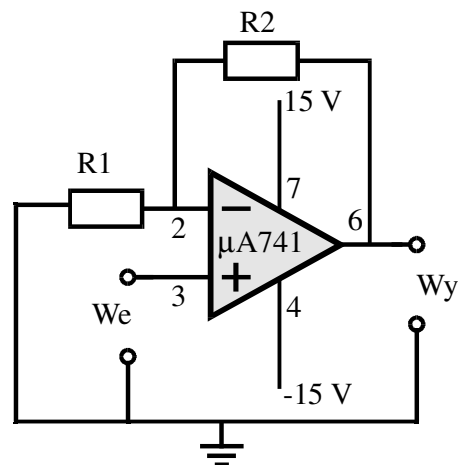
- (1) Wzmacniacz odwracający – rys. 1: Napięcie wejścia U_+ jest równe 0 V (podłączenie do masy). Jeżeli na wejściu U_- pojawi się jakiegokolwiek napięcie, to wyjście natychmiast zareaguje podając napięcie przeciwnego znaku takie, aby napięcie U_- spadło do zera. Napięcia U_+ i U_- będą równe z dokładnością do mikrowoltów, czyli praktycznie zerowe. Zatem spadek napięcia na oporniku R1 równy jest U_{we} , a na oporniku R2 odpowiada U_{wy} . Ponieważ do wejścia wzmacniacza nie wpływa żaden znaczący prąd więc przez oba oporniki płynie ten sam prąd: $I = U_{we}/R1 = U_{wy}/R2$. A zatem wzmocnienie napięciowe wynosi:

$$U_{wy}/U_{we} = -R2/R1 \quad (2)$$

gdzie znak „-” opisuje fakt, że wzmacniacz taki odwraca znak napięcia.



Rys. 1. Przykład wzmacniacza odwracającego.



Rys. 2. Przykład układu nieodwracającego.

- (2) Wzmacniacz nieodwracający – rys. 2: na podobnej jak wyżej zasadzie, skoro w przybliżeniu zachodzi $U_+ = U_-$, to napięcie na wejściu odwracającym jest równe także U_{we} . Równanie na prąd będzie miało postać: $I = U_{we}/R1 = (U_{wy} - U_{we})/R2$. Przekształcając to równanie otrzymamy wzmocnienie napięciowe:

$$U_{wy}/U_{we} = 1 + R2/R1. \quad (3)$$

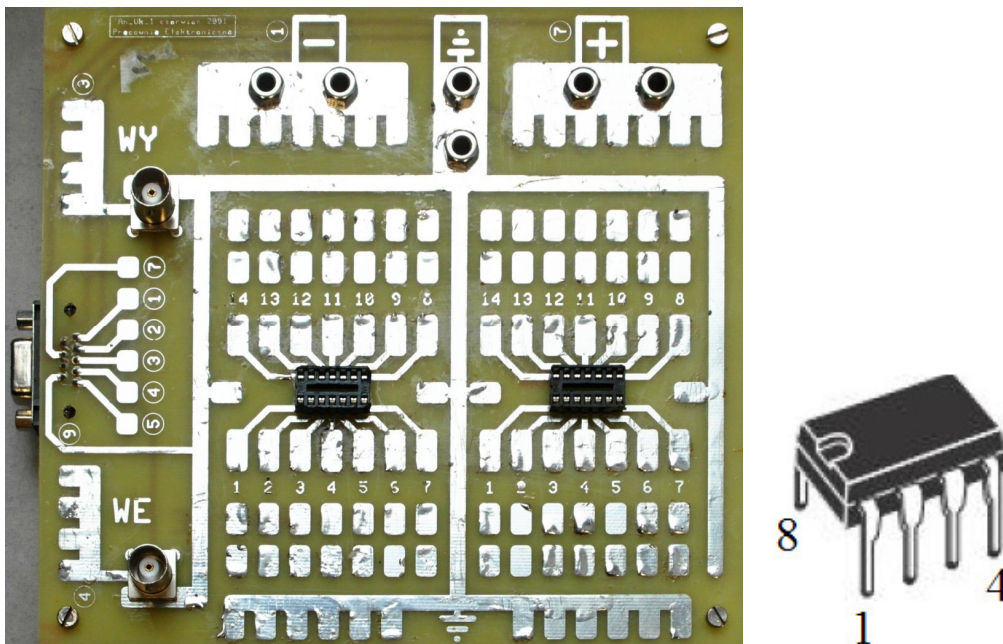
Jeśli w miejscach oporników są kondensatory lub indukcyjności, to we wzorach należy zastąpić oporności odpowiednimi impedancjami. Zastosowanie elementów impedancyjnych L i C pozwala kształtować charakterystyki częstotliwościowe takich wzmacniaczy.

Jeśli opornik R2 sprzężenia zwrotnego ujemnego (podaje część sygnału wyjściowego do wejścia odwracającego) zastąpimy (lub uzupełnimy) kondensatorem - rys. 5 poniżej, to otrzymany układ będzie filtrem dolnoprzepustowym, bo czym większa częstotliwość sygnału, tym mniejsza jest impedancja pojemnościowa sprzężenia ujemnego i więcej sygnału wyjściowego trafia z powrotem do wejścia, a to powoduje spadek wzmocnienia układu. Jednocześnie będzie to układ całkujący. Jeśli opornik R1 (w układzie wzmacniacza odwracającego z rys. 2) zastąpimy kondensatorem - rys. 6 poniżej, to dostajemy filtr górnoprzepustowy i jednocześnie układ różniczkujący.

Wykonanie ćwiczenia

Ćwiczenie wykonujemy na uniwersalnej płycie drukowanej z wlutowanymi podstawkami do układów scalonych i gniazdami połączeniowymi (rys. 3). Elementy elektroniczne: wzmacniacz operacyjny $\mu A741$, oporniki: 2 k Ω , 20 k Ω i 1,8 k Ω , kondensator 47 nF. Uwaga: najpierw lutujemy elementy zewnętrzne, a dopiero potem wkładamy układy scalone w podstawki.

Napięcie zmienne do wejść podajemy z generatora funkcyjnego, a pomiarów dokonujemy przy użyciu oscyloskopu cyfrowego, tak jak na poprzednich zajęciach.

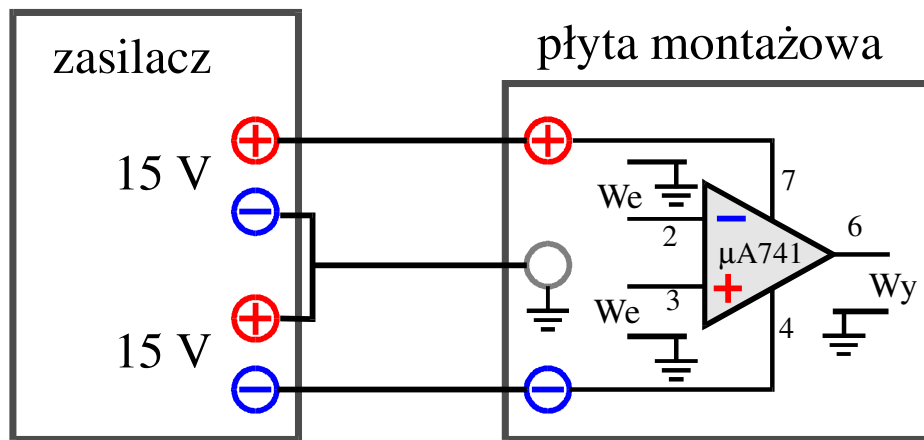


Rys. 3. Widok płyty montażowej (po lewej) i wzmacniacza $\mu A741$ (po prawej)

Badanie wzmacniacza operacyjnego $\mu A741$

Do wzmacniacza podłączamy symetryczne zasilanie z dwóch źródeł napięcia +15 V i -15 V. Dwa źródła zasilania łączymy do płytki montażowej według schematu na rys. 4. Należy zwrócić uwagę, że wzmacniacz $\mu A741$ nie ma wyprowadzenia (nóżki) „masy”. Wzmacniacz operacyjny zasilany z

dwu symetrycznych napięć po prostu nie potrzebuje masy dla poprawnej pracy. Wystarczy, że masa jest zdefiniowana dla napięć U_{we} i U_{wy} .



Rys. 4. Sposób podłączenia zasilania do wzmacniacza $\mu A741$ w badanym układzie pomiarowym (numery nóżek są podane dla obudowy ośmionóżkowej DIP8).

Budowane i badane będą układy proponowane przez asystenta. Każdy ze studentów ma zbudować i zbadać jeden z układów: odwracający lub nieodwracający oraz jeden z układów: różniczkujący lub całkujący.

1. Wzmacniacz odwracający i nieodwracający.

- W uzgodnieniu z asystentem wykonać układ wzmacniacza odwracającego według schematu z rys. 1 lub wzmacniacza nieodwracającego według schematu z rys. 2. Wykorzystujemy oporniki $R1 = 2 \text{ k}\Omega$ i $R2 = 20 \text{ k}\Omega$. Po sprawdzeniu połączeń i akceptacji przez asystenta można podłączyć układ do zasilania -15 V , $+15 \text{ V}$.
- Na wejście podać sygnał sinusoidalny $f = 1 \text{ kHz}$ i zmierzyć przy pomocy oscyloskopu zależność napięcia wyjściowego od wejściowego, w zakresie napięć U_{we} , międzyszczytowych od 0 do 5 V. W zakresie 2 - 3 V należy mierzyć gęściej. Należy zwrócić uwagę na fazę sygnału na wyjściu (czy jest zgodna, czy przeciwna do wejściowego). Obserwacje te należy porównać z wynikami kolegów budujących inny typ wzmacniacza.
- Na otrzymanym wykresie należy wyznaczyć zakres liniowości wzmacniacza, czyli zakres napięć wejściowych, dla których napięcie wyjściowe jest proporcjonalne do napięcia wejściowego. Podać maksymalne napięcie w tym zakresie. Dopasowując prostą do danych w zakresie liniowości, wyznaczyć wzmocnienie napięciowe K zdefiniowane wzorem (1).
- Dla napięcia wejściowego poniżej 1 V, zmierzyć pasmo przenoszenia wzmacniacza, czyli zakres częstotliwości, w którym wzmocnienie nie spada poniżej $1/\sqrt{2}$ maksymalnej wartości wzmocnienia. Pomiary należy wykonać w zakresie 1 – 200 kHz.

2. Układ całkujący

Rys. 5. Układ ze wzmacniaczem operacyjnym i pojemnością pracujący jako:

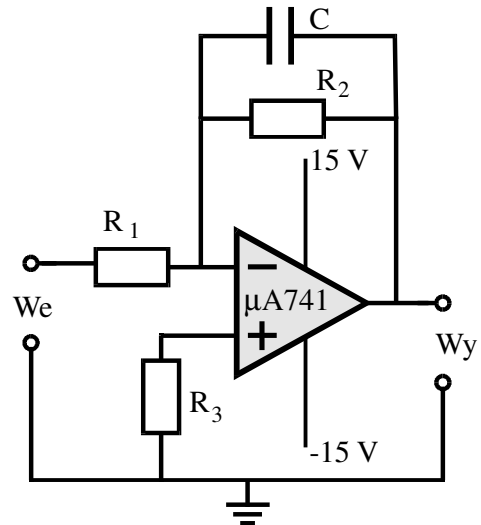
A) Układ całkujący gromadzący na kondensatorze C ładunek prądu płynącego przez opornik R_1 :

$$U_{wy}(t) \approx \frac{1}{CR_1} \int_0^t U_{we}(x) dx$$

(zakładamy, że $R_1 \ll R_2$)

B) Aktywny filtr dolnoprzepustowy, dający zgodnie ze wzorem (2) stosunek napięć:

$$\frac{U_{wy}}{U_{we}} = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + i\omega CR_2}$$



- W uzgodnieniu z asystentem wykonać układ całkujący według schematu z rys. 5 (lub różniczkujący). Wykorzystujemy oporniki $R_1 = 2 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$ i $R_3 = 1,8 \text{ k}\Omega$ oraz kondensator $C = 47 \text{ nF}$. Opornik R_3 służy do kompensacji prądu polaryzacji wejścia i można go pominąć. Po sprawdzeniu połączeń i akceptacji przez asystenta można podłączyć układ do zasilania -15 V , $+15 \text{ V}$.
- Wykorzystując oscyloskop należy zaobserwować przebieg czasowy (kształt) napięcia na wyjściu dla napięcia wejściowego sinusoidalnego i prostokątnego o częstotliwości 10 kHz . W jaki sposób z porównania tych przebiegów widać całkujący charakter tego układu? Porównujemy to z działaniem biernego układu całkującego RC budowanego na ćwiczeniu B1.
- Zmierzyć charakterystykę częstotliwościową układu, dla napięcia wejściowego sinusoidalnie zmiennego o częstotliwościach f od 10 Hz do 100 kHz . Punkty pomiarowe na skali częstotliwości wybieramy w tych samych położeniach w każdej dekadzie np. 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, itd. Jakiego rodzaju filtrem jest ten układ? W sprawozdaniu należy porównać zmierzone wyniki ze spodziewaną charakterystyką częstotliwościową obliczoną przez podstawienie impedancji zespolonej pojemnościowej do wzoru (1) na wzmocnienie wzmacniacza odwracającego.

3. Układ różniczkujący.

Rys. 6. Układ ze wzmacniaczem operacyjnym i pojemnością pracujący jako:

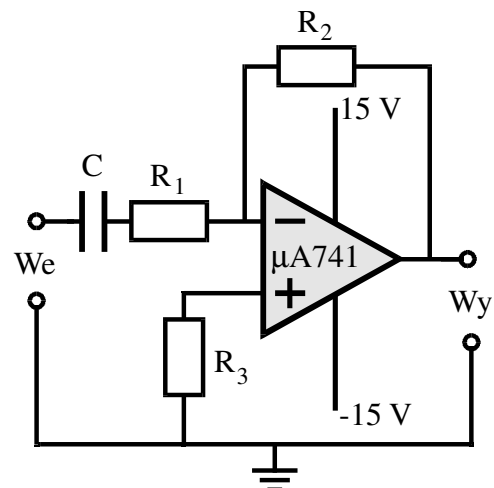
A) Układ różniczkujący dający na oporniku R_1 napięcie proporcjonalne do prądu będącego pochodną ładunku na kondensatorze C:

$$U_{wy}(t) \approx CR_2 \frac{dU_{we}(t)}{dt}$$

(zakładamy, że $R_1 \ll R_2$)

B) Aktywny filtr górnoprzepustowy, dający zgodnie ze wzorem (2) stosunek napięć:

$$\frac{U_{wy}}{U_{we}} = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{i\omega CR_1}{1 + i\omega CR_1}$$



- a) W uzgodnieniu z asystentem wykonać układ całkujący według schematu z rys. 5 (lub różniczkujący). Wykorzystujemy oporniki $R_1 = 2 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$ i $R_3 = 1,8 \text{ k}\Omega$ oraz kondensator $C = 47 \text{ nF}$. Opornik i R_3 służy do kompensacji prądu polaryzacji wejścia i można go pominąć. Po sprawdzeniu połączeń i akceptacji przez asystenta można podłączyć układ do zasilania -15 V , $+15 \text{ V}$.
- b) Wykorzystując oscyloskop należy zaobserwować przebieg czasowy (kształt) napięcia na wyjściu dla napięcia wejściowego sinusoidalnego i trójkątnego o częstotliwości 100 Hz . W jaki sposób z porównania tych przebiegów widać różniczkujący charakter tego układu? Porównujemy to z pracą biernego układu różniczkującego zbudowanego na ćwiczeniu B1.
- c) Zmierzyć charakterystykę częstotliwościową układu, dla napięcia wejściowego sinusoidalnie zmiennego o częstotliwościach f od 10 Hz do 100 kHz . Punkty pomiarowe na skali częstotliwości wybieramy w tych samych położeniach w każdej dekadzie np. 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, itd. Jakiego rodzaju filtrem jest ten układ? W sprawozdaniu należy porównać zmierzone wyniki ze spodziewaną charakterystyką częstotliwościową obliczoną przez podstawienie impedancji zespolonej pojemnościowej do wzoru (1) na wzmocnienie wzmacniacza odwracającego.

W sprawozdaniu należy opisać wszystkie wykonane pomiary, przedstawić wyniki pomiarów na wykresach wraz z niepewnościami pomiarowymi. Należy określić wzmocnienie poprzez dopasowanie prostej do zależności $U_{wy}(U_{we})$, przy czym należy wyznaczyć zakres napięć wejściowych dla efektywnej pracy wzmacniacza

Porównać wyniki z zależnościami teoretycznymi opisującymi działanie układów wzmacniaczy odwracającego i nieodwracającego.

Opisać działanie układu całkującego lub różniczkującego.

Układy z elementami R i C opisać jako filtry przez podstawienie odpowiednich impedancji do wzoru (2). Przetawić ich charakterystyki częstotliwościowe. Skale częstości na wykresach powinny być logarytmiczne.

Literatura

- 1) Michał Nadachowski, Zbigniew Kulka: Analogowe układy scalone. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1980.
- 2) T. Stacewicz, A. Kotlicki, Elektronika w laboratorium naukowym, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1994

*Wersja z dnia 22 IV 2023, K. Korona, M. Król
(na podst. materiałów z Prac. Fiz. i Elektronicznej, WF UW)*