

1. Cel ćwiczenia

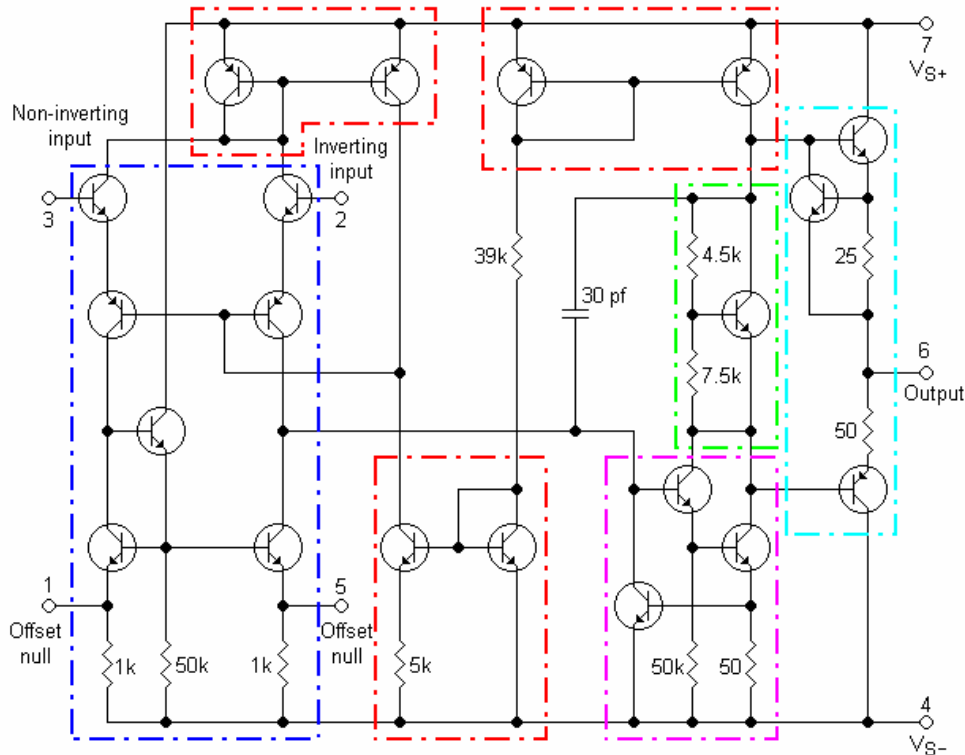
Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z właściwościami wzmacniacza operacyjnego oraz jego podstawowymi zastosowaniami układowymi: wzmacniaczem napięciowym odwracającym fazę sygnału wejściowego (w części 1), układami całkującym i różniczkującym oraz filtrami (w części 2).

2. Trochę teorii (wstęp teoretyczny jest wspólny dla obu części ćwiczenia ze wzmacniaczem operacyjnym)

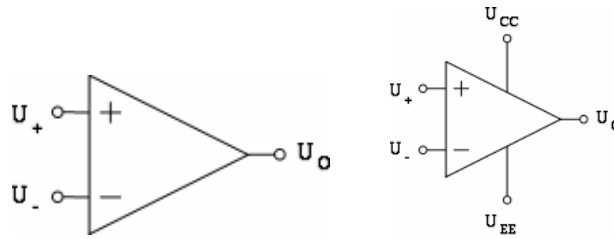
Wzmacniacz operacyjny (WO) to w istocie wielostopniowy, wzmacniacz różnicowy prądu stałego, charakteryzujący się bardzo dużym różnicowym wzmocnieniem napięciowym dla sygnału zarówno prądu stałego jak i zmiennego (rzędu stu kilkudziesięciu decybeli). Jego właściwości funkcjonalne mogą być dość dowolnie kształtowane poprzez dobór zewnętrznego układu sprzężenia zwrotnego. Nazwa układu wywodzi się z jego pierwotnego historycznie przeznaczenia, według którego miał to być układ wykonujący w prosty sposób podstawowe operacje matematyczne (takie jak np. mnożenie, sumowanie, całkowanie, logarytmowanie...) w maszynach matematycznych analogowych. W drugiej części ćwiczenia badane są układy WO w konfiguracjach układów całkującego (integratora) i różniczkującego jako przykłady matematycznych zastosowań WO.

Wzmacniacz operacyjny jest obecnie najbardziej rozpowszechnionym analogowym układem elektronicznym, co wynika przede wszystkim z możliwości realizacji przy jego użyciu układów o bardzo różnych zastosowaniach. Układy zbudowane na WO charakteryzują się zwartością i prostotą konstrukcji, niską ceną i bardzo dobrymi parametrami użytkowymi.

Na rysunku 1 pokazano schemat ideowy jednej z najpopularniejszych konstrukcji WO – układu scalonego $\mu A741$. Jest on tu jednak pokazany nie w celu analizy pracy układu, lecz w celu poglądowym. Z punktu widzenia użytkownika, który nie jest „docieklwym elektronikiem”, lecz po prostu chce taki wzmacniacz wykorzystać, nie jest istotna budowa wewnętrzna takiego układu, lecz jego parametry "zewnętrzne". Na rysunek 1 rzucmy zatem tylko okiem i przejdźmy do rysunku 2.



Rysunek 1. Schemat ideowy wzmacniacza operacyjnego $\mu A741$.



Rysunek 2. Symbol i oznaczenia wzmacniacza operacyjnego ($U_o = A_R (U_+ - U_-)$)

Na rysunku 2 pokazano symbol wzmacniacza operacyjnego w dwóch wersjach, z i bez zaznaczonych linii zasilających (U_{CC} i U_{EE}). Zwykle w celu uproszczenia zapisu stosuje się lewy symbol, no ale nie należy zapominać o tym, że każdy układ elektroniczny potrzebuje zasilania. WO najczęściej zasilana jest napięciem symetrycznym, \pm kilka-kilkanaście Volt. Warto pamiętać że zasilanie WO decyduje o zakresie jego pracy liniowej, co oznacza że jeśli na wyjściu układu teoretycznie spodziewamy się np. sygnału o amplitudzie 20V, a WO jest zasilany napięciem $\pm 12V$, to na pewno tych 20V nie uzyskamy. Typowo zakres pracy liniowej wzmacniacza kończy się 1-2V przed napięciem zasilania, czyli z układu zasilanego napięciem $\pm 12V$, nie uzyskamy sygnału o amplitudzie większej niż około 10-11V (zależnie od modelu użytego wzmacniacza). Sygnał przekraczający tę wartość zostanie „obcięty”, zatem zniekształcony. Zjawisko to, zwane przesterowaniem, będzie obserwowane w trakcie pierwszej części ćwiczenia przy zbieraniu charakterystyki przejściowej wzmacniacza.

No ale przejdźmy już do samego wzmacniacza. Zanim „zbudujemy” już jakiś konkretny układ omówimy sobie podstawowe parametry WO. Jak już wspomniano, WO charakteryzuje się bardzo dobrymi parametrami użytkowymi. Parametry te są na tyle dobre, że w analizie układów ze wzmacniaczem stosuje się idealizowany model WO, mówimy wtedy o idealnym wzmacniaczu operacyjnym (**IWO**). Najważniejsze parametry IWO są następujące:

- różnicowe wzmocnienie napięciowe $A_R \rightarrow \infty$,
- rezystancja wejściowa $R_{IN} \rightarrow \infty$,
- rezystancja wyjściowa $R_{OUT} \rightarrow 0$,
- nieskończenie szerokie pasmo przenoszenia częstotliwości.

Oczywiście w rzeczywistości parametry te są nieosiągalne w praktyce (no i jest ich więcej), ale WO są układami których parametry są na tyle bliskie tym ww., że wyciągnięte na ich podstawie wnioski są bardzo bliskie obserwacjom rzeczywistych układów z WO, co zresztą zostanie dowiedzione w trakcie obu ćwiczeń z WO.

W analizie układów ze wzmacniaczem operacyjnym najważniejsze są dwie pierwsze z ww. cech.

Pierwsza cecha, czyli nieskończone wzmocnienie jest nieco „nieintuicyjna”. Bo właściwie po co wzmacniać napięcie nieskończenie? Nie ma to większego sensu i nie o to w tym chodzi. Przeanalizujemy tę sytuację trochę inaczej.

$$\text{Mamy: } U_O = A_R \cdot (U_+ - U_-).$$

$$\text{Dzielimy to stronami przez } A_R, \text{ wychodzi: } \frac{U_O}{A_R} = U_+ - U_-.$$

$$\text{Skoro } A_R \rightarrow \infty, \text{ to cała lewa strona równania dąży do zera, zatem: } 0 = U_+ - U_-.$$

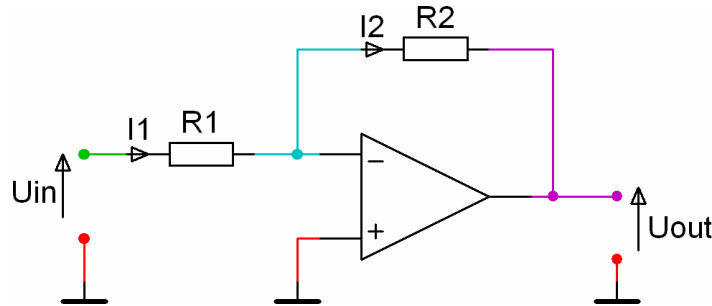
$$\text{Przenosimy } U_- \text{ i wychodzi: } U_+ = U_-.$$

Co to oznacza? Jest to tak zwane „wirtualne zwarcie”. Wynika z niego, że napięcie przyłożone do jednej z końcówek WO pojawi się na drugiej. Za chwilę zobaczymy jak to wykorzystać w praktyce, ale najpierw spójrzmy na drugą cechę IWO.

Co znaczy że $R_{IN} \rightarrow \infty$? Rezystancja czyli opór. Opór elektryczny czyli opór stawiany prądowi. Skoro opór stawiany prądowi jest nieskończony to znaczy po prostu że do wejść WO nie płynie prąd. Idealny wzmacniacz operacyjny nie pobiera prądu, inaczej mówiąc - jest on sterowany napięciem. Dobrze, wstęp za nami, zbudujmy coś w końcu!)

2.1. Wzmacniacz odwracający fazę

Spójrzmy na rysunek 3. Układ jest bardzo prosty, składa się jedynie ze wzmacniacza operacyjnego i dwóch rezystorów. Jak działa? Żeby się tego dowiedzieć wystarczy wykorzystać wcześniej uzyskaną wiedzę o cechach IWO.



Rysunek 3. Wzmacniacz odwracający fazę.

Podejście do każdego układu z WO jest bardzo podobne. Po prostu próbujemy w jakiś sposób powiązać U_{out} z U_{in} wykorzystując właściwości wzmacniacza. Do dzieła...

Patrzmy na układ. Pierwsze pytanie brzmi: Jaki jest potencjał węzła niebieskiego? Jeżeli próbujesz liczyć to popełniasz błąd. Przed chwilą była przecież mowa o „wirtualnym zwarciu” i w tym momencie można to wykorzystać. Potencjał końcówki „+” WO jest równy 0, ponieważ ma ona potencjał masy. A skoro jest pozorne zwarcie, to niebieski węzeł też ma potencjał 0. Po prostu. Tak to działa. Jeżeli do jednej z końcówek WO przyłożony zostanie określony potencjał, a na drugiej nie ma narzuconego, to pojawi się tam ten sam. Więc wiemy już że potencjał niebieskiego węzła jest równy 0.

Kontynuujmy. Drugie pytanie brzmi: Jak mają się do siebie prądy I_1 i I_2 ? No niby prąd I_1 płynie od zielonego węzła przez rezystor R_1 do węzła niebieskiego i w nim dzieli się na prąd I_2 oraz na prąd płynący do końcówki „-” WO. Ale czy na pewno? Przecież kawałek wyżej napisane zostało, że „do wejść WO nie płynie prąd”. No a skoro tak, to prawdziwa staje się równość (bo skoro do końcówki „-” wzmacniacza nie płynie żaden prąd, to cały prąd I_1 popłynie „górą” układu):

$$I_1 = I_2.$$

Teraz wystarczy policzyć I_1 i I_2 ze znanego wszem wobec prawa Ohma i wszystko stanie się jasne. Skoro $U=R \cdot I$, to:

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2},$$

gdzie U_1 to napięcie na rezystorze R_1 , a U_2 to napięcie na rezystorze R_2 . Policzmy te napięcia.

Napięcie na rezystorze R_1 : na zielonej jego końcówce potencjał jest równy U_{in} , na niebieskiej 0 (co wynika z wcześniej opisanego pozornego zwarcia), skoro tak, to: $U_1 = U_{in} - 0 = U_{in}$.

Napięcie na rezystorze R_2 : na niebieskiej końcówce potencjał jest równy 0, na fioletowej U_{out} , więc: $U_2 = 0 - U_{out} = -U_{out}$.

Napięcia policzone, można zatem wyprowadzić wzór opisujący analizowany wzmacniacz:

$$\frac{U_{in}}{R_1} = \frac{-U_{out}}{R_2}$$

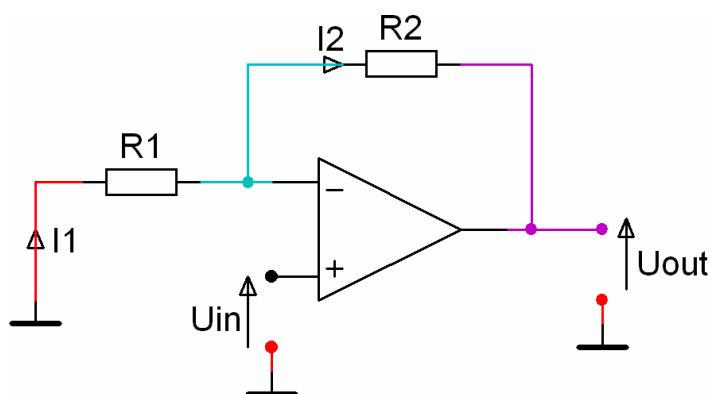
$$U_{out} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot U_{in},$$

gdzie $-\frac{R_2}{R_1}$ jest wzmocnieniem napięciowym układu, oznaczanym najczęściej jako H_U .

I już. Proste, nieprawdaż? Widać zatem w jak prosty sposób można zbudować wzmacniacz o dowolnym wzmocnieniu (regulowanym poprzez wybór rezystorów R_2 i R_1). Jego nazwa (odwracający fazę) wynika z tego, że we wzorze go opisującym występuje minus. Opisany układ stanowi jedną z podstawowych konfiguracji w których używa się WO i często też stanowi on punkt wyjścia do budowy bardziej skomplikowanych układów. Jego działanie bliżej poznamy na laboratorium.

2.2. Wzmacniacz nieodwracający fazy

Drugą podstawową konfiguracją WO jest układ wzmacniacza nieodwracającego fazy, pokazany na rysunku 4.



Rysunek 4. Wzmacniacz nieodwracający fazy.

W zasadzie jedyną różnicą w porównaniu z wzmacniaczem nieodwracającym jest miejsce podania napięcie wejściowego. Zanim pójdziemy dalej, to w tym miejscu warto wspomnieć o kilku zasadach ogólnych. Pierwsza jest taka, że praktycznie każdy układ z WO jest oparty o ujemne sprzężenie zwrotne, czyli pętlę która łączy wyjście WO z końcówką „-” wzmacniacza. O właściwościach układu decydują przede wszystkim elementy znajdujące się w tejże pętli. Drugą zasadą jest ta, że o tym czy układ jest odwracający czy nieodwracający fazę, decyduje właśnie miejsce podania napięcia wejściowego. W układzie z rysunku 4 U_{in} podano na końcówkę „+” wzmacniacza (zwaną wejściem nieodwracającym), zatem układ nie odwróci fazy, z kolei w układzie z rysunku 3 U_{in} było podane na końcówkę „-” wzmacniacza, stąd układ okazał się odwracającym fazę.

Przejdźmy do analizy układu z rysunku 4. Zasady są dokładnie takie same jak w przypadku poprzedniego. Zatem na skróty:

- Potencjał węzła niebieskiego? Jest równy U_{in} (bo pozorne zwarcie).
- Jak się ma I_1 do I_2 ? Są sobie równe bo do wejść WO nie płynie prąd.
- Napięcia na R_1 i R_2 ? Na takiej samej zasadzie jak poprzednio, więc:
 - . $U_1 = 0 - U_{in} = -U_{in}$
 - . $U_2 = U_{in} - U_{out}$

Obliczenia:

$$I_1 = I_2$$
$$\frac{-U_{in}}{R_1} = \frac{U_{in} - U_{out}}{R_2}$$

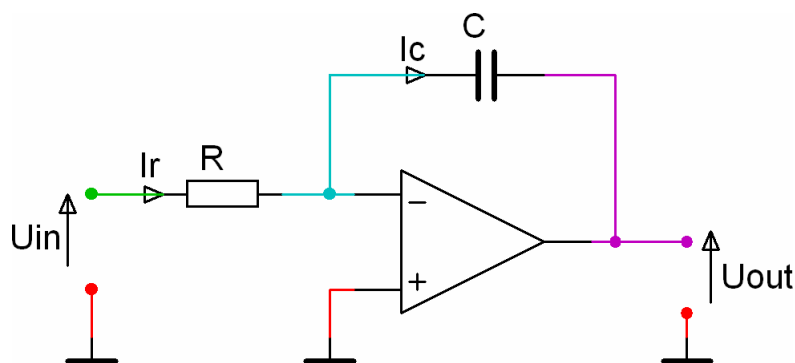
Wyciągamy U_{out} i po dwóch linijkach obliczeń wychodzi, że:

$$U_{out} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot U_{in} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_{in} .$$

Wzmocnienie tego układu jest równe $1 + R_2/R_1$, co uzasadnia jego nazwę ponieważ wyrażenie to jest zawsze dodatnie i wzmacniacz ten na pewno nie odwróci fazy. Warto zauważyć jeszcze jedno. Na podstawie tej konfiguracji nie zbudujemy układu o wzmocnieniu mniejszym niż 1, czyli układu tłumiącego, w przeciwieństwie do układu wzmacniacza odwracającego w którym wystarczy np. dobrać rezystory następująco: $R_2 = 2k\Omega$ i $R_1 = 4k\Omega$ by uzyskać układ o wzmocnieniu $H_u = -R_2/R_1 = -0,5$.

2.3. Układy całkujący i różniczkujący

Znamy już podstawy analizy układów z WO. Tak naprawdę algorytm postępowania jest zawsze bardzo podobny. Spójrzmy na układ z rysunku 5.



Rysunek 5. Układ całkujący (integrator).

Konfiguracja jest bardzo podobna do układu wzmacniacza odwracającego fazę, tyle że w pętli sprzężenia zwrotnego jest kondensator zamiast rezystora. Tyle że w analizie zmienia to bardzo niewiele, jedynie, to że przy obliczaniu prądu w pętli nie zastosujemy prawa Ohma tylko wzór na prąd płynący przez kondensator, który wygląda następująco:

$$I = C \cdot \frac{dU}{dt}.$$

Mając tę wiedzę przystępujemy do analizy układu i na pewno możemy zacząć od (myślę że wiecie już dlaczego):

$$I_R = I_C.$$

Wykorzystujemy wzór podany przed momentem oraz prawo Ohma i wychodzi:

$$\frac{U_{in}}{R} = C \cdot \frac{d(-U_{out})}{dt}.$$

Z powyższego wyrażenia chcemy wyciągnąć U_{out} , które jest pod pochodną. Żeby wyciągnąć coś spod pochodnej należy to scałkować. Całkujemy więc, lewa strona dostaje się pod całkę, z prawej znika pochodna i mamy:

$$\int \frac{U_{in}}{R} dt = C \cdot (-U_{out}).$$

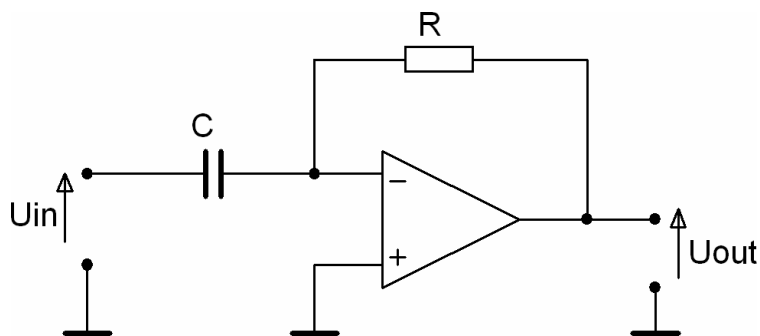
Po przekształceniach i wyciągnięciu stałych przed całką:

$$U_{out} = -\frac{1}{RC} \int U_{in} dt.$$

Jak widać układ z rysunku 5 jest układem całkującym, zwanym też integratorem. Co to tak naprawdę znaczy? Że podanie na wejście tego układu sygnału o pewnym kształcie spowoduje pojawienie się na jego wejściu sygnału o kształcie całki z tego sygnału. Np. jeżeli całka z funkcji sinusoidalnej jest funkcją cosinusoidalną (co, jak wiemy z matematyki, jest prawdą), to taki właśnie sygnał obejrzymy na wyjściu tego układu. Działanie układu całkującego na przykładzie kilku różnych kształtów funkcji wejściowych będzie pokazane w drugiej części ćwiczenia.

A co z układem różniczkującym? Przejdźmy na następną stronę.

Na logikę rzecz biorąc, układ różniczkujący jest układem odwrotnym do całkującego, zatem jeśli zamienimy rezystor z kondensatorem w układzie z rysunku 5, układ całkujący zamieni się w różniczkujący. Taką konfigurację pokazano na rysunku 6, wyprowadzenie opisującego ją wzoru pozostawiam Wam w ramach treningu. Wyprowadzenie to jest nawet prostsze niż poprzednio, ponieważ nie trzeba będzie „wyciągać” U_{out} spod pochodnej.

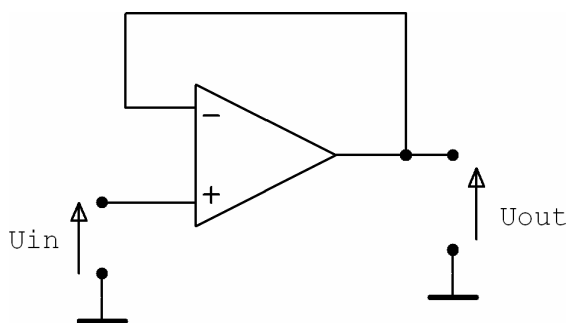


Rysunek 6. Układ różniczkujący.

2.4. Inne układy z WO.

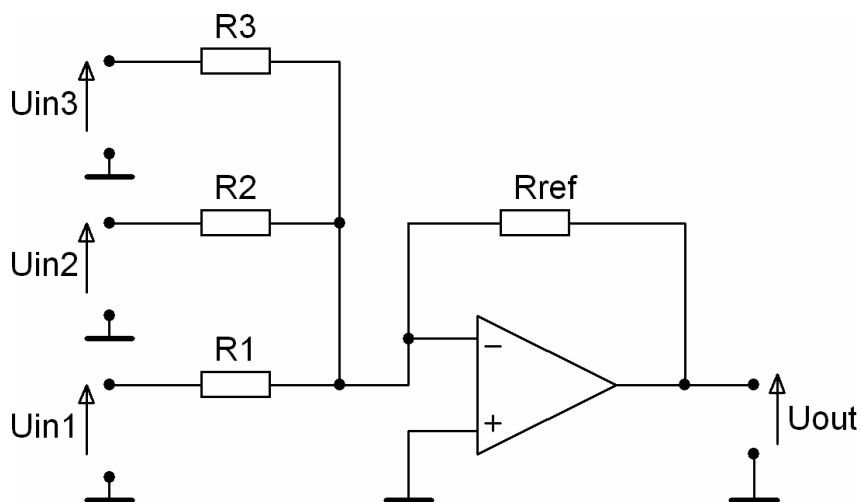
W ramach treningu analizy układów z WO warto rzucić okiem na układy z rysunków 7 i 8.

Układ wtórnika napięciowego jest układem banalnym – do rozwiązania w pamięci.



Rysunek 7. Wtórnik napięciowy.

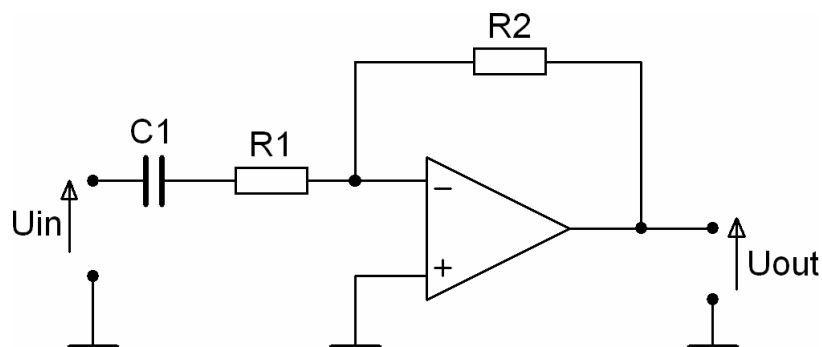
Układ sumatora jest natomiast układem wywodzącym się wprost od układu wzmacniacza odwracającego fazę. Warto pamiętać o tym, że nie zawsze trzeba analizować układ od podstaw, często można się oprzeć na tym co już się wie. Na podstawie układu wzmacniacza odwracającego fazę można w prosty sposób m.in. rozwikłać właśnie działanie układu sumatora, jak i przeanalizować pokazane w kolejnej części wprowadzenia układy filtrów aktywnych pierwszego rzędu.



Rysunek 8. Sumator.

2.5. Filtr dolnoprzepustowy i górnoprzepustowy

Spróbujmy więc przeanalizować układ z rysunku 9 używając wcześniej zdobytego doświadczenia z układami na WO.



Rysunek 9. Filtr górnoprzepustowy.

Układ ten jest bliski układowi wzmacniacza odwracającego fazę, jeżeli zamiast rezystancji użyjemy w nim impedancji to wyjdzie nam:

$$U_{out} = -\frac{Z_2}{Z_1} \cdot U_{in},$$

gdzie $Z_2=R_2$, natomiast $Z_1=R_1+X_{C1}$, gdzie X_{C1} to reaktancja kondensatora. Mamy zatem wzór:

$$U_{out} = -\frac{R_2}{R_1 + X_{C1}} \cdot U_{in}.$$

Jak wiemy wzór na reaktancję kondensatora wygląda następująco: $X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$. W tym wzorze jedyną zmienną jest częstotliwość – f. Skoro tak, to jak zachowa się ten układ w funkcji częstotliwości?

Gdy f będzie duże, X_C będzie dążyć do zera i wzór opisujący układ przyjmie postać: $U_{out} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot U_{in}$, czyli układ dla odpowiednio dużych częstotliwości będzie zachowywał się jak układ wzmacniacza odwracającego fazę **ze wzmacnieniem w paśmie przepustowym H_U równym $-\frac{R_2}{R_1}$** .

A co dla mniejszych częstotliwości? W pewnym momencie reaktancja kondensatora stanie się nie do pominięcia i układ nie będzie już wzmacniaczem odwracającym fazę o stałym wzmacnieniu, lecz zacznie go opisywać wzór zawierający reaktancję, która zmienia się z częstotliwością - konkretnie maleje. A co to oznacza? Że uzyskaliśmy układ który dla „dużych” częstotliwości ma stałe wzmacnienie, a dla „małych” jego wzmacnienie szybko maleje. Jest to zatem układ przepuszczający tylko pewną (górną) część pasma częstotliwości – więc po prostu filtr górnoprzepustowy (zwany też dolnozaporowym). No ale po co nam filtr o którym nie wiemy „odkąd” zaczyna puszczać sygnał (inaczej mówiąc „dokąd” go obcina).

Powiedzmy więc, że interesuje nas częstotliwość dla której reaktancja kondensatora C_1 zaczyna mieć większe znaczenie we wzorze niż rezystancja R_1 . Policzmy:

$$R_1 = X_{C1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_1} \quad \rightarrow \quad f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot C_1}.$$

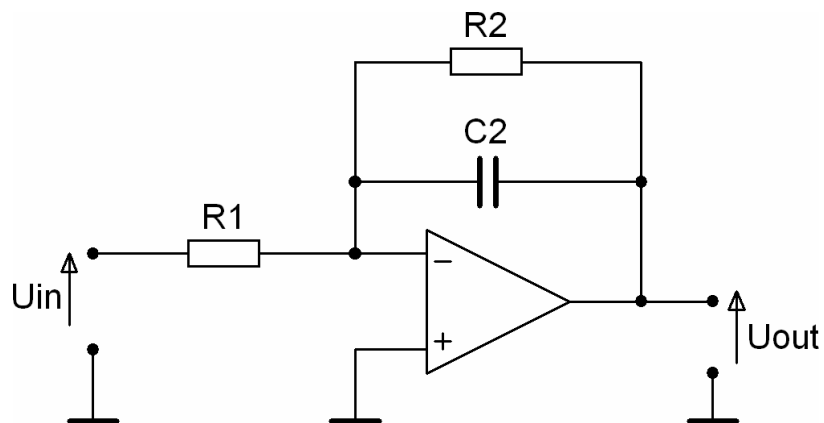
Obliczona tu wartość częstotliwości f jest umowną wartością graniczną, w tym przypadku **jest to dolna granica przepustowości tego filtra**. Dla tej częstotliwości wzmacnienie jest $\sqrt{2} = 1,41$ (czyli 3dB) razy mniejsze od wzmacnienia w

paśmie przepustowym. Zatem zaprojektowanie filtra pokazanego na rysunku 9 sprowadza się do dobrania rezystancji R_2 i R_1 zależnie od zakładanego wzmocnienia układu i dobranie pojemności kondensatora C_1 do częstotliwości granicznej filtra.

Analogicznym do pokazanego sposobem można przeanalizować układ z rysunku 10. Jest to układ filtra tym razem dolnoprzepustowego (czyli górnopropustowego), dla którego górną granicą przepustowości jest równa

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot C_2}$$

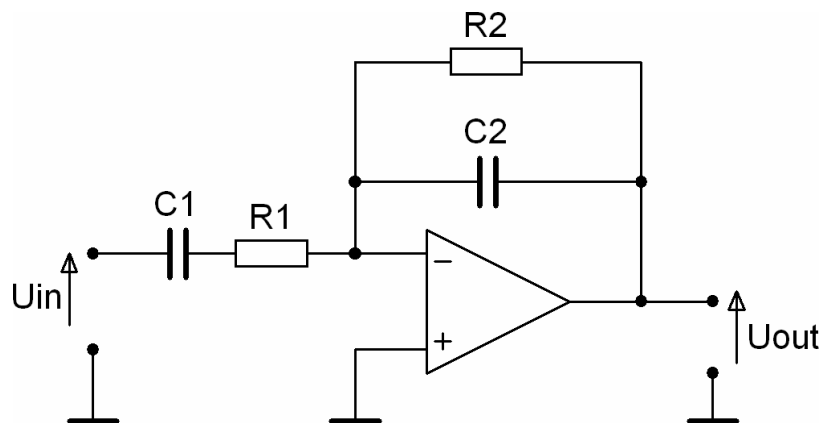
. Możecie to przyjąć na wiarę, albo dokonać tej analizy. Oczywiście polecam to drugie rozwiązanie :)



Rysunek 10. Filtr dolnoprzepustowy.

2.6. Kilka słów na koniec

Spójrzmy jeszcze na układ z rysunku 11:



Rysunek 11. Filtr pasmowoprzepustowy.

Jest to po prostu złożenie dwóch wyżej omówionych wersji filtra: dolno- i górnoprzepustowej. Analiza tego układu sprowadza się do chwili namysłu.

Filtr ten ma oczywiście dwie granice przepustowości, jedną – dolną, wynikającą z C_1 i R_1 , a drugą – górną, wynikającą z C_2 i R_2 (o jego wzmocnieniu decydują oczywiście rezystory R_1 i R_2). Zatem, jeżeli górna granica przepustowości jest wyżej niż dolna, układ „przepuszcza” częstotliwości mieszczące się między tymi granicami, więc jako całość stanowi układ filtra pasmowoprzepustowego.

Wyżej omówione układy są oczywiście układami najprostszymi, co nie znaczy jednak że bezużytecznymi. Są one używane w wielu okolicznościach (na przykład układ filtra z rysunku 10 jest często stosowany do obciążenia niepotrzebnych wysokich częstotliwości w systemach audio) i oczywiście stanowią podstawę do budowy układów bardziej skomplikowanych. Warto też wiedzieć, że układem wyjściowym jest najczęściej układ wzmacniacza odwracającego fazę.