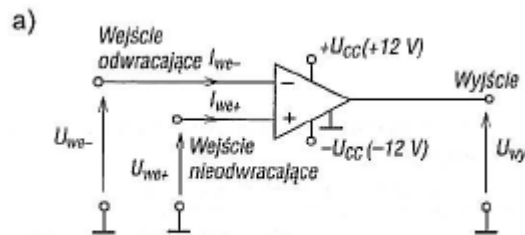
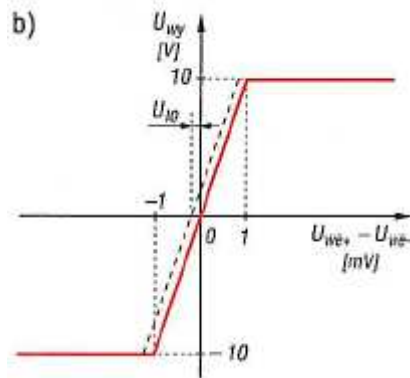


Temat: Wzmacniacze operacyjne – wprowadzenie

1. Wzmacniacz operacyjny – schemat



2. Charakterystyka wzmacniacza operacyjnego



3. Podstawowe właściwości wzmacniacza operacyjnego

- bardzo dużym wzmocnieniem napięciowym (powyżej 10000 V/V czyli 80dB),
- wzmacniają prąd stały ,
- odwracają fazę sygnału wyjściowego w stosunku do sygnału podawanego na wejściu odwracające (oznaczenie „ - „) lub zachowują zgodność w fazie jeżeli sygnał wejściowy jest podawany na wejście nieodwracające (oznaczenie „ + „),
- dużą rezystancję wejściową ($M\Omega$),
- małą rezystancję wyjściową (Ω).

4. Parametry wzmacniacza operacyjnego idealnego

Idealny wzmacniacz operacyjny powinien wykazywać następujące właściwości:

- nieskończenie duże wzmocnienie przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego ($K \rightarrow \infty$);
- nieskończenie szerokie pasmo przenoszonych częstotliwości;

- nieskończenie dużą impedancję wejściową (między wejściami oraz między wejściami a masą);
- impedancję wyjściową równą zero;
- napięcie wyjściowe równe zero przy sterowaniu sygnałem nieróżnicowym (wspólnym);
- wzmacnienie idealne różnicowe, a więc nieskończenie duże tłumienie sygnału nieróżnicowego;
- niezależność parametrów od temperatury.

5. Zastosowanie wzmacniaczy operacyjnych.

Stosowane są głównie w:

- układach analogowych, gdzie wykonują operacje: dodawania, odejmowania, mnożenia, dzielenia, całkowania i różniczkowania,
- wzmacniaczach logarytmicznych,
- generatorach sygnałów: prostokątnych, trójkątnych i sinusoidalnych,
- filtrach,
- detektorach liniowych i detektorach wartości szczytowej,
- układach próbkujących z pamięcią.

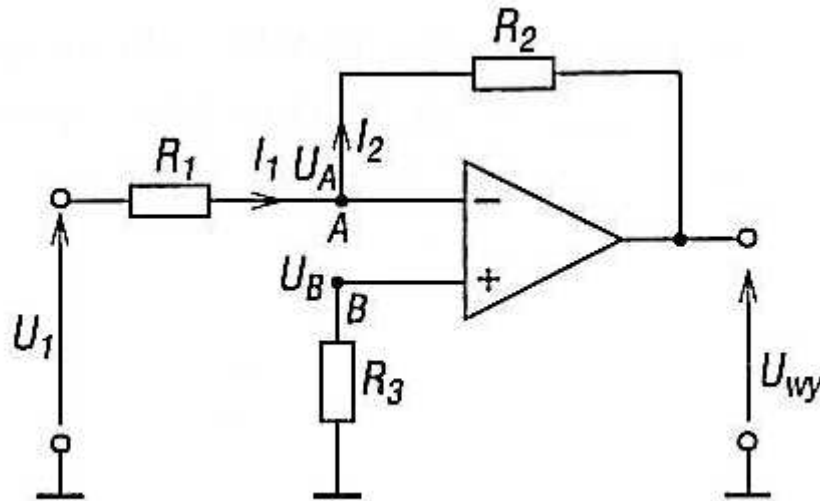
6. Podstawowe układy pracy wzmacniaczy operacyjnych

- Wzmacniacz odwracający,
- Wzmacniacz nieodwracający,
- Wzmacniacz sumujący i odejmujący,
- Wzmacniacz całkujący,
- Wzmacniacz różniczkujący,
- Wtórnik napięciowy,
- Konwerter prąd – napięcie,
- Przesuwnik fazy,
- Prostownik idealny.

Temat: Parametry wzmacniacza operacyjnego.

Temat: Wzmacniacze odwracające i nieodwracające

1. Wzmacniacz odwracający – schemat

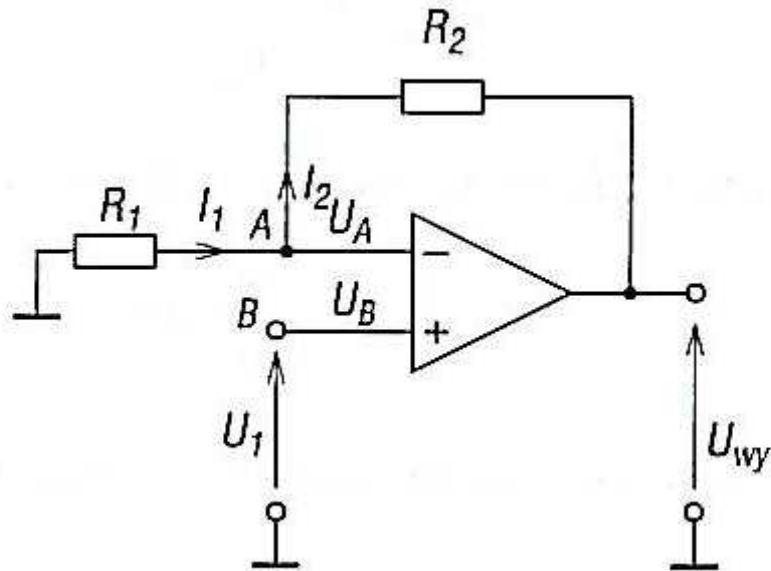


Wzmocnienie napięciowe wzmacniacza operacyjnego odwracającego wynosi:

$$k_u = \frac{U_{wy}}{U_{we}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

- znak „-” oznacza odwrócenie fazy napięcia wyjściowego względem napięcia wejściowego
- sygnał wejściowy podawany jest na wejście odwracające wzmacniacza operacyjnego.
- rezystancja wejściowa układu jest równa R_1 (ponieważ punkt A jest punktem masy pozornej)
- rezystancję wyjściową określa się zgodnie z zależnością obowiązującą dla układu ze sprzężeniem zwrotnym napięciowym równoległym.
- rezystancji R_3 powinna być równa wartości rezystancji wynikającej z równoległego połączenia rezystorów R_1 i R_2

2. Wzmacniacz nieodwracający – schemat



Wzmocnienie napięciowe wzmacniacza operacyjnego nieodwracającego wynosi:

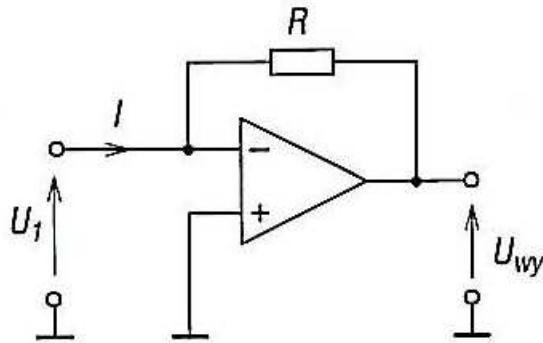
$$k_u = \frac{U_{wy}}{U_{we}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

- sygnał wejściowy jest podawany na wejście nieodwracające wzmacniacza operacyjnego
- napięcia na wejściu odwracającym i wejściu nieodwracającym mają taką samą wartość
- rezystancja wejściowa układu jest równa rezystancji wzmacniacza operacyjnego dla sygnału współbieżnego
- rezystancja wejściowa jest bardzo duża i w praktyce wynosi $10^{10} \div 10^{13} \Omega$.

Temat: Konwerter prąd – napięcie.

1. **Konwerter prąd – napięcie** – układ służący do przetwarzania sygnału prądowego na sygnał napięciowy.

2. Schemat konwertera prąd – napięcie



Napięcie wyjściowe konwertera wynosi

$$U_{wy} = -IR$$

(wartość tą otrzymujemy z analizy pracy wzmacniacza operacyjnego)

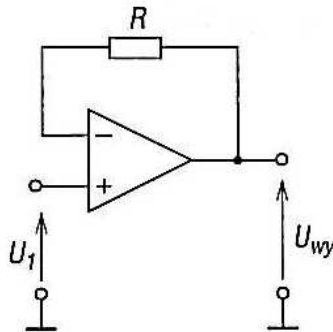
3. Charakterystyka układu

- mała rezystancja wejścia
- możliwość współpracy tylko ze źródłem prądowym (o dużej rezystancji wejściowej) gdyż wejście stanowi masę pozorną
- wartość prądu I nie zależy od parametrów układu konwertera ale od źródła sygnału wejściowego

Temat: Wtórnik napięciowy

1. Wtórnik napięciowy – uzyskuje się ze wzmacniacza nieodwracającego przy zastosowaniu rezystora R_1 o bardzo dużej wartości ($R_1 \rightarrow \infty$). Wartość rezystancji R powinna być równa wartości rezystancji źródła sygnału wejściowego.

2. Schemat wtórnika napięciowego



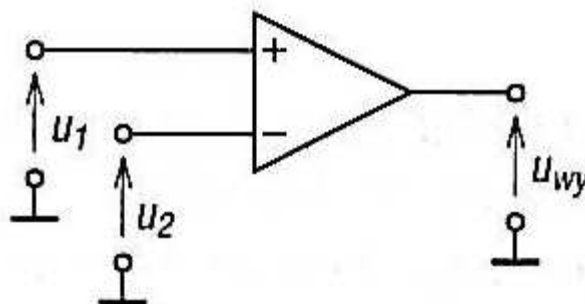
3. Układ charakteryzuje się:

- bardzo dużą rezystancją wejściową (rezystancja dla sygnału współbieżnego)
- małą rezystancją wyjściową (k_{ou} razy mniejsza od rezystancji wejściowej wzmacniacza operacyjnego z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego)

Temat: Komparator.

1. **Komparator** – to układ porównujący wartości chwilowe dwóch przebiegów napięć $u_1(t)$ i $u_2(t)$. Gdy wartości te są jednakowe wówczas na wyjściu komparatora pojawia się skok napięcia. (z niskiego poziomu na wysoki lub z wysokiego poziomu na niski).

2. Symbol komparatora:



3. Analiza komparatora:

Jeden z przebiegów porównywanych jest napięciem stałym (np. $u_1 = const$) zwanym napięciem odniesienia a drugie badanym. Komparator jest elementem wytwarzającym sygnał logiczny 0 gdy $u_2 > u_1$ lub 1 gdy $u_2 < u_1$. Komparator może być jednobitowym przetwornikiem analogowo – cyfrowym.

4. Komparator powinien charakteryzować się:

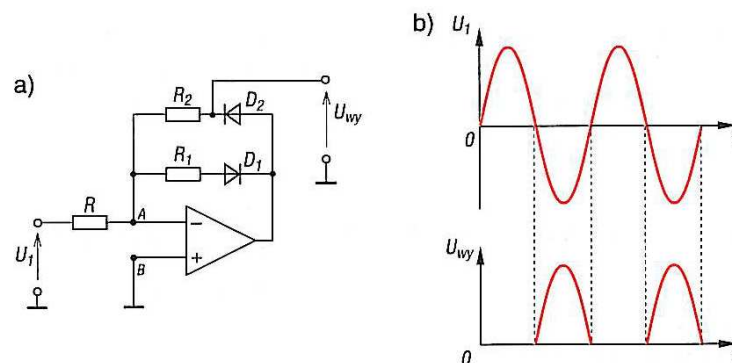
- stałością napięcia porównującego
- małymi czasami narastania i opóźniania sygnału wyjściowego (odpowiedzi)

5. Rodzaje pracy komparatora

- z dodatnim sprzężeniem zwrotnym - komparatory regulacyjne
- bez sprzężenia zwrotnego – komparatory nie regulacyjne

Temat: Prostownik idealny.

1. Prostownik idealny możemy uzyskać stosując wzmacniacz operacyjny w obwodzie ujemnego sprzężenia zwrotnego stosując elementy nieliniowe – diody.



2. Zasada działania:

- napięcie wejściowe o wartości dodatniej – ujemne sprzężenie zwrotne zamyka się rezystor R_1 i diodę D_1 (D_1 w stanie przewodzenia);
- napięcie wejściowe o wartości ujemnej – ujemne sprzężenie zwrotne zamyka się przez rezystor R_2 i diodę D_2 (D_2 w stanie przewodzenia a dioda D_1 w stanie zaporowym);
- diody dzięki wzmacniaczowi operacyjnego przewodzą nawet przy małych (bardzo małych) wartościach napięć

3. Napięcia wyjściowe wynoszą:

- dla wartości dodatniej napięcia U_{we}

$$U_{wy} = -\frac{U_1}{R} \cdot R_1 - U_{D1}$$

- dla wartości ujemnej napięcia U_{we}

$$U_{wy} = -\frac{U_1}{R} \cdot R_2 + U_{D2}$$

Temat: Przesuwnik fazy

1. **Przesuwnikiem fazy** nazywamy układ przesuwający fazę napięcia wyjściowego względem napięcia wejściowego.

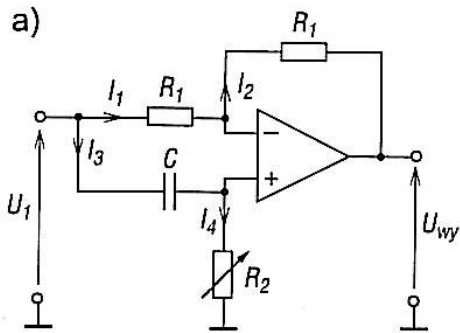
2. Zależność między napięciem wyjścia od napięcia wejściowego

$$U_{wy} = -\frac{1 - j\omega CR_2}{1 + j\omega CR_2} U_{we};$$

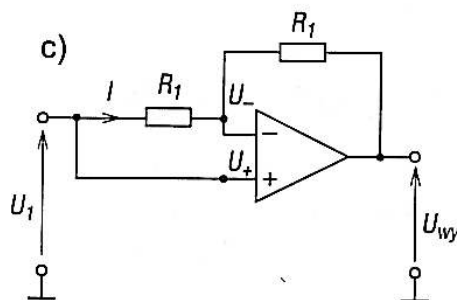
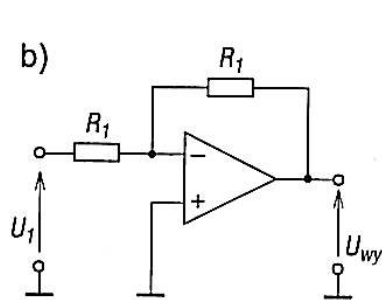
$$\phi = \operatorname{arctg} \frac{2\omega CR_2}{1 - \omega^2 C^2 R_2^2};$$

Jeżeli amplituda sygnału wejściowego będzie stała, a zmieni się jedynie jego częstotliwość, to amplituda sygnału wyjściowego będzie również stała, zmieni się natomiast przesunięcie fazy sygnału wyjściowego względem sygnału wejściowego.

Układ ten jest odpowiednikiem wzmacniacza odejmującego, w którym do obu wejść jest doprowadzone jedno napięcie. W wyniku zamiany rezystora na kondensator, na wejście nieodwracające wzmacniacza jest podawany sygnał wejściowy przesunięty w fazie.



Przesuwnik fazy: a) schemat zasadniczy;
 b) schemat zastępczy dla $R_2 = 0$; c) schemat
 zastępczy dla $R_2 = \infty$



Zmieniając wartość rezystancji R_2 (rezystor regulowany) od 0 do ∞ (przy stałej częstotliwości napięcia wejściowego), uzyskuje się w układzie przesunięcie fazowe od -180° do -360° .

Jeżeli rezystancja $R_2 = 0$, to wejście nieodwracające jest podłączone do masy – jego potencjał jest równy zero. Schemat układu sprowadza się wtedy do postaci przedstawionej na rysunku 10.18b. Jest to schemat wzmacniacza odwracającego o wzmocnieniu $k_u = -1$ i przesunięciu fazowym wynoszącym -180° .

Jeżeli rezystancja $R_2 = \infty$, to napięcie podawane na wejście nieodwracające jest równe napięciu wejściowemu. Schemat układu przedstawiony jest na rysunku 10.18c.

Przy bardzo dużym wzmocnieniu napięciowym wzmacniacza operacyjnego

($k_{uo} \rightarrow \infty$) napięcie na wejściu nieodwracającym jest w przybliżeniu równe napięciu na wejściu odwracającym $U_- = U_+ = U_{we}$. Spadek napięcia na rezystorze R_1 (wywołany przepływem prądu I) wynosi zero.

Wartość prądu wejściowego:

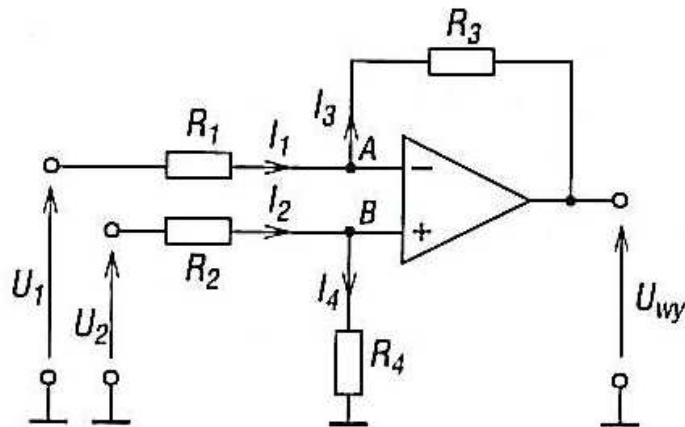
$$I = \frac{\Delta U}{R} = 0$$

Różnica napięć między wejściem odwracającym a wyjściem $U_- = U_{wy} = 0$, wynika z tego, że $U_{wy} = U_{we}$. Układ wówczas jest wtórnikami napięciowym, a jego przesunięcie fazowe wynosi 0° .

Temat: Wzmacniacz odejmujący

1. Wzmacniacz odejmujący - zwany również różnicowym. Realizuje on odejmowanie napięć wejściowych w odpowiednim stosunku zależnym od wartości rezystorów znajdujących się w układzie.

2. Schemat wzmacniacza odejmującego



3. Analiza pracy według procedury przedstawionej wcześniej:

$$U_A = U_B;$$
$$I_1 = I_3; \quad I_2 = I_4;$$
$$I_1 = \frac{U_1 - U_A}{R_1}; \quad I_3 = \frac{U_A - U_{wy}}{R_3};$$

$$\frac{U_1 - U_A}{R_1} = \frac{U_A - U_{wy}}{R_3};$$

stąd

$$U_A = \frac{U_{wy} R_1 + U_1 R_3}{R_1 + R_2};$$

$$I_2 = \frac{U_2 - U_B}{R_2}; \quad I_4 = \frac{U_B}{R_4};$$

$$\frac{U_2 - U_B}{R_2} = \frac{U_B}{R_4};$$

stąd

$$U_B = \frac{U_2 R_4}{R_2 + R_4};$$

Po przekształceniu wzorów otrzymujemy:

$$U_{wy} = -\frac{R_3}{R_1} U_1 + \frac{(R_1 + R_3) R_4}{(R_2 + R_4) R_1} U_2;$$

jeśli spełniony będzie warunek

$$\frac{R_3}{R_1} = \frac{R_4}{R_2};$$

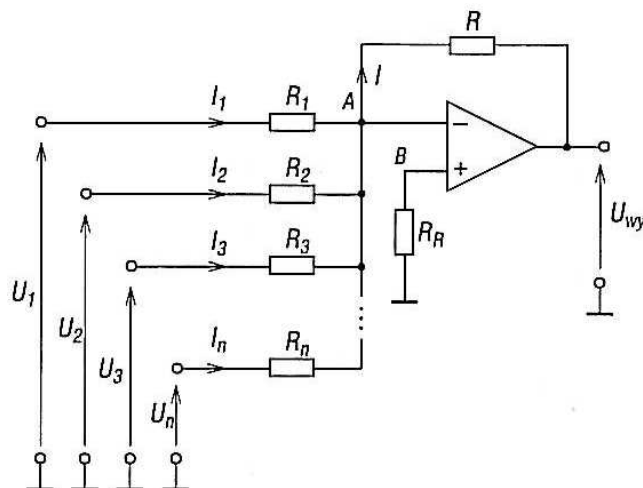
to

$$U_{wy} = \frac{R_3}{R_1} (U_2 - U_1);$$

Rezystancja wejściowa dla wejścia odwracającego, przy $U_2 = 0$ jest równa $R_1 + R_3$, a dla wejścia nieodwracającego $R_2 + R_4$.

Temat: Wzmacniacz sumujący

1. Wzmacniacz sumujący – umożliwia realizację dodawania
2. Schemat wzmacniacza sumującego



3. Analizy pracy wzmacniacza operacyjnego otrzymujemy:

$$U_A = U_B = 0;$$

$$I_1 + I_2 + \dots + I_n = I$$

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U_2}{R_2}; \quad \dots; \quad I_n = \frac{U_n}{R_n};$$

$$I = \frac{R}{U_{wy}};$$

$$U_{wy} = -R \left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \dots + \frac{U_n}{R_n} \right); \quad (10.36)$$

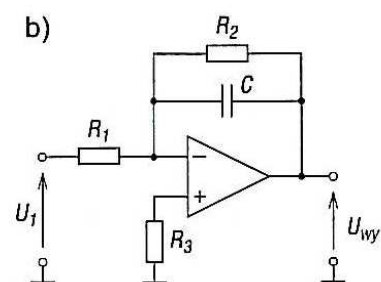
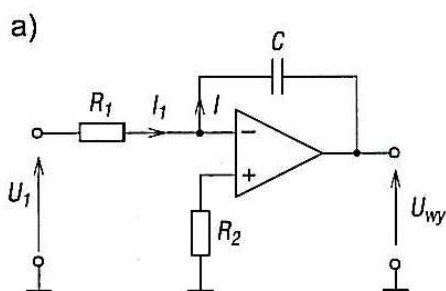
$$U_{wy} = -RI; \quad (10.37)$$

Wartość rezystancji R_R powinna być równa rezystancji wynikającej z równoległego połączenia rezystorów R_1, R_2, \dots, R_n i R .

Temat: Wzmacniacz całkujący – integrator

1. Wzmacniacz całkujący - otrzymuje się poprzez włączenie kondensatora C w obwód sprzężenia zwrotnego.

2. Schemat wzmacniacza całkującego: a) układ podstawowy, b) układ z obwodem RC w pętli sprzężenia zwrotnego



3. Wzmocnienie wzmacniacza całkującego wynosi:

$$k_u = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{1}{j\omega R_1 C}$$

ponieważ

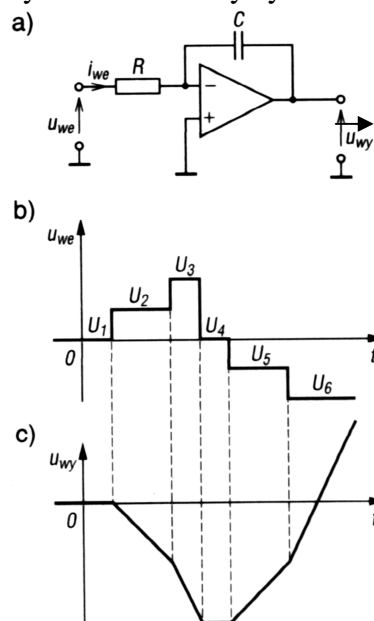
$$Z_1 = R; \quad Z_2 = \frac{1}{j\omega C};$$

Wzmocnienie integratora zależy od częstotliwości sygnału. Jeżeli powyższy układ zostanie zmodyfikowany przez dołączenie rezystora R_2 równolegle do kondensatora C (rys.b) to nastąpi ograniczenie wzmocnienia dla małych częstotliwości. Wzmocnienie tego układu oblicza się ze wzoru:

$$k_u = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{j\omega R_2 C};$$

Dopiero powyżej dolnej częstotliwości granicznej $f_d = \frac{1}{2\pi R_2 C}$, człon ten działa jako wzmacniacz całkujący.

4. Przykład układu całkującego - Układami całkującymi są dolnoprzepustowe filtry pierwszego rzędu, tj. filtry o nachyleniu charakterystyki -6 dB na oktawę (-20 dB na dekadę).



Wzmacniacz całkujący. a) schemat zasadniczy, b) przebieg napięcia wejściowego, c) przebieg napięcia wyjściowego.

5. Zastosowanie układów całkujących.

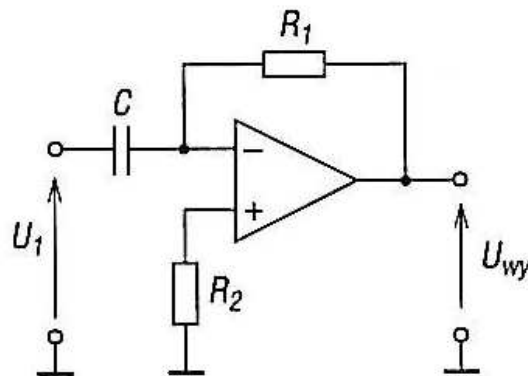
- w generatorach, do kształtowania przebiegu liniowego, trójkątnego i piłokształtnego,

- w filtrach,
- w układach wyznaczania wartości średniej.

Temat: Wzmacniacz różniczkujący

1. Wzmacniacz różniczkujący - uzyskuje się przez zastąpienie rezystora, włączonego na wejściu odwracającego wzmacniacza operacyjnego, kondensatorem C

2. Schemat wzmacniacza różniczkującego.



3. Wzmocnienie napięciowe takiego układu

$$k_u = -\frac{Z_1}{Z_2};$$

gdzie

$$Z_2 = R_1; \quad Z_1 = \frac{1}{j\omega C};$$

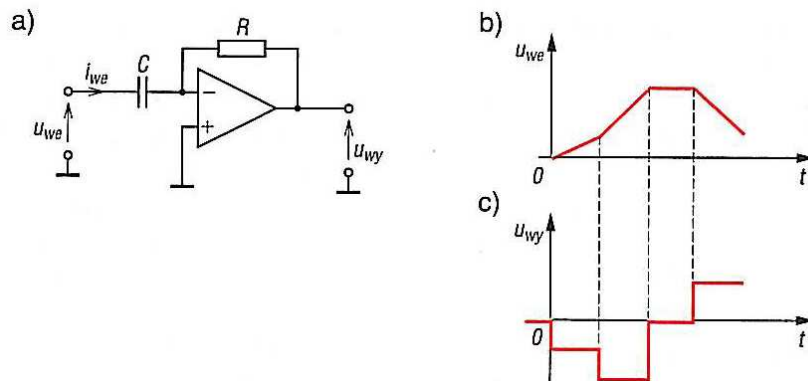
po wykonaniu przekształceń otrzymujemy:

$$k_u = -j\omega R_1 C;$$

4. Zastosowanie wzmacniacza całkującego

- układach kształtujących impulsy szpilkowe
- układach, w których wymagany jest przebieg proporcjonalny do prędkości narastania przebiegu wejściowego
- filtrach

5. Przykład układu różniczkującego - Układami różniczkującymi są górnoprzepustowe filtry pierwszego rzędu, tj. filtry o nachyleniu charakterystyki -6 dB na oktawę (-20 dB na dekadę).

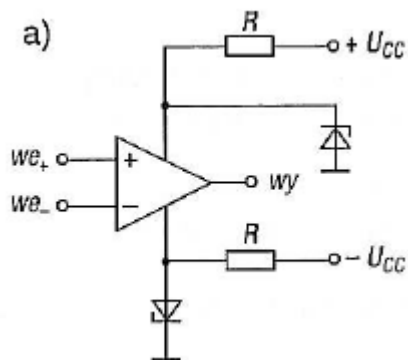


Wzmacniacz różniczkujący .a) schemat zasadniczy, b) przebieg napięcia wejściowego, c) przebieg napięcia wyjściowego.

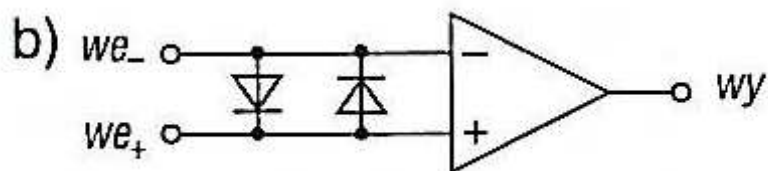
Temat: Zabezpieczenie wzmacniacza operacyjnego przed uszkodzeniem.

1. Przyczyny uszkodzenia wzmacniacza:

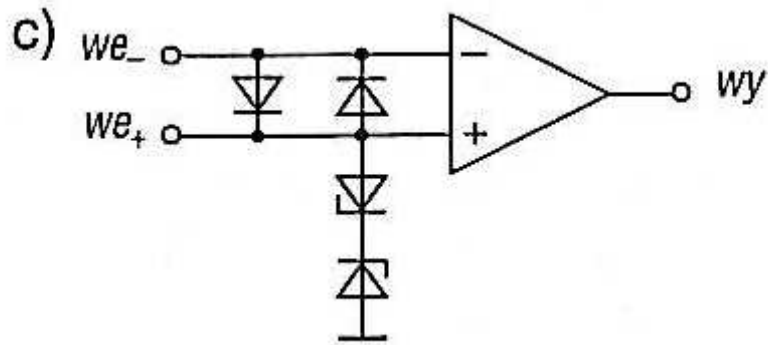
- przekroczenie dopuszczalnej wartości napięcia zasilania lub odwrotne podłączenie źródła zasilania;



- przekroczenie dopuszczalnego napięcia różnicowego;



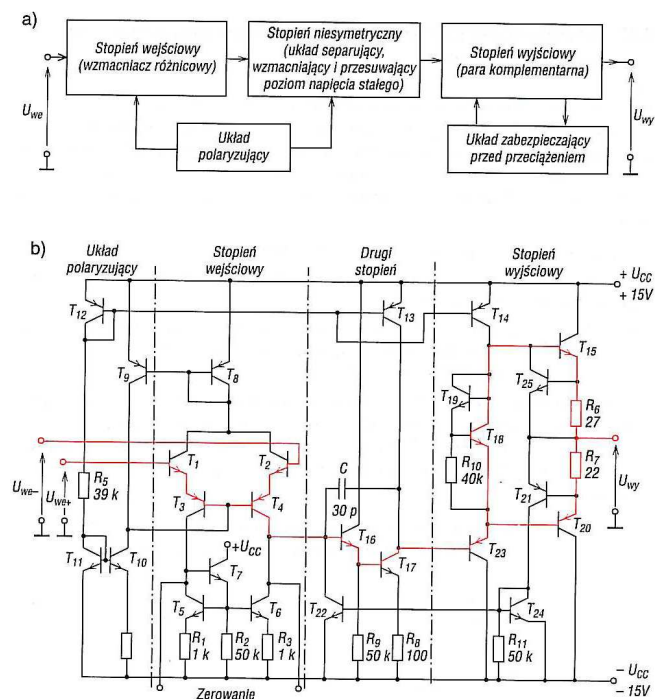
- przekroczenie maksymalnego napięcia wejściowego w stosunku do masy układu;



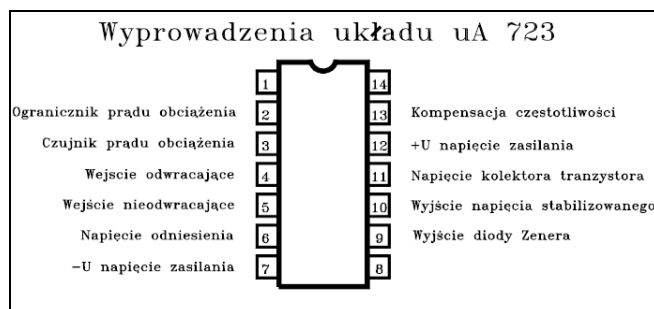
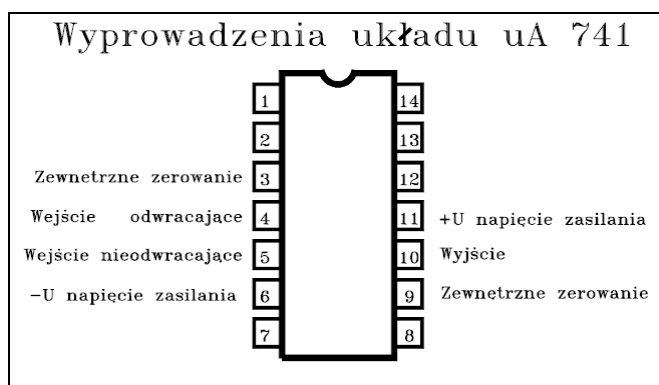
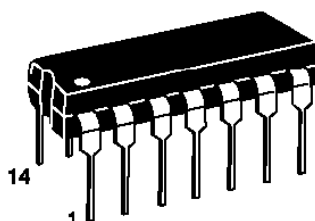
Temat: Budowa i działanie wzmacniacza operacyjnego $\mu A741$

1. Wzmacniacz operacyjny $\mu A741$ składa się:

- stopień wejściowy (wzmacniacz różnicowy) – pierwszy stopień wzmacniający
- drugi stopień wzmacniający (niesymetryczny) separuje wzmacnienie sygnału wejściowego i przesuwają poziom napięcia stałego
- stopień wyjściowy (wzmacniacz prądowy o wzmacnieniu napięciowym $k_u \approx 1$)
- układ polaryzujący (wymuszający i stabilizujący punkt pracy tranzystorów)
- układ zabezpieczający przed przecięciem



Rys. wzmacniacz $\mu A741$: a) schemat funkcjonalny b) schemat zasadniczy



Rys. Wzmacniacz operacyjny: a) widok ogólny, b) identyfikacja wyprowadzeń

Wzmacniacze operacyjne wytwarzane są w technologii scalonej i umieszczone w obudowie o wymiarach ok. 7X10 mm. Wewnątrz znajdują się przeciętnie 25-30 tranzystorów i 10-15 rezystorów.

