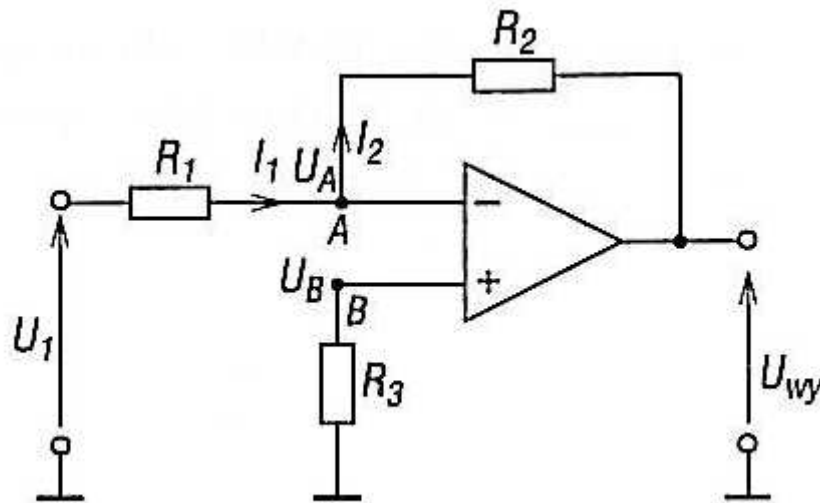


# Zastosowanie wzmacniacza operacyjnego

## 1. Wzmacniacz odwracający – schemat

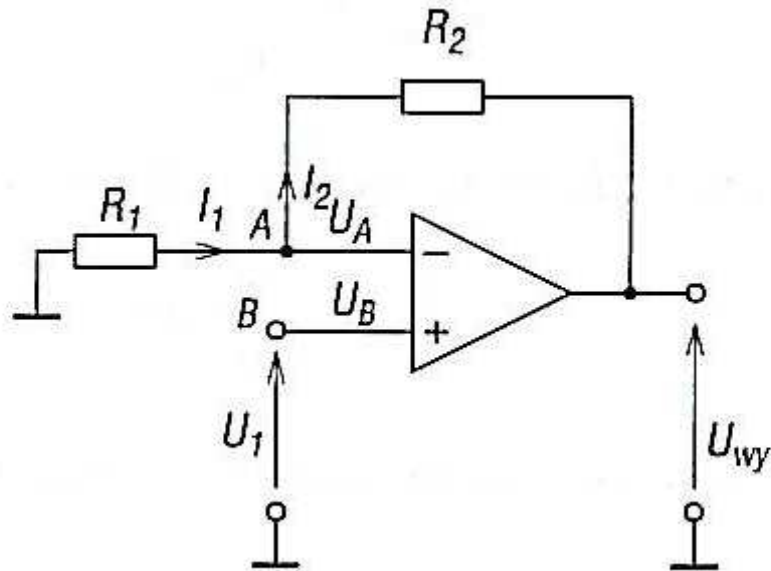


Wzmocnienie napięciowe wzmacniacza operacyjnego odwracającego wynosi:

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

- 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:**

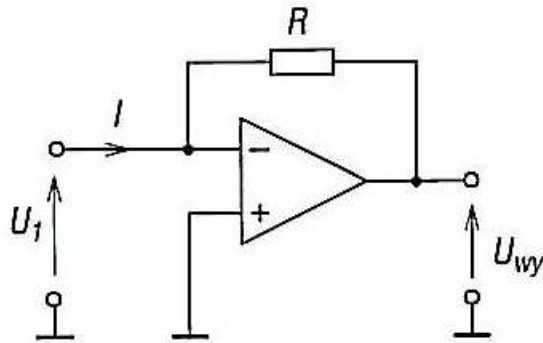
$$k_u = \frac{U_{wy}}{U_{we}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

- 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  $10^{10} \div 10^{13} \Omega$ .

## 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)

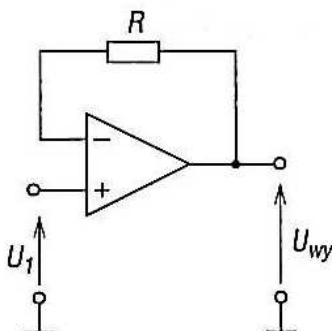
3. Charakterystyka układu

- 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

## 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



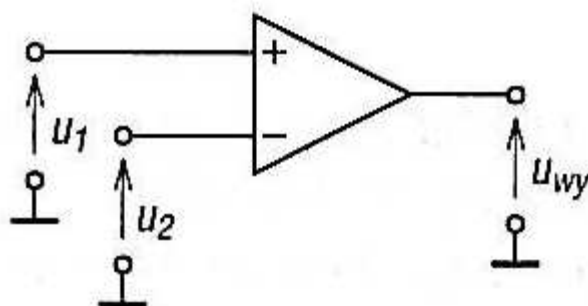
3. Układ charakteryzuje się:

- 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)

## 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:

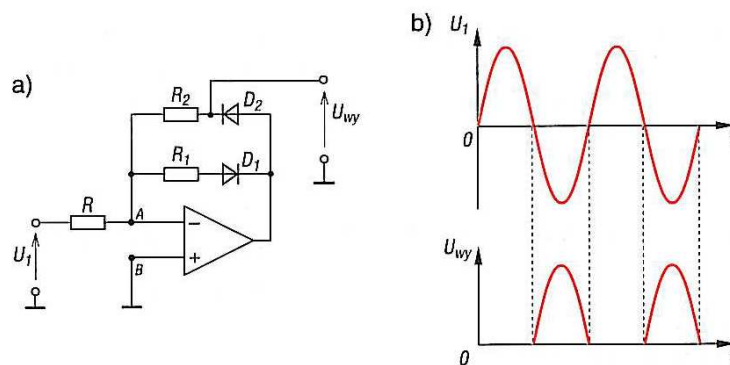
- stałością napięcia porównującego
- małymi czasami narastania i opóźniania sygnału wyjściowego (odpowiedzi)

### 5. Rodzaje pracy komparatora

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

## 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  $U_{we}$

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

## Przesuwnik fazy

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

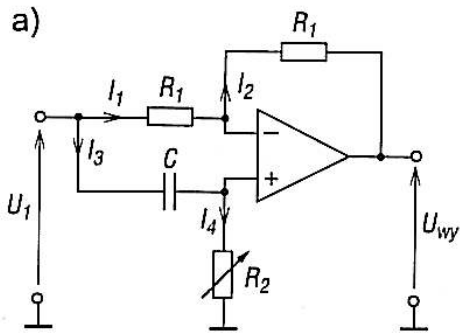
2. Zależność między napięciem wyjścia od napięcia wejściowego

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

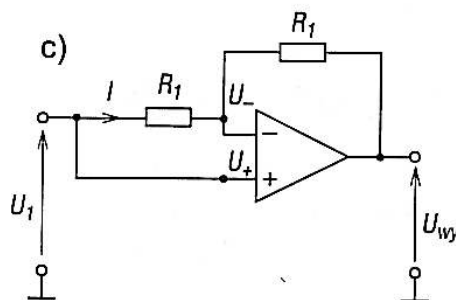
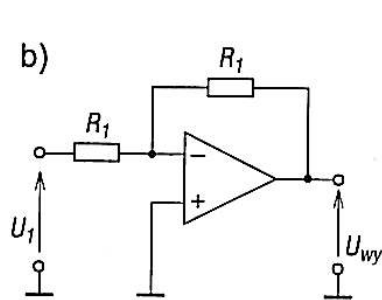
$$\phi = \arctg \frac{2\omega CR_2}{1 - \omega^2 C^2 R_2^2};$$

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  $\infty$  (przy stałej częstotliwości napięcia wejściowego), uzyskuje się w układzie przesunięcie fazowe od  $-180^\circ$  do  $-360^\circ$ .

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  $-180^\circ$ .

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:

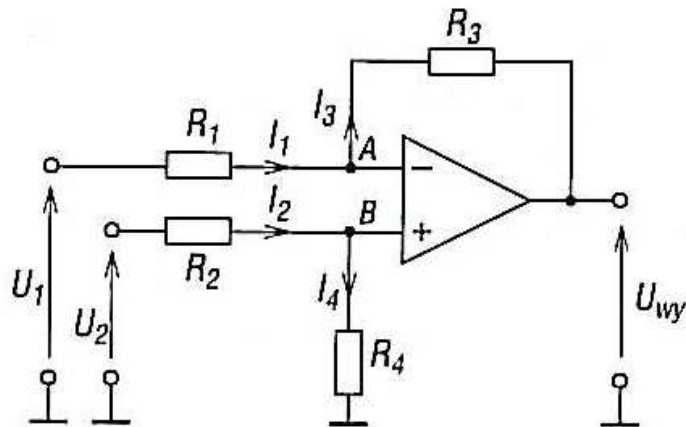
$$I = \frac{\Delta U}{R} = 0$$

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  $0^\circ$ .

## 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

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

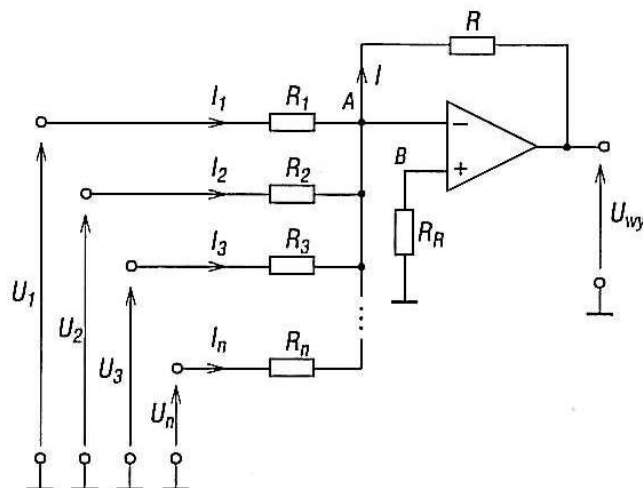
to

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

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

## Wzmacniacz sumujący

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



3. Analizy pracy wzmacniacza operacyjnego otrzymujemy:

$$U_A = U_B = 0;$$

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

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

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

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

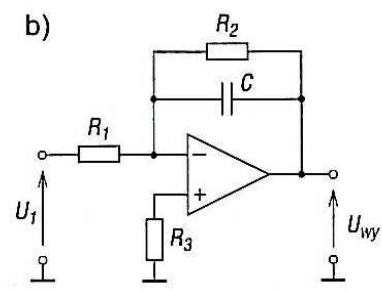
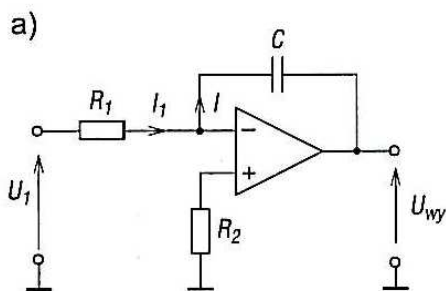
$$U_{wy} = -RI; \quad (10.37)$$

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

### 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

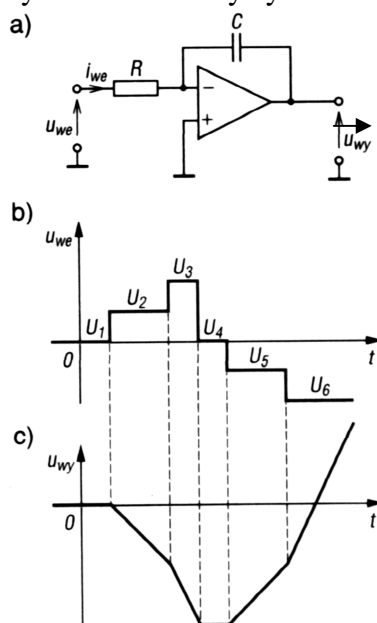
$$Z_1 = R; \quad Z_2 = \frac{1}{j\omega C};$$

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.

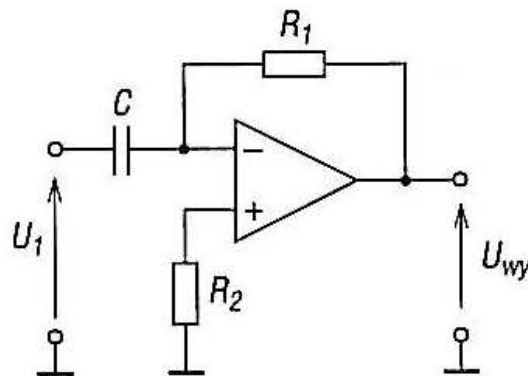
- w generatorach, do kształtowania przebiegu liniowego, trójkątnego i piłokształtnego,

- w filtrach,
- w układach wyznaczania wartości średniej.

## 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

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

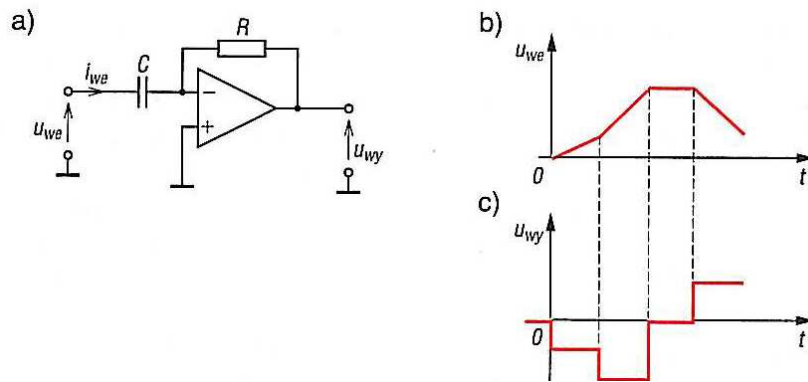
po wykonaniu przekształceń otrzymujemy:

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

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).

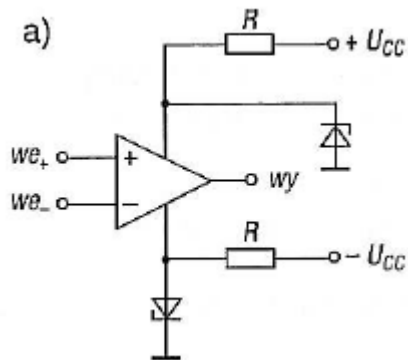


Wzmacniacz różniczkujący .a) schemat zasadniczy, b) przebieg napięcia wejściowego, c) przebieg napięcia wyjściowego.

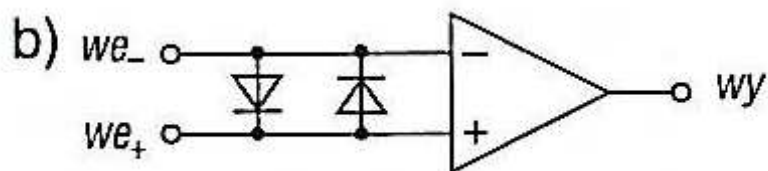
### Zabezpieczenie wzmacniacza operacyjnego przed uszkodzeniem.

1. Przyczyny uszkodzenia wzmacniacza:

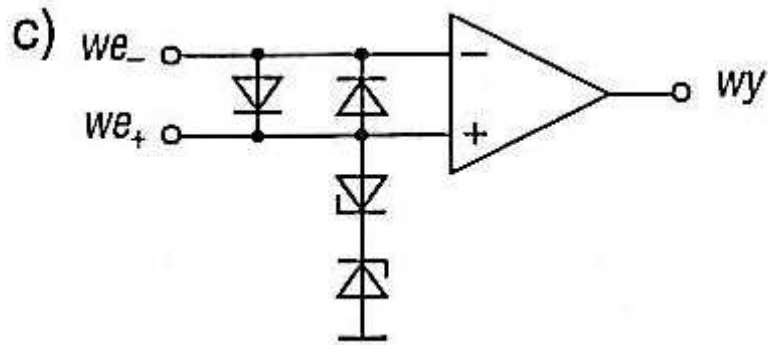
- przekroczenie dopuszczalnej wartości napięcia zasilania lub odwrotne podłączenie źródła zasilania;



- przekroczenie dopuszczalnego napięcia różnicowego;



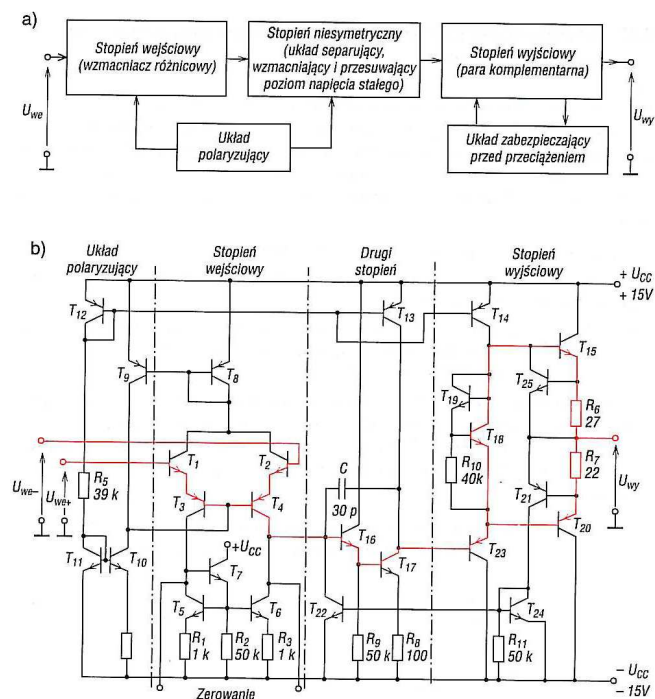
- przekroczenie maksymalnego napięcia wejściowego w stosunku do masy układu;



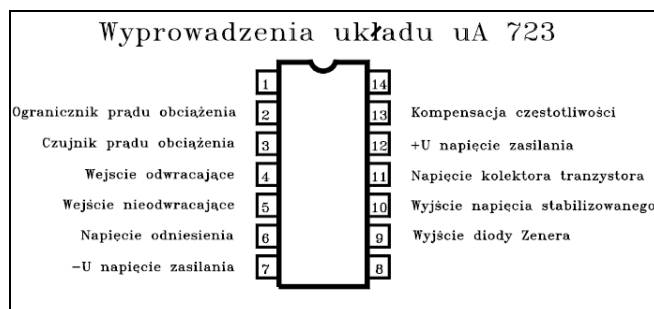
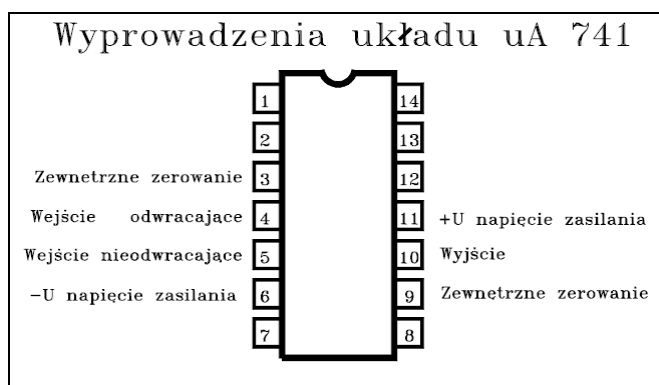
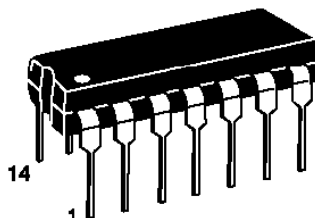
## Budowa i działanie wzmacniacza operacyjnego $\mu A741$

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.