

**Cel ćwiczenia:** Poznanie cech wzmacniaczy operacyjnych oraz charakterystyk opisujących wzmacniacz poprzez przeprowadzenie pomiarów dla wzmacniacza odwracającego.

### Program ćwiczenia

#### 1. Identyfikacja poszczególnych elementów schematu

Na podstawie rys. 1 i 2 wskazać na makiecie poszczególne elementy układu wzmacniacza odwracającego. Podpowiedź: wyprowadzenie („nóżka”) 1 wzmacniacza oznaczona jest kropką.

#### 2. Obserwacja pracy wzmacniacza w warunkach przesterowania i pomiar charakterystyki przejściowej ( $f=const$ ).

- Ustalić stałą częstotliwość sygnału, na tyle małą, aby nie obserwować spadku wzmocnienia (kilkaset Hz).
- Wybrać wzmocnienie 10V/V.
- Powoli zwiększając napięcie wejściowe obserwować na ekranie oscyloskopu zmiany kształtu sygnału na wyjściu. Naszkicować przebiegi. Dla jakiego napięcia wejściowego można zaobserwować zniekształcenie sygnału wyjściowego?
- Opisać czynności powtórzyć dla wzmocnienia 100V/V. Porównać obserwacje. Jakie jest maksymalne dla danego wzmocnienia napięcie wejściowe, przy którym sygnał nie ulega przesterowaniu?

#### 3. Wyznaczenie charakterystyki częstotliwościowej wzmacniacza ( $U_{we}=const$ )

- Połączyć układ pomiarowy jak na rys. 1.
- Wybrać wzmocnienie 10V/V.
- Ustalić stałą, niewielką (kilkanaście mV) wartość napięcia wejściowego na generatorze.
- Przeprowadzić pomiary napięcia wejściowego i wyjściowego w możliwie szerokim zakresie częstotliwości (ograniczonym przez możliwości woltomierzy).

**UWAGA:** Charakterystykę częstotliwościową wyznaczamy w **skali logarytmicznej na osi częstotliwości**, co należy uwzględnić przy doborze punktów pomiarowych.

- Wyznaczyć wzmocnienie w dB dla wszystkich punktów pomiarowych.
- Pomiary powtórzyć dla wzmocnienia 100V/V.
- Obie otrzymane charakterystyki nanieść na wspólny wykres i porównać. Jak zmienia się pasmo w zależności od wzmocnienia?

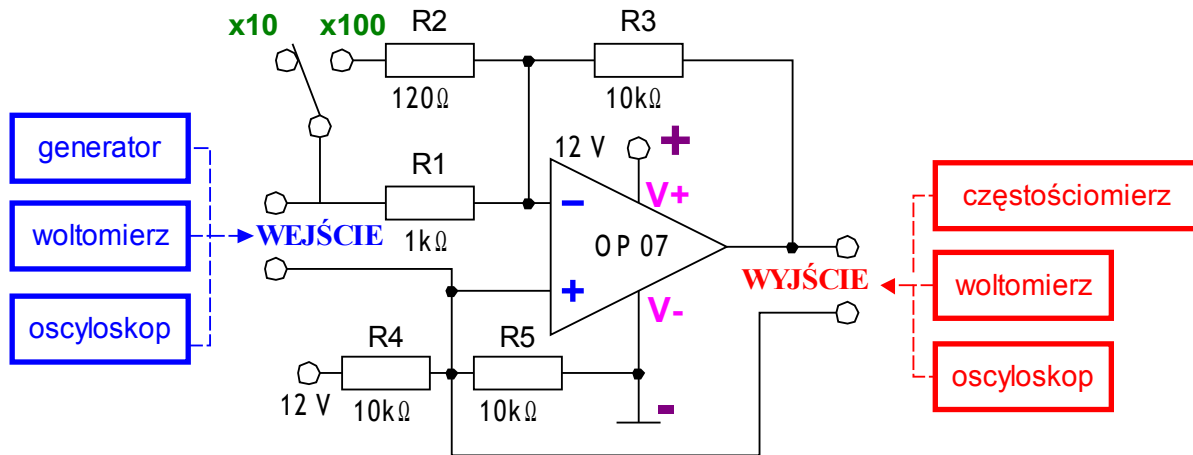
#### 4. Pomiar rezystancji wejściowej układu

Dla obu wzmocnień zmierzyć omomierzem rezystancję wejściową wzmacniacza. Wyjaśnić obserwowany efekt. Jak można go zminimalizować albo uniknąć?

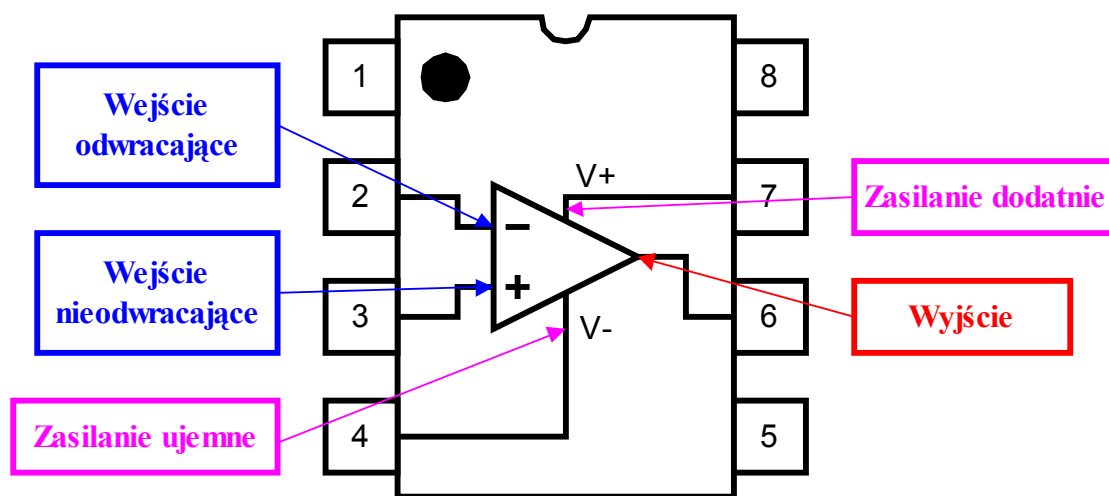
### UWAGI WSTĘPNE

1. **Nie wolno podłączać na WEJŚCIE ani na WYJŚCIE wzmacniacza żadnych napięć, zanim układ nie zostanie zasilony (sekcja ZASILANIE, plus makiety pełniące funkcję zasilacza podłączamy do plusa na makiecie ze wzmacniaczem, a minus do masy, nie na odwrót!). Podanie sygnału na wyprowadzenie nie zasilanego układu scalonego spowoduje jego nieodwracalne uszkodzenie.**
2. **Nie wolno bez wyraźnego polecenia osoby prowadzącej zajęcia, wyjmować wzmacniacza z podstawki.** Niewłaściwe włożenie układu także może powodować jego zniszczenie. W ogólnym przypadku **nie powinno się bez potrzeby dotykać wyprowadzeń układów elektronicznych**, zasada ta dotyczy nie tylko wzmacniaczy operacyjnych.

Rysunki pomocnicze



Rys. 1 Schemat układu pomiarowego



Rys. 2 Opis wyprowadzeń wzmacniacza OP07[1]

Przykładowa tabela pomiarowa

Charakterystyka częstotliwościowa wzmacniacza

f [Hz]	$U_{we}$ [mV]	$\Delta U_{we}$ [mV]	$U_{wy}$ [mV]	$\Delta U_{wy}$ [mV]	$K_u$ [V/V]	$K_u$ [dB]	$\Delta K_u$ [dB]	$\delta K_u$ [%]

## Wprowadzenie

### 1 Wzmacniacz operacyjny i jego zastosowania

Wzmacniacz operacyjny jest analogowym układem scalonym, zbudowanym z zespołu tranzystorów, rezystorów i kondensatorów. Podstawową zaletę tego typu układu stanowi możliwość wykorzystania go w wielu konfiguracjach i do wielu różnych celów, przy jednoczesnej konieczności stosowania jedynie niewielkiej liczby elementów zewnętrznych. Jedne z lepiej znanych przykładów wykorzystania wzmacniaczy operacyjnych to:

- wzmacniacz nieodwracający i odwracający (układ wzmacniający napięcie nie zmieniający fazy sygnału lub zmieniający ją o  $180^\circ$ ),
- wtórnik napięciowy (wykorzystywany do separacji układów),
- wzmacniacz różnicowy (wzmacniający różnicę napięć pomiędzy wejściami),
- sumator (układ dodający napięcia),
- komparator (układ porównujący napięcia),
- układ całkujący i różniczkujący,
- źródło prądowe,
- prostownik małych napięć,
- generator,
- filtr aktywny.

Wymienione przykłady zastosowań dotyczą wielu zagadnień poruszanych już podczas laboratorium i dobrze ilustrują uniwersalność wzmacniacza operacyjnego.

### 2 Cechy idealnego wzmacniacza

Wymieniane w literaturze [2] pożądane cechy idealnego wzmacniacza operacyjnego to:

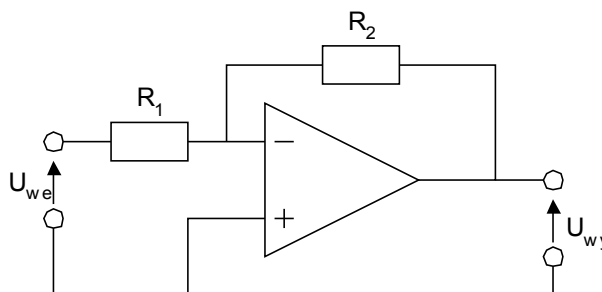
- bardzo duże (nieskończone) wzmocnienie dla otwartej pętli sprzężenia zwrotnego,
- nieskończenie szerokie pasmo przenoszenia częstotliwości (możliwość wzmacniania dowolnie dużej częstotliwości),
- bardzo duża (nieskończona) impedancja wejściowa i bardzo mała (zerowa) impedancja wyjściowa (parametry decydujące o małym spadku napięcia pomiędzy źródłem sygnału a wejściem wzmacniacza oraz wyjściem wzmacniacza a dalszymi blokami układu),
- zerowe napięcie wyjściowe dla zerowego napięcia wejściowego (określane jako brak napięcia offsetu),
- dowolnie duży (nieskończony) dopuszczalny prąd wyjściowy,
- zerowe prądy wejściowe dla obu wejść,
- idealne wzmocnienie różnicowe, wiążące się z nieskończeniem dużym współczynnikiem tłumienia sygnału wspólnego obecnego na obu wejściach,
- zachowanie wymienionych właściwości przy zmianach temperatury.

Założenie, że wzmacniacz operacyjny spełnia wymienione powyżej cechy, w wielu przypadkach nie wprowadza dużego błędu, w istotny sposób upraszczając przybliżoną analizę układów. W rzeczywistości jednak osiągnięcie przez wzmacniacz idealnych parametrów nie jest możliwe, wpływ jego niedoskonałości obserwowany będzie podczas zajęć.

### 3 Wzmacniacz odwracający fazę

Właściwości wzmacniacza operacyjnego podczas laboratorium poznane zostaną na przykładzie układu wzmacniacza odwracającego fazę. Układ taki został przedstawiony na rys. 3. Jak widać na schemacie, rezystor  $R_2$  włączony został w pętlę **ujemnego sprzężenia zwrotnego** (łączy wejście odwracające z wyjściem). Konfiguracja, w której jeden lub więcej elementów

znajduje się w pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego, jest bardzo często spotykana w układach zbudowanych na wzmacniaczu operacyjnym.



Rys. 3 Wzmacniacz odwracający fazę

$$K_u = \frac{U_{wy}}{U_{we}} \left[ \frac{V}{V} \right] \quad (1)$$

Istotnym parametrem opisującym układ wzmacniacza jest jego wzmocnienie, które stanowi iloraz napięcia na wyjściu i wejściu układu (1). Przy założeniu zerowych prądów wejściowych wzmacniacza wzmocnienie układu odwracającego opisane jest równaniem:

$$K_u = \frac{1}{\frac{1}{A} - \frac{R_1}{R_2}} \quad (2)$$

gdzie:  $K_u$  – wzmocnienie całego układu,  
 $A$  – wzmocnienie samego wzmacniacza operacyjnego,  
 $R_1, R_2$  – wartości rezystancji elementów przedstawionych na rys. 3.

Jak widać na podstawie równania (2), zastosowanie ujemnego sprzężenia zwrotnego zmniejsza wzmocnienie wzmacniacza. Rozwiązanie takie ma jednak istotne zalety. Jeżeli założymy, że wzmocnienie wzmacniacza operacyjnego  $A$  jest nieskończenie duże, wzmocnienie  $K_u$  zależy tylko od wartości rezystorów (3), co istotnie ułatwia ustawienie i utrzymanie jego dokładnej wartości.

$$K_u = - \frac{R_2}{R_1} \quad (3)$$

Rozrzut rzeczywistych wartości wzmocnienia  $A$  dla określonego typu wzmacniaczy operacyjnych może być duży, oprócz tego wzmocnienie rzeczywistego wzmacniacza operacyjnego w silny sposób zależy od częstotliwości sygnału wzmacnianego. Zależność ta dla dużych częstotliwości uwidacznia się zresztą także w układzie wzmacniacza odwracającego, co pokaże wyznaczona charakterystyka częstotliwościowa. W miarę zwiększania częstotliwości wzmocnienie  $A$  maleje, przez co przybliżenie opisane równaniem (3) przestaje być poprawne.

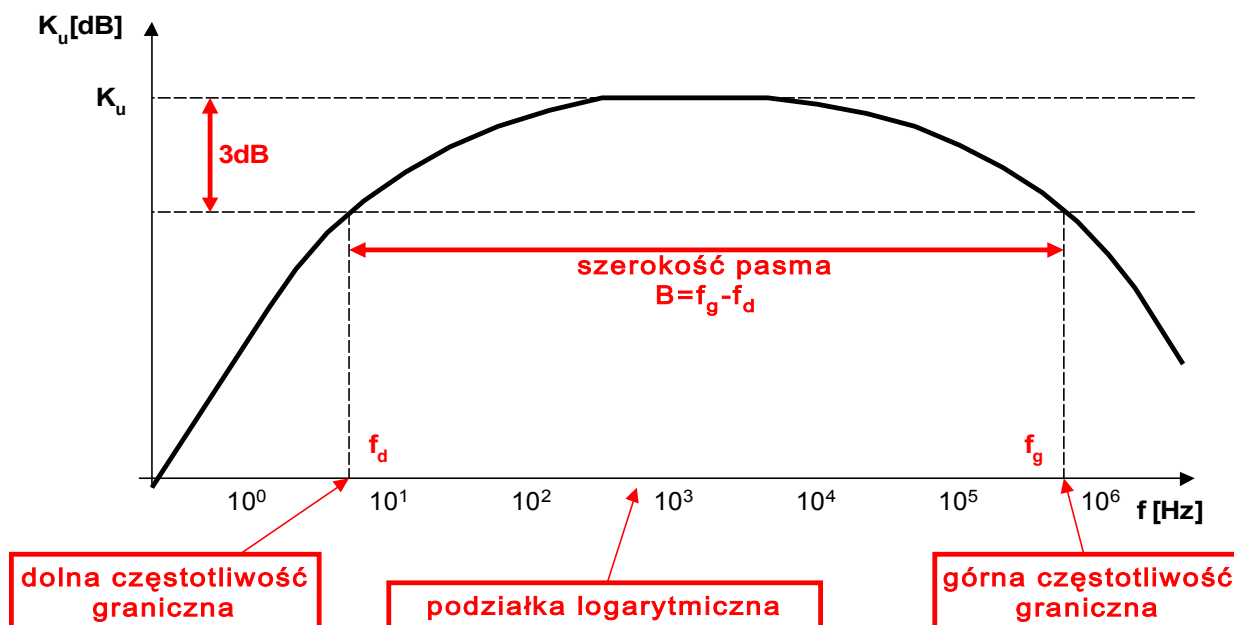
## 4 Charakterystyki opisujące parametry wzmacniacza

## 4.1 Charakterystyka częstotliwościowa

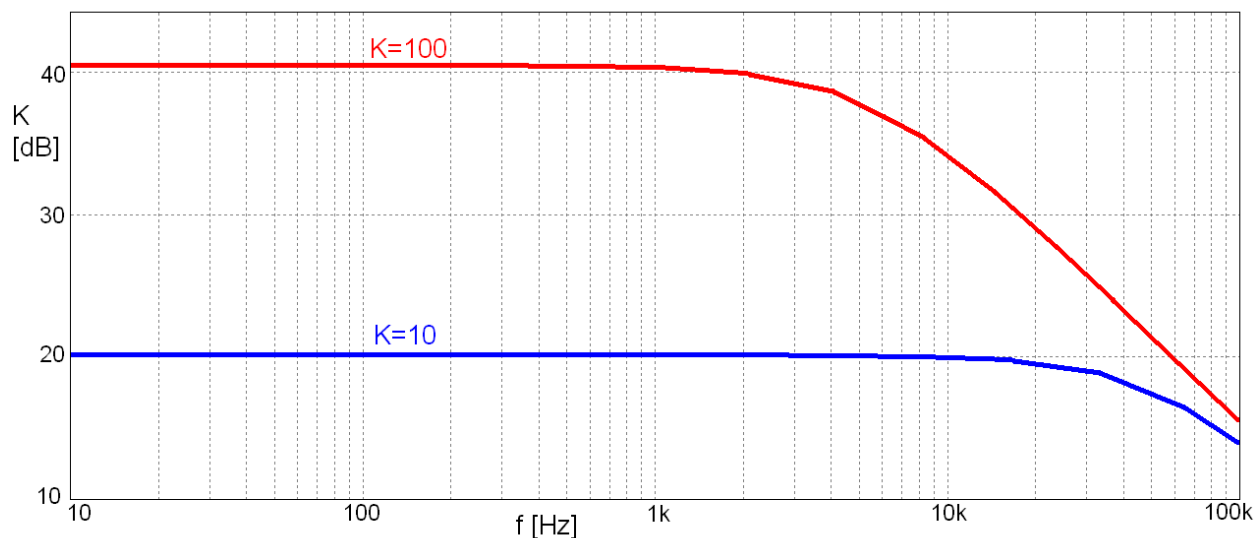
Charakterystyka częstotliwościowa ilustruje zależność wzmocnienia układu w funkcji częstotliwości (rys. 4). Często ze względu na konieczność przeprowadzenia pomiarów w szerokim zakresie częstotliwości oś częstotliwości przedstawiana jest w podziałce logarytmicznej. Wzmocnienie na osi pionowej często przedstawia się w dB (decybelach). Zapis taki ułatwia porównywanie układów znacznie różniących się wzmocnieniem oraz umożliwia określenie w prosty sposób pasma wzmacniacza. Zależność pomiędzy wzmocnieniem w V/V i decybelach opisuje równanie:

$$K_u [dB] = 20 \log \left( \left| K_u \left[ \frac{V}{V} \right] \right| \right) \quad (3)$$

Istotną wielkością związaną z charakterystyką częstotliwościową jest **pasmo przenoszenia** wzmacniacza (rys. 4). Wielkość ta opisuje, w jakim zakresie częstotliwości wzmocnienie układu nie jest zależne od częstotliwości. Jako częstotliwości graniczne przyjmuje się wartości, dla których wzmocnienie zmniejszyło się o 3 dB. Ogólnie szerokość pasma B jest różnicą pomiędzy górną a dolną częstotliwością graniczną. Wzmacniacz operacyjny w konfiguracji odwracającej jest jednak wzmacniaczem stałoprądowym i jego dolna częstotliwość graniczna wynosi 0 Hz, szerokość pasma definiuje więc górną częstotliwość graniczną. Na rys. 5 przedstawiono przykładowe charakterystyki częstotliwościowe wzmacniacza odwracającego o wzmocnieniu 10 i 100.



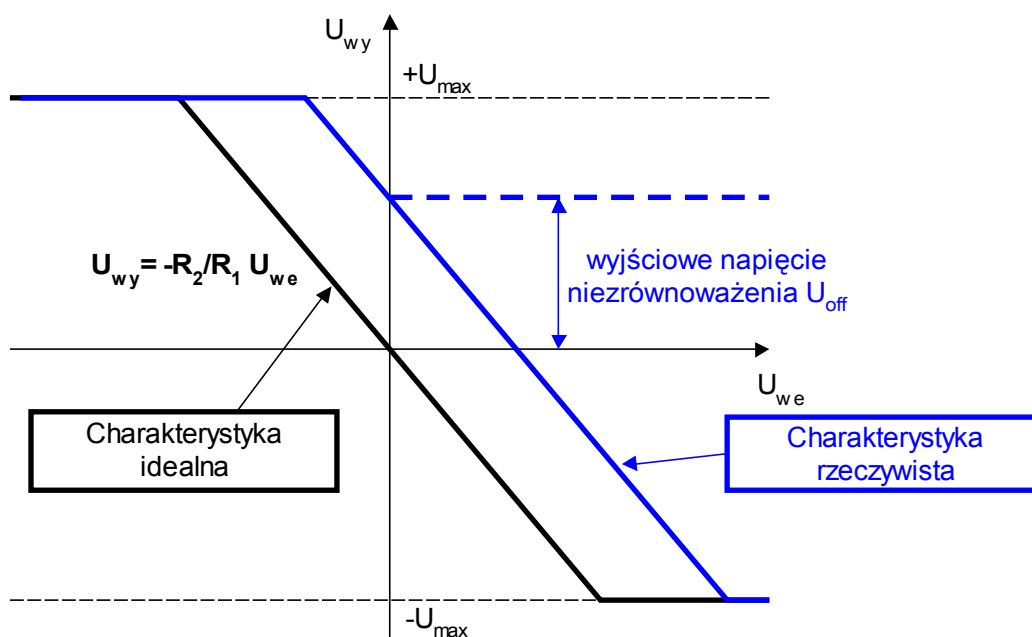
Rys. 4 Charakterystyka częstotliwościowa wzmacniacza



Rys. 5 Przykładowa charakterystyka częstotliwościowa wzmacniacza odwracającego o wzmacnieniu 10 (niebieski wykres) i 100 (czerwony wykres)

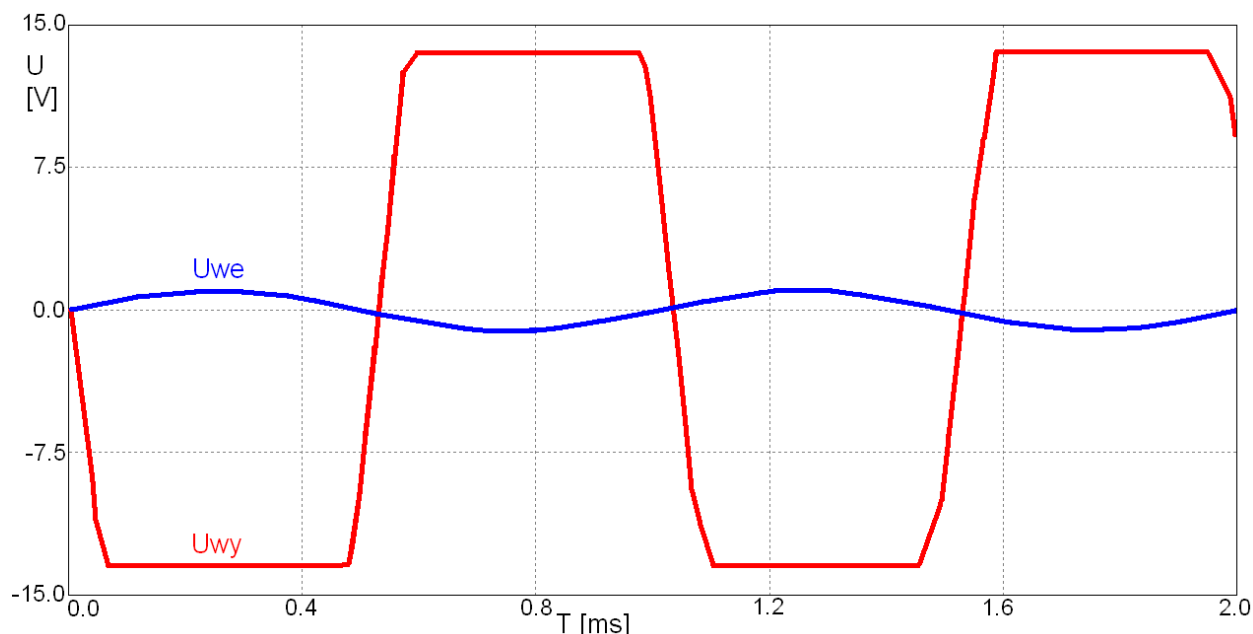
#### 4.2 Charakterystyka przejściowa

Styczna charakterystyka przejściowa opisuje, jak zmienia się napięcie wyjściowe wzmacniacza w funkcji napięcia wejściowego przy  $f = \text{const}$ . Na rys. 6 przedstawiono w sposób schematyczny charakterystykę przejściową wzmacniacza odwracającego dla stałego napięcia wejściowego. Maksymalna wartość napięcia na wyjściu wzmacniacza jest ograniczona przez napięcie zasilania i nie może przekroczyć jego wartości, typowo pomniejszonej o 2 – 3 V. Zaznaczone na wykresie napięcie niezrównoważenia (offsetu) jest kolejnym parametrem rzeczywistego wzmacniacza, wynikającym z jego niedoskonałości.



Rys. 6 Idealna i rzeczywista charakterystyka przejściowa wzmacniacza odwracającego

Jeśli na wejście wzmacniacza podane zostanie napięcie zmienne o zbyt dużej amplitudzie, sygnał uzyskany na wyjściu zostanie zniekształcony, co zostało pokazane na rys. 7. Mamy wtedy do czynienia z tzw. przesterowaniem.



Rys. 7 Wyniki symulacji – sygnał na wejściu wzmacniacza (niebieski) i przesterowany sygnał wyjściowy (czerwony), wzmocnienie wynosi 10, wzmacniacz zasilono napięciami +/- 15 V.

### Pytania kontrolne

1. Wymień cechy idealnego wzmacniacza.
2. Narysuj układ wzmacniacza odwracającego i podaj wzór na jego wzmocnienie.
3. Jakie informacje zawiera charakterystyka częstotliwościowa wzmacniacza?
4. Narysuj charakterystykę przejściową wzmacniacza odwracającego.

### Literatura

- [1] Karta katalogowa układu OP07
- [2] Stacewicz T., Kotlicki A., „Elektronika w laboratorium naukowym”, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa, 1994

### Zestaw przyrządów

Makiety: wzmacniacz operacyjny odwracający i zasilacz napięcia stałego (biała), generator, oscyloskop, multimetr o szerokim paśmie (dwa multimetry lub multimetr + przejściówka przełączająca napięcia), częstościomierz, 2 trójniki

Opracowanie: mgr inż. Nina Tewel