

Wydział Fizyki UW

(wersja instrukcji 05.2015, oprac. T. Słupiński, na podstawie m.in. instrukcji do ćwiczenia „Wzmacniacz operacyjny” z Pracowni Elektronicznej WF UW)

Pracownia fizyczna i elektroniczna dla Inżynierii Nanostruktur oraz Energetyki i Chemii Jądrowej

Ćwiczenie 9

WZMACNIACZ OPERACYJNY

Ćwiczenie ma na celu poznanie ważnej klasy analogowych układów elektronicznych - wzmacniaczy operacyjnych - na przykładzie układu scalonego typu $\mu A741$. Układ scalony $\mu A741$ przez wiele lat był jednym z najbardziej rozpowszechnionych wzmacniaczy operacyjnych o uniwersalnym zastosowaniu. Obecnie w zastosowaniach bywa zastępowany przez bardziej nowoczesne konstrukcje. W ćwiczeniu zmierzone zostaną wzmocnienie i charakterystyki częstotliwościowe układów ze wzmacniaczem operacyjnym, w których zastosowano tzw. sprzężenie zwrotne.

Podstawowe wiadomości o wzmacniaczu operacyjnym

Wzmacniacz operacyjny to układ analogowy uniwersalnego wzmacniacza napięć stałych lub zmiennych o szerokich zastosowaniach np. w stabilizowanych źródłach napięciowych i prądowych, w filtrach aktywnych RLC, w układach realizujących funkcje matematyczne na napięciach wejściowych np. sumowanie, logarytmowanie, ..., w aparaturze pomiarowej do wstępnego wzmacniania słabych sygnałów z czujników pomiarowych takich jak: fotodiody, termopary, czujniki pH, czujniki próżni, czujniki naprężeń mechanicznych (tensometry), czy np. sygnałów z sond elektrokardiografów, itd. Nazwa *wzmacniacz operacyjny* pochodzi jeszcze sprzed czasów stosowania półprzewodników w elektronice – budowane były układy lampowe o funkcjach podobnych do dzisiejszych wzmacniaczy operacyjnych. Zostały one opracowane jako elementy do zastosowań m.in. w tzw. komputerach analogowych (przed rozwojem technik cyfrowych), czyli takich, które prowadziły obliczenia matematyczne stosując sygnały analogowe. Miały one tam wykonywać *operacje* matematyczne np. dodawanie, logarytmowanie, mnożenie itp., stąd ich nazwa. Obecnie jest produkowane bardzo wiele typów układów scalonych zawierających wzmacniacze operacyjne, o parametrach dostosowanych do konkretnych zastosowań. Wzmacniacze operacyjne są także częścią bardziej złożonych układów scalonych np. przetworników analogowo-cyfrowych oraz cyfrowo-analogowych, obecnie powszechnych w układach pomiarowych lub sterowania aparaturą.

Wzmacniacz operacyjny został zaprojektowany jako układ o następujących cechach:

- 1) posiada jedno wyjście oraz dwa wejścia, jedno z wejść nazywa się odwracającym (oznaczane U_-), drugie – nieodwracającym (oznaczane U_+),
- 2) jest zasilany dwoma napięciami: dodatnim względem masy $+V_{cc}$ oraz ujemnym $-V_{ee}$, przy czym często co do wartości bezwzględnych stosowane bywa $V_{cc}=V_{ee}$. Istnieją również wzmacniacze operacyjne przystosowane do zasilania pojedynczym napięciem.
- 3) napięcie wyjściowe U_{wy} może zmieniać się w granicach od $-V_{ee}$ do $+V_{cc}$,
- 4) w takich granicach napięcia U_{wy} wzmacniacz operacyjny realizuje następującą funkcję: $U_{wy} = A \cdot (U_+ - U_-)$, gdzie współczynnik A nosi nazwę wzmocnienia napięciowego,
- 5) wzmacniacz operacyjny posiada bardzo duże wzmocnienie napięciowe $A = U_{wy}/(U_+ - U_-)$, w założeniach nieskończenie wielkie, w praktyce osiągające wartości 10^5 - 10^7 , (co oznacza, że napięcie wyjściowe wzmacniacza operacyjnego zmienia się od wartości $-V_{ee}$ np. $-10V$ do

wartości $+V_{cc}$ np. $+10V$ przy zmianach napięcia wejściowego ($U_+ - U_-$) = $\sim(1-100) \mu V$).

6) wzmocnienie napięciowe A maleje przy wzroście częstotliwości sygnałów wejściowych.

7) wzmacniacz posiada bardzo dużą oporność wejściową, to znaczy prąd wpływający przez wejścia U_+ oraz U_- jest zanedbywanie mały,

8) wzmacniacz posiada bardzo mały opór wyjściowy, to znaczy napięcie wyjściowe U_{wy} prawie nie zależy od prądu wypływającego z wyjścia (w granicach do pewnej wartości natężenia prądu określanego przez producenta konkretnego typu wzmacniacza operacyjnego).

Oporności wejściowe wzmacniaczy operacyjnych przyjmują wartości rzędu $10^6 - 10^{13}$ oma, czyli prądy wejściowe wystarczające do pracy najbardziej wysokooporowych wzmacniaczy mogą być bardzo małe - rzędu pojedynczych pikoamperów. To tłumaczy zastosowania jako wzmacniacze sygnałów z różnych czujników pomiarowych, dających np. jedynie bardzo małe natężenia prądów.

Wzmacniacz operacyjny może pełnić rolę układu porównującego wartości napięć wejściowych U_+ oraz U_- (czyli komparatora). Ta funkcja ma zastosowania przy porównywaniu napięć w układach przejściowych między układami analogowymi i cyfrowymi, czyli w przetwornikach analogowo-cyfrowych i cyfrowo-analogowych. Np. przy zasilaniu wzmacniacza operacyjnego pojedynczym napięciem $V_{cc}=5V$ (czyli wtedy $V_{ee}=0V$) jego wyjście przybiera wartości $+5V$ (czyli TTL-owy stan wysoki) gdy $U_+ > U_-$, albo wartość $\sim 0V$ (czyli TTL-owy stan niski) gdy $U_+ < U_-$.

Rzeczywiste własności wzmacniaczy operacyjnych wynikają z projektu konkretnego typu wzmacniacza, ale także z metod produkcji układów półprzewodnikowych niemożliwych do idealnej kontroli w procesach technologii materiałów. Np. zerowe napięcie na wyjściu rzeczywistego wzmacniacza operacyjnego jest uzyskiwane dla odbiegającej od zera wartości różnicy ($U_+ - U_-$) - nazywa się to *offset-em* napięcia wejściowego (napięciem niezrównoważenia) i zwykle nie przekracza $\sim(1-10) mV$, ale są też produkowane układy w których przyjmuje wartości poniżej $1 \mu V$.

Własności układów budowanych z użyciem wzmacniaczy operacyjnych najsilniej kształtuje się poprzez stosowanie tzw. **sprzężenia zwrotnego**. Sprzężenie zwrotne to takie połączenie obwodów wyjściowego i wejściowego dla pojedynczego wzmacniacza, że część sygnału wyjściowego trafia z powrotem do wejścia tego wzmacniacza. Jest to konstrukcja bardzo często wykorzystywana w elektronice do np. stabilizowania własności układu (zmniejszania zmienności parametrów w zależności od warunków zewnętrznych, np. temperatury lub niekontrolowanych wahań napięć zasilających), co uzyskuje się poprzez zmniejszenie niepotrzebnie dużego wzmocnienia. Sprzężenie zwrotne w technice jest podstawą *metod regulacji*, to znaczy takiego sterowania układem, aby na jego wyjściu określony parametr zmieniał się w zadany sposób, albo właśnie nie zmieniał się – był stabilny w czasie (określa się wtedy, że parametr jest stabilizowany). Przykładem może być utrzymywanie stałej temperatury wymaganej w reaktorze chemicznym w przeprowadzanych reakcjach chemicznych lub w pewnym procesie technologicznym. Odbywa się to poprzez wykorzystanie sygnału pomiarowego (np. temperatury poprzez pomiar napięcia z termopary) do sterowania zasilaczem o zmienianej mocy wyjściowej dostarczającym moc grzejącą do tego reaktora. Wzmacniacze operacyjne doskonale obrazują zasadę sprzężenia zwrotnego i w tym ćwiczeniu właśnie temu będziemy się przyglądać.

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), ale można kształtować zależność napięcia wyjściowego od wejściowego np. w funkcji częstotliwości. Można budować w ten sposób filtry (gdy obwody RLC tworzą sprzężenie zwrotne, którego impedancja zależy od częstotliwości, czyli wzmacnienie wypadkowe wzmacniacza ze sprzężeniem zwrotnym zależy od częstotliwości), tak zwane filtry aktywne. Jednocześnie mogą to być układy różniczkujące lub całkujące, zgodnie z zasadami poznanyymi wcześniej przy ćwiczeniach C3 i C4.

Gdy część sygnału wyjściowego jest podawana na wejście nieodwracające U_+ , to wzmacnienie wynikowe ulega znacznemu zwiększeniu i układ może wzbudzać się samoczynnie, to znaczy generować sygnały zmienne na wyjściu – mówimy wtedy o *sprężeniu 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. 2, i (2) wzmacniacz nieodwracający (fazy) przedstawiony na Rys. 3.

Wzmocnienie napięciowe układów z Rys. 2 i Rys. 3 można zdefiniować jako: $K = \frac{U_{wy}}{U_{we}}$.

Sposób analizy działania tych wzmacniaczy jest następujący:

- (1) wzmacniacz odwracający – Rys. 2 - skoro opór wejściowy wzmacniacza operacyjnego jest bardzo duży, to do wejść U_- oraz U_+ wpływa zanedbywanie mały prąd. Wobec tego napięcie U_+ jest w przybliżeniu równe napięciu masy, czyli ≈ 0 V. Również napięcie wejścia U_- jest w przybliżeniu ≈ 0 , bo, jak zostało wyżej podane we własnościach ogólnych wzmacniacza operacyjnego, w zakresie jego pracy proporcjonalnej (nie w stanie nasycenia) napięcia U_{wy} do wartości napięć zasilania $-V_{ce}$ lub $+V_{cc}$) napięcia U_+ i U_- są równe z dokładnością do mili- lub mikrowoltów. Czyli $U_+ = 0$ oraz z równości prądów płynących przez R_1 i R_2 mamy:

$U_{we} / R_1 = -U_{wy} / R_2$, więc wzmacnienie napięciowe: $U_{wy} / U_{we} = -R_2 / R_1$. Znak „-” opisuje fakt, że wzmacniacz taki odwraca fazę sygnału zmiennego, albo że wzrostowi napięcia na wejściu odpowiada spadek napięcia na wyjściu.

- (2) wzmacniacz nieodwracający – Rys. 3 - na podobnej jak wyżej zasadzie skoro w przybliżeniu zachodzi $U_+ = U_-$, to napięcie na wejściu odwracającym jest równe także U_{we} i jest równe, z własności dzielnika napięć z oporników R_1 i R_2 , wartości:

$U_{we} = U_{wy} \cdot R_1 / (R_1 + R_2)$, czyli wzmacnienie napięciowe: $U_{wy} / U_{we} = 1 + R_2 / R_1$

Jeśli w miejscach oporników są elementy RLC, to we wzorach należy zastąpić oporności odpowiednimi impedancjami. Zastosowanie elementów impedancyjnych pozwala kształtować charakterystyki częstotliwościowe takich wzmacniaczy.

Jeśli opornik R_2 sprzężenia zwrotnego zastąpimy kondensatorem, to otrzymany układ będzie układem całkującym (i 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).

Jeśli opornik R_1 (w układzie wzmacniacza odwracającego z Rys. 2) zastąpimy kondensatorem, to dostajemy filtr górnoprzepustowy i jednocześnie układ różniczkujący.

Poniżej opisane ćwiczenie będzie polegało na badaniu wzmocnienia oraz charakterystyk częstotliwościowych takich wzmacniaczy.

WYKONANIE ĆWICZENIA

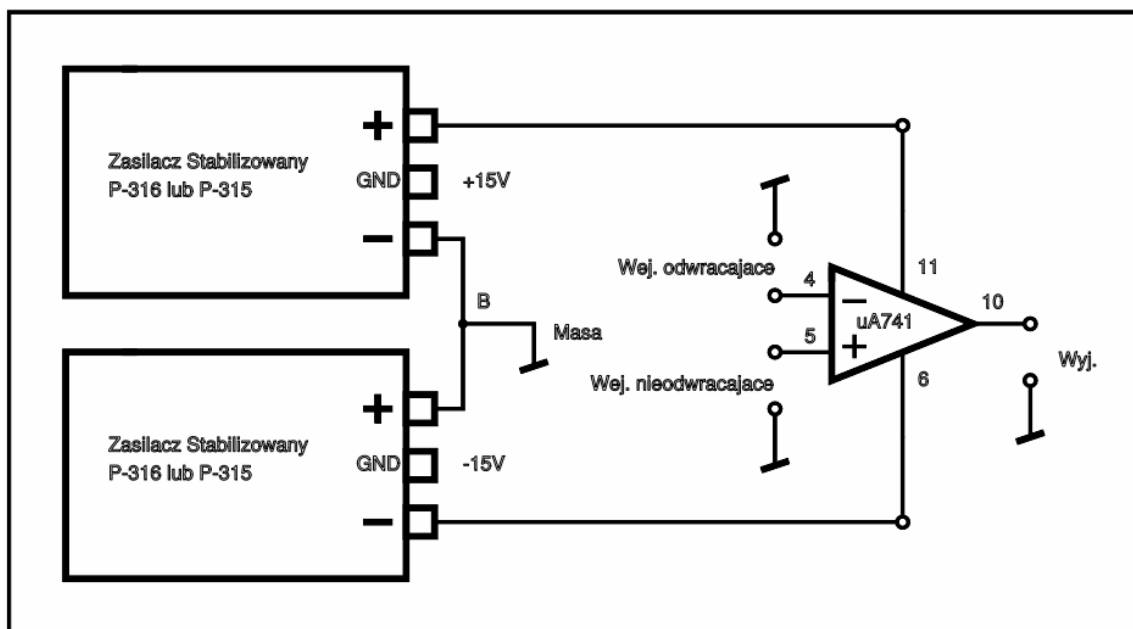
Przystępując do wykonania ćwiczenia otrzymamy uniwersalną płytkę drukowaną z wlotowanymi podstawkami do układów scalonych i gniazdami połączeniowymi. Na tej płytce montujemy wszystkie układy, które należy zbadać. Podobnie jak w innych ćwiczeniach otrzymamy elementy w pudełkach. Dodatkowe części można otrzymać w sekretariacie pracowni.

Przed włączeniem napięcia zasilania z podwójnego zasilacza prawidłowość połączeń układu musi zostać sprawdzona przez asystenta (dotyczy to wszystkich układów w tym ćwiczeniu). Pomiarów dokonujemy przy użyciu oscyloskopu cyfrowego, napięcie zmienne do wejść podajemy z generatora funkcyjnego.

W sprawozdaniu należy opisać wszystkie wykonane pomiary, przedstawić wyniki na wykresach wraz z niepewnościami pomiarowymi, a także porównać wyniki z zależnościami opisującymi działanie układów wzmacniaczy odwracającego i nieodwracającego z odpowiednimi elementami impedancyjnymi. Skale częstości na wykresach należy wykonać jako typu logarytmicznego.

Badanie wzmacniacza operacyjnego $\mu A741$

Do wzmacniacza podłączamy symetryczne zasilanie z dwóch źródeł napięcia $+15V$ i $-15V$. Dwa źródła zasilania łączymy do płytki montażowej według schematu na Rys.1. Należy zwrócić uwagę, że wzmacniacz $\mu A741$ nie ma wyprowadzenia (nóżki) „masy”. Wzmacniacz operacyjny zasilany z dwu symetrycznych napięć po prostu nie potrzebuje takiej nóżki dla poprawnej pracy zgodnie ze wzorem: $U_{wy} = A \cdot (U_+ - U_-)$. W układzie „masą” jest punkt B na rys. 1 i względem niego mierzone będą napięcia U_{we} i U_{wy} .

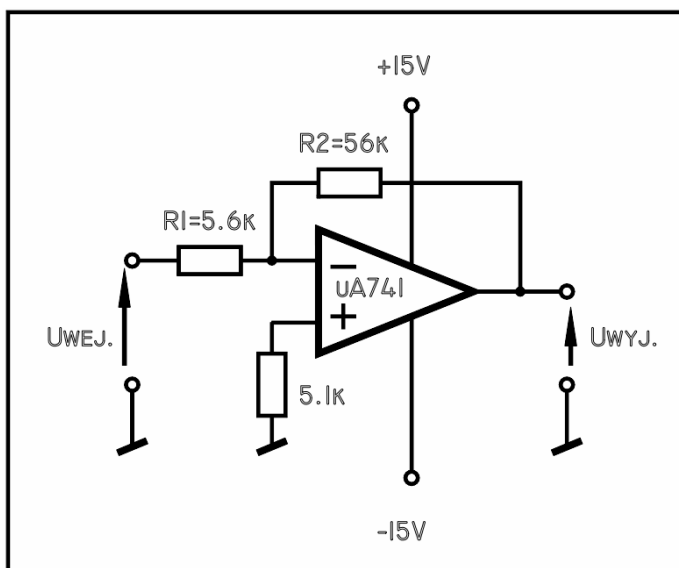


Rys. 1. Sposób podłączenia zasilania do wzmacniacza $\mu A741$ (numery nóżek są podane dla obudowy czternastonóżkowej typu DIP14, w przypadku obudowy ośmionóżkowej DIP8 numery nóżek są podane na rysunku na końcu tej instrukcji).

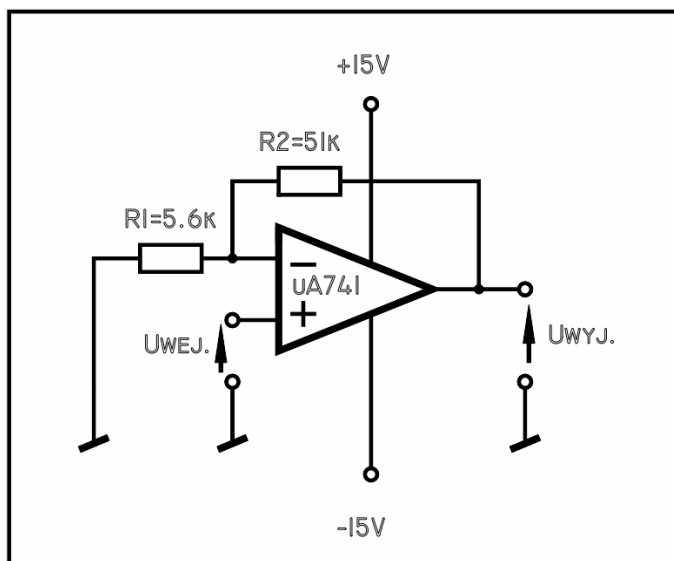
Budowane i badane będą układy określone przez asystenta. Każdy z zespołów ma zbudować i zbadać jeden z układów: odwracający lub nieodwracający oraz jeden z układów: różniczkujący lub całkujący. Asystent może również polecić zbudowanie układu sumatora.

1. Wzmacniacz odwracający (Rys.2) i nieodwracający (Rys. 3).

Należy zbadać (zmierzyć) wzmocnienie napięciowe $K = \frac{U_{wyj}}{U_{wej}}$ dla napięcia wejściowego sinusoidalnego o częstotliwości 1 kHz w zakresie około 0-5V. Należy wyznaczyć zakres liniowości wzmacniacza, czyli zakres napięć wejściowych, dla których napięcie wyjściowe jest proporcjonalne do napięcia wejściowego dla przebiegu sinusoidalnego o częstotliwości 1 kHz. Następnie, dla napięcia wejściowego poniżej 1V, należy zmierzyć pasmo przenoszenia wzmacniacza, czyli zakres częstotliwości, w którym wzmocnienie nie spada poniżej $1/\sqrt{2}$ maksymalnej wartości wzmocnienia. Jakie czynniki ograniczają pasmo przenoszenia?



Rys. 2. Realizacja wzmacniacza odwracającego. Punkty na schemacie oznaczone jako masa są wszystkie połączone ze sobą i z masą zasilacza.



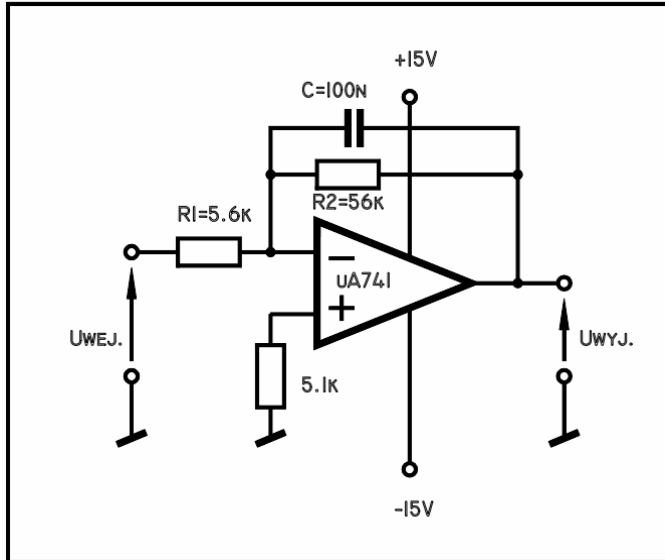
Rys. 3. Realizacja wzmacniacza nieodwracającego. Jak wyżej, punkty oznaczone jako masa są połączone między sobą i z masą zasilacza.

2. Układ całkujący (Rys. 4).

Wykorzystując oscyloskop należy zaobserwować przebieg czasowy (kształt) napięcia na wyjściu dla napięcia wejściowego prostokątnego o częstotliwości 1 kHz. W jaki sposób z

porównania tych przebiegów widać całkujący charakter tego układu? Porównujemy to z działaniem biernego układu całkującego RC budowanego w ćwiczeniu C3.

Należy zmierzyć charakterystykę częstotliwościową układu, podobnie jak w punkcie 1, dla napięcia wejściowego sinusoidalnie zmiennego o częstotliwościach od 20 Hz do ok. 200 kHz. Jakiego rodzaju filtrem jest ten układ? W sprawozdaniu należy porównać zmierzone wyniki ze spodziewaną charakterystyką częstotliwościową obliczoną przez podstawienie impedancji zespolonej pojemnościowej do wzoru na wzmocnienie wzmacniacza odwracającego.

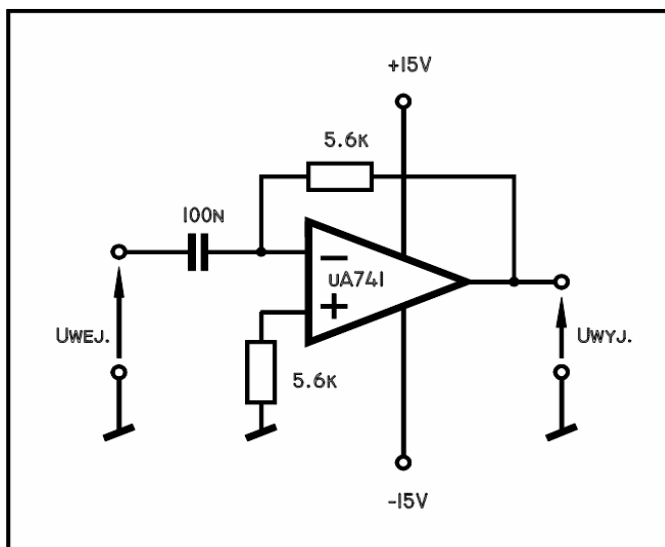


Rys. 4. Układ całkujący.

3. Układ różniczkujący (Rys. 5).

Należy zaobserwować przebieg czasowy (kształt) napięcia na wyjściu dla napięcia wejściowego trójkątnego o częstotliwości 1 kHz. W jaki sposób z porównania tych przebiegów widać różniczkujący charakter tego układu? Porównujemy to z działaniem biernego układu różniczkującego RC budowanego w ćwiczeniu C3.

Należy zmierzyć charakterystykę częstotliwościową układu, podobnie jak w punktach 1 i 2. Jakiego rodzaju filtrem jest ten układ? W sprawozdaniu należy porównać zmierzone wyniki ze spodziewaną charakterystyką częstotliwościową obliczoną przez podstawienie impedancji zespolonej pojemnościowej do wzoru na wzmocnienie wzmacniacza odwracającego.



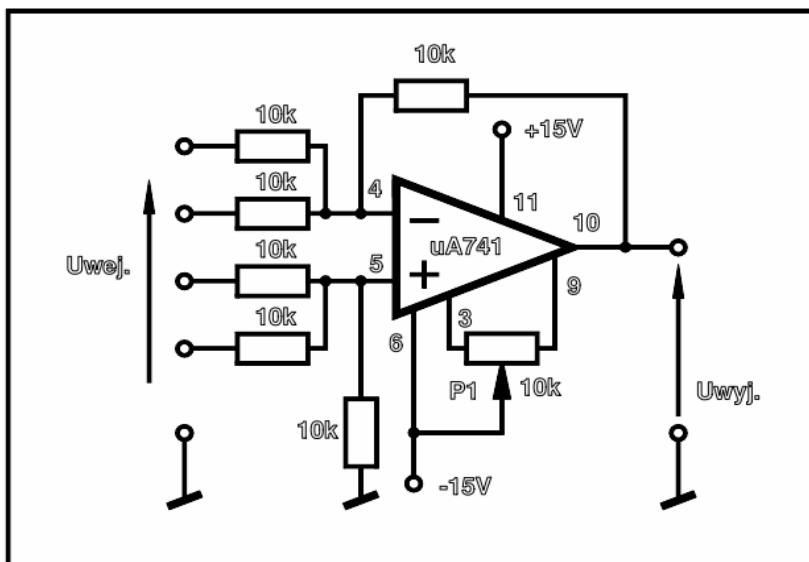
Rys. 5. Układ różniczkujący

4. Wzmacniacz realizujący sumę i różnicę napięć.

Należy zbudować układ według Rys. 6. Na wejścia A, B, C, D (kolejne od dołu rysunku oporniki $10\text{k}\Omega$) należy podawać napięcia z samodzielnie zbudowanego dzielnika napięć. Dzielnik napięć należy zaprojektować i wykonać na płytce montażowej. W tym celu należy połączyć szeregowo kilka odpowiednio dobranych oporników i podłączyć taki dzielnik napięciowy do napięcia zasilania $+15\text{V}$ i masy. Z kolejnych oporników dzielnika będą brane napięcia podłączane do wejść A, B, C i D. Dzielnik napięcia należy tak zaprojektować, aby prąd płynący przez dzielnik wynosił około $10\text{-}30\text{ mA}$. Taki dobór prądu dzielnika zapewni, że napięcia na wyjściach dzielnika (czyli pobierane z kolejnych oporników dzielnika) nie będą zależały od prądu obciążenia dzielnika, czyli od znacznie mniejszych prądów wejściowych układu sumującego.

Należy zbadać, czy dla wartości napięć z dzielnika napięciowego układ sumujący pracuje poprawnie, tzn. czy $U_{\text{wyj}} = U_A + U_B - U_C - U_D$.

Warunkiem poprawnej pracy jest podanie na wszystkie 4 wejścia napięć z dzielnika lub zwarcie niepodłączonych wejść do masy (czyli podanie napięcia $U = 0$). Należy zwrócić uwagę, aby nie podać na wejście wzmacniacza operacyjnego napięć wyższych, niż na to zezwala karta katalogowa dla układu $\mu\text{A}741$ - **max 15V**.



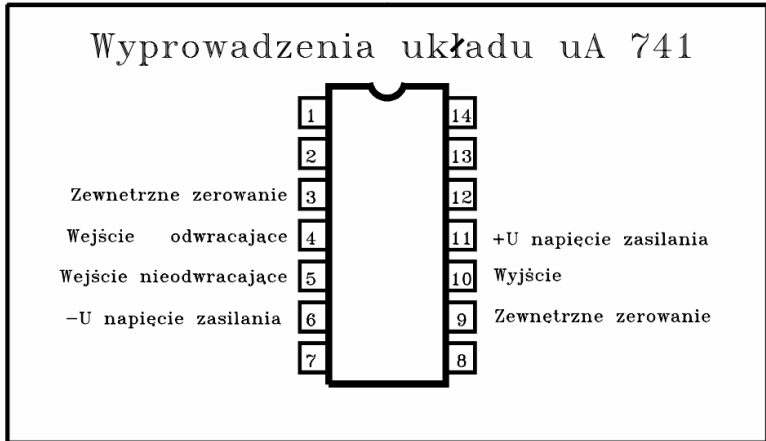
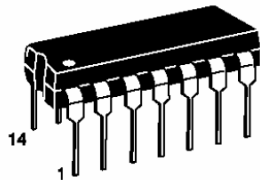
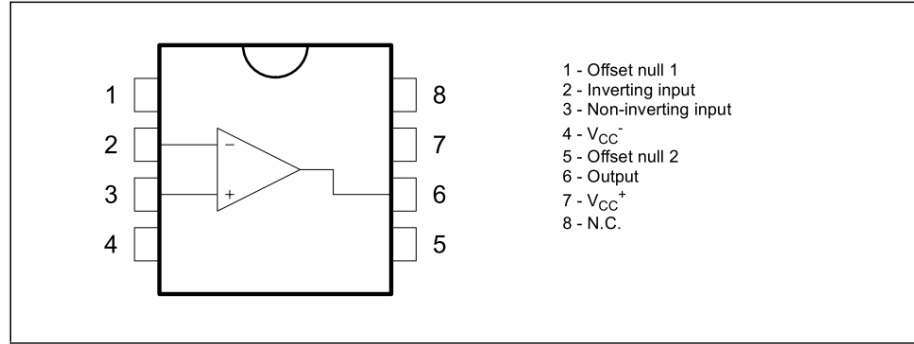
Rys. 6. Układ analogowy realizujący działanie matematyczne $A+B-C-D$, gdzie literami A, B, C, D oznaczane są wejścia U_{wej} z dołączonymi opornikami $10\text{ k}\Omega$, kolejne od dołu na schemacie. Numeracja wyprowadzeń układu scalonego odpowiada obudowie DIP14 wzmacniacza operacyjnego $\mu\text{A}741$, należy ją odpowiednio zmienić dysponując układem w obudowie DIP8.

Potencjometr P1 służy do kompensacji wejściowego napięcia niezrównoważenia (offset-u), czyli do ustawienia zera napięcia na wyjściu, gdy wszystkie wejścia są zwarte z masą.

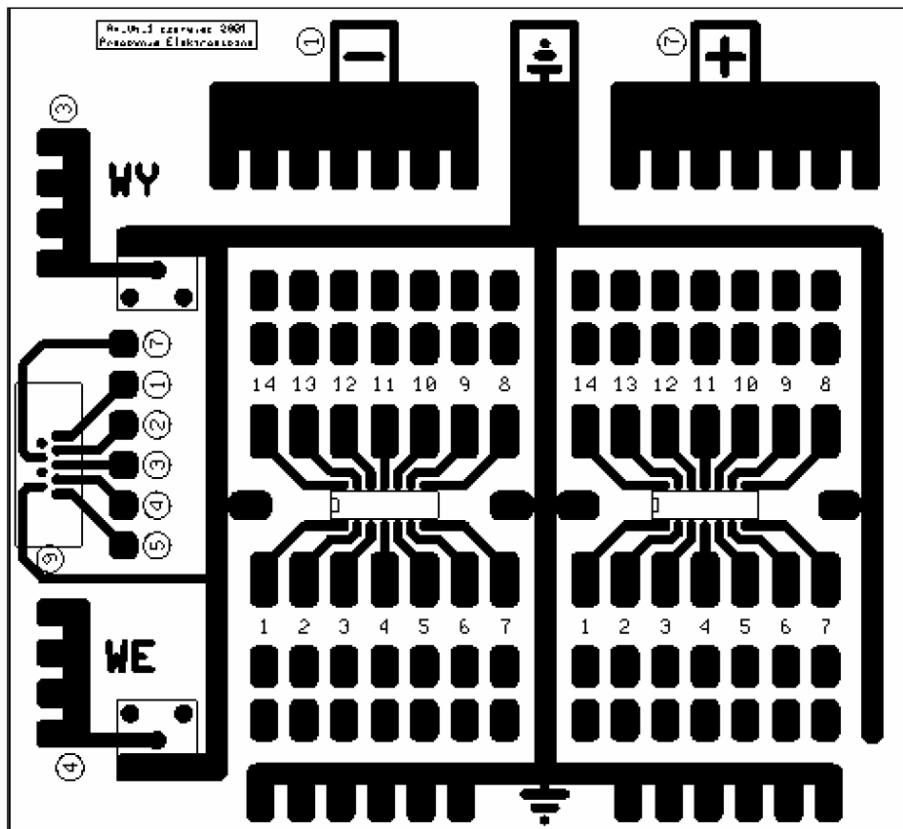
Literatura

- 1). R. Śledziwski, *Elektronika dla fizyków*, PWN 1982, punkt 6.4, punkt 7.5
- 2) Karta katalogowa wzmacniacza operacyjnego $\mu\text{A}741$ firmy STMicroelectronics, dostępna na stronie Pracowni Elektronicznej, zakładka z opisami ćwiczeń dla IN i EChJ.

PIN CONNECTIONS (top view)



Obudowy typu DIP8 i DIP14 i wyprowadzenia wzmacniaczy operacyjnych $\mu A741$. N.C. = *not connected* oznacza wyprowadzenie nieużywane.



Widok płytki drukowanej do ćwiczenia C9. Dwa napięcia zasilania dołączamy do gniazd „+” i masa oraz „-” i masa.