

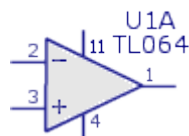
WZMACNIACZ OPERACYJNY

Wzmacniacze operacyjne są chyba najbardziej rozpowszechnionymi analogowymi układami scalonymi. Początek tych układów sięga czasów dla niektórych zupełnie historycznych, bo lat pięćdziesiątych XX wieku. Oczywiście nie było jeszcze wtedy mowy o takiej postaci tych układów jak obecnie. W tamtych czasach układy te stosowane były w maszynach analogowych i służyły jedynie do wykonywania operacji matematycznych, takich jak dodawanie czy całkowanie, stąd też pochodzi ich nazwa wzmacniacz operacyjny.

Wzmacniacz operacyjny opisywany jest jako wzmacniacz prądu stałego, czy jak kto woli wzmacniacz o sprzężeniach bezpośrednich, który charakteryzuje się bardzo dużym wzmocnieniem, wejściem różnicowym (symetrycznym) i wyjściem asymetrycznym - są również wzmacniacze z wyjściem symetrycznym.

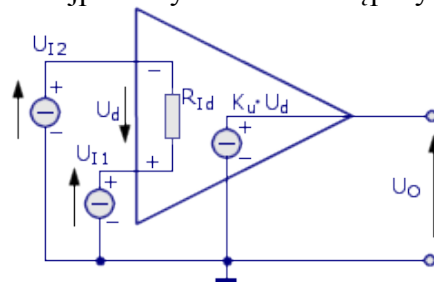
Wzmacniacz operacyjny służy podobnie jak inne wzmacniacze do wzmocnienia napięcia czy też mocy, różni się jednak od zwykłych wzmacniaczy tym, że w przeciwieństwie do nich sposób jego działania zależy głównie od zastosowanego zewnętrznego obwodu sprzężenia zwrotnego (najczęściej silnego ujemnego sprzężenia zwrotnego).

Na rysunku 6.1 przedstawiony jest przykładowy symbol graficzny wzmacniacza operacyjnego. Wejście oznaczone znakiem "-" jest tak zwanym wejściem odwracającym (odwraca fazę sygnału wejściowego), wejście oznaczone znakiem "+" to wejście nieodwracające, po przeciwnej stronie znajduje się wyjście wzmacniacza (w tym przypadku końcówka nr 1). Aby na wejściach i wyjściu mogły występować napięcia zarówno dodatnie jak i ujemne to układ musi być zasilany napięciami dodatnim i ujemnym podawanymi na końcówki 4 i 11 (oczywiście dotyczy to tego typu wzmacniacza jak na rys. 6.1 dla innych typów będą to inne numery końcówek).



rys. 6.1

Na rysunku 6.2 pokazany jest najprostszy schemat zastępczy wzmacniacza operacyjnego.



rys. 6.2

Na wejście odwracające doprowadzony jest sygnał U_{12} , na wejście nieodwracające U_{11} . Sygnał wejściowy występujący pomiędzy wejściami wzmacniacza jest nazywany sygnałem różnicowym U_d i jest równy różnicy sygnałów wejściowych $U_{11} - U_{12}$. Pomiedzy wejściami wzmacniacza występuje wejściowa rezystancja różnicowa R_d . Napięcie wyjściowe jest proporcjonalne do wejściowego napięcia różnicowego U_d , a współczynnik K_u jest nazywany

wzmocnieniem napięciowym wzmacniacza z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego (open loop gain). Napięcie na wyjściu wzmacniacza można, więc opisać zależnością

$$U_o = K_u \cdot (U_{i1} - U_{i2}) = K_u \cdot U_d$$

Właściwości idealnego wzmacniacza operacyjnego można w skrócie przedstawić następująco:

- nieskończenie duże wzmocnienie przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego,
- nieskończenie duża wejściowa impedancja zarówno różnicowa jak i pomiędzy każdym wejściem i masą,
- impedancja wyjściowa równa zero,
- nieskończenie szerokie pasmo przenoszenia częstotliwości,
- napięcie wyjściowe równe zero przy równych napięciach wejściowych,
- zerowy prąd wejściowy,
- nieskończenie duży dopuszczalny prąd wyjściowy,
- nieskończenie duże tłumienie sygnału współbieżnego,
- niezmiennosc parametrów pod wpływem temperatury.

Oczywiście wszystkie te właściwości nie są osiągalne, ale upraszczają analizę wzmacniaczy i stanowią wyznacznik do osiągania najlepszych parametrów produkcyjnych wzmacniaczy.

Parametry wzmacniacza operacyjnego rzeczywistego:

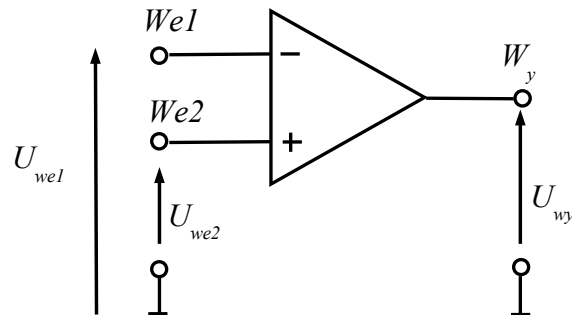
- wzmocnienie napięciowe różnicowe K_{ur} .
- wzmocnienie napięciowe sumacyjne K_{us} .
- współczynnik tłumienia sygnału sumacyjnego H_s .
- rezystancja (impedancja) wejściowa różnicowa $r_{wer}(Z_{wer})$.
- rezystancja (impedancja) wejściowa sumacyjna $r_{wes}(Z_{wes})$.
- rezystancja (impedancja) wyjściowa $r_{wy}(Z_{wy})$.
- wejściowy prąd polaryzacji I_{we} .
- wejściowe napięcia niezrównoważenia U_{wen} .
- wejściowy prąd niezrównoważenia I_{wen} .
- Ddryfty: temperaturowy i czasowy wejściowego napięcia i prądu niezrównoważenia.
- parametry graniczne: maksymalne napięcie wejściowe $U_{we max}$, maksymalne różnicowe napięcie wejściowe $U_{wer max}$, maksymalne napięcie wyjściowe $U_{wy max}$, maksymalny prąd wyjściowy $I_{wy max}$.
- napięcie U_z i moc P_z zasilania.
- szerokość pasma częstotliwości – określana częstotliwością graniczną f_g , marginesem wzmocnienia A i marginesem fazy α .
- parametry odpowiedzi na skok napięcia: czas narastania t_n , szybkość narastania S , przeregulowanie (przerzut) δ_u .

WZMACNIACZE OPERACYJNE.

Wzmacniacze operacyjne stanowią największą grupę analogowych układów scalonych. Charakteryzują się następującymi właściwościami:

- 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).



Rys. 10.8. Symbol wzmacniacza operacyjnego.

Podział wzmacniaczy ze względu na przeznaczenie:

- ogólnego przeznaczenia,
- szerokopasmowe,
- stosowane w urządzeniach dokładnych, gdzie wymagana jest duża rezystancja wejściowa, mały współczynnik cieplny i małe szумы,
- do zastosowań specjalnych.

Zastosowanie wzmacniaczy operacyjnych:

- 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.

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.

Procedura do przeprowadzenia analizy pracy wzmacniacza operacyjnego:

Zakłada się, że rezystancja wejściowa wzmacniacza operacyjnego jest nieskończenie duża (wzmacniacz nie pobiera prądów wejściowych), wartości prądów polaryzujących są równe zero

$$I_{we-} = I_{we+} = 0; \quad (10.25)$$

Literami oznacza się węzły na schemacie (np. A , B) i ich potencjały (np. U_A , U_B).

Zaznacza się prądy płynące w układzie (np. I_1 , I_2).

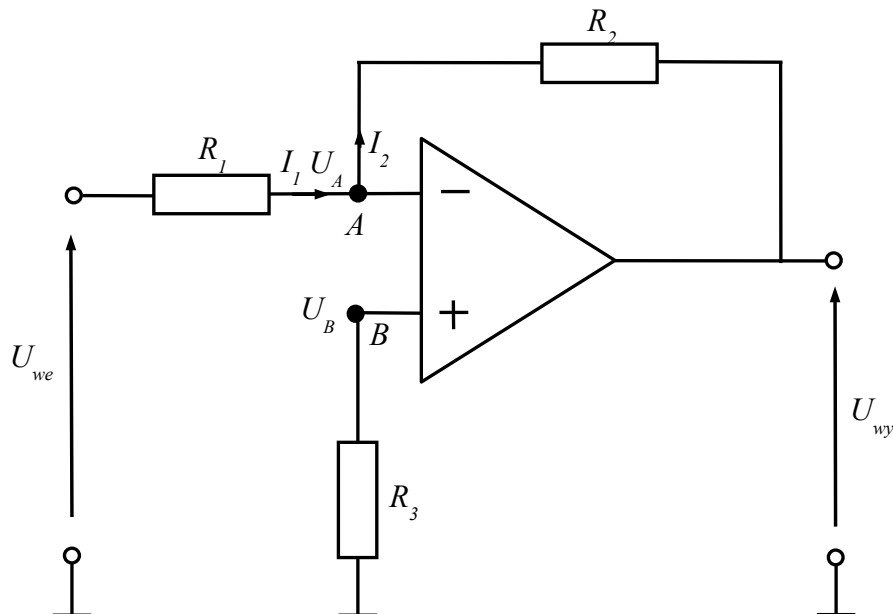
Korzystając z praw Kirchhoffa, układa się równania dla węzłów znajdujących się w układzie (np. dla węzła A i B).

Zakłada się, że różnica napięć $\Delta U = U_A - U_B$ jest prawie równe zero, a co za tym idzie potencjał w punkcie A (U_A) jest równy potencjałowi w punkcie B (U_B). U_B nazywamy masą pozorną lub „wirtualną” ziemią.

Korzystając z prawa Ohma, układa się równania dla poszczególnych prądów.

Na podstawie otrzymanych równań wyznacza się zależność napięcia wyjściowego w funkcji napięcia wejściowego (ewentualnie napięć wejściowych).

WZMACNIACZ ODWRACAJĄCY



Rys.10.9. Schemat wzmacniacza odwracającego.

Schemat wzmacniacza przedstawiono na rysunku 10.9. Postępując zgodnie z procedurą na schemacie zaznaczone są węzły A i B i prądy płynące w układzie. Prąd płynący przez rezystor R_1 jest równy prądowi płynącemu przez rezystor R_2 . Przy założeniu, iż jest nieskończenie duża rezystancja wejściowa oraz rezystancja wyjściowa równa zero. W myśl tego otrzymujemy:

$$I_1 = I_2;$$

Dla węzła B nie układamy równania, gdyż prądy polaryzujące są równe zero.

I zgodnie z założeniami zawartymi w procedurze, w punkcie 1 i 5 mamy:

$$U_A = U_B = 0;$$

Węzeł B jest połączony przez rezystor R_3 do masy układu, zatem potencjał w punkcie B jest równy zeru, jest to tak zwany punkt masy pozornej.

Zgodnie z 6 i 7 punktem procedury, równania poszczególnych prądów są następujące:

$$I_1 = \frac{U_{we} - U_A}{R_1} ;$$

$$I_2 = \frac{U_A - U_{wy}}{R_2} ;$$

Ponieważ

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

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

otrzymujemy napięcie na wyjściu równe:

$$U_{wy} = - \frac{R_2}{R_1} U_{we} ; \quad (10.26)$$

a wzmocnienie układu wynosi

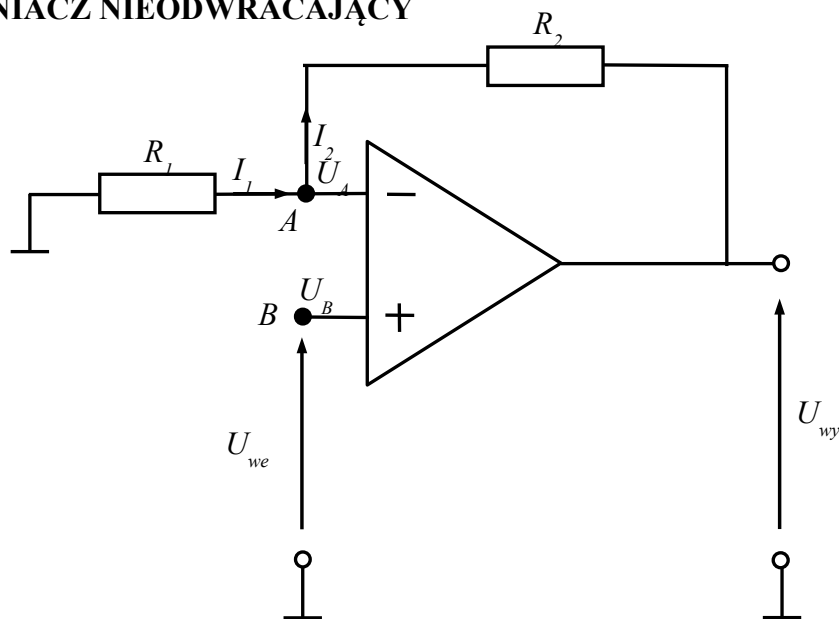
$$k_u = \frac{U_{wy}}{U_{we}} = - \frac{R_2}{R_1} ; \quad (10.27)$$

przy czym znak „-” oznacza odwrócenie fazy napięcia wyjściowego względem napięcia wejściowego. 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.

W celu uzyskania kompensacji błędu (napięcia niezrównoważenia) spowodowanego różnymi pod względem wartości prądami polaryzującymi I_{we+} i I_{we-} ($I_{we+} \neq I_{we-} \neq 0$), wartość rezystancji R_3 powinna być równa wartości rezystancji wynikającej z równoległego połączenia rezystorów R_1 i R_2 .

Jeżeli rezystory te będą miały jednakową rezystancję, to otrzymuje się inwerter (wzmocnienie równe -1).

WZMACNIACZ NIEODWRACAJĄCY



Rys. 10.10. Schemat wzmacniacza nieodwracającego.

Sygnal wejściowy jest podawany na wejście nieodwracające wzmacniacza operacyjnego. Według procedury:

$$I_1 = I_2;$$

$$U_B = U_{we} = U_A;$$

$$I_1 = \frac{U_{we}}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U_{wy} - U_{we}}{R_2};$$

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

napięcie na wyjściu wynosi

$$U_{wy} = \frac{(R_1 + R_2)U_{we}}{R_1}; \quad (10.28)$$

natomiast wzmocnienie wynosi

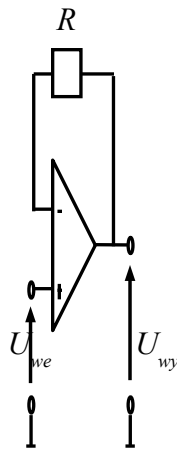
$$k_u = \frac{U_{wy}}{U_{we}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}; \quad (10.29)$$

Napięcia na wejściu odwracającym i wejściu nieodwracającym mają taką samą wartość, zatem rezystancja wejściowa układu jest równa rezystancji wzmacniacza operacyjnego dla sygnału współbieżnego. Rezystancja wejściowa jest bardzo duża i w praktyce wynosi $10^{10} \div 10^{13} \Omega$.

WTÓRNIK NAPIĘCIOWY

Wtórnik napięciowy uzyskuje się we wzmacniaczu nieodwracającym przy zastosowaniu rezystora o nieskończonej wartości. Wartość rezystancji R powinna być równa wartości rezystancji źródła sygnału wejściowego. Taki układ charakteryzuje się bardzo dużą rezystancją wejściową i małą rezystancją wyjściową.

$$U_{wy} = -U_{we}; \quad (10.30)$$

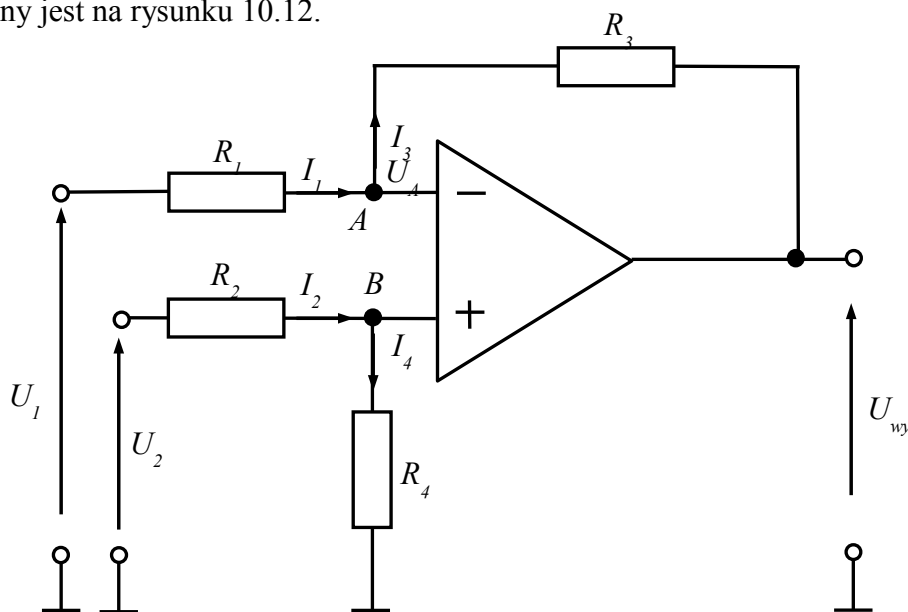


Rys. 10.11. Schemat wtórnika napięciowego.

WZMACNIACZ ODEJMUJĄCY

Wzmacniacz odejmujący jest często zwany również różnicowym.

Realizuje on odejmowanie napięć wejściowych w odpowiednim stosunku zależnym od wartości rezystorów znajdujących się w układzie. Schemat wzmacniacza odejmującego przedstawiony jest na rysunku 10.12.



Rys. 10.12. Schemat wzmacniacza różnicowego.

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

$$U_A = \frac{U_{wy}R_1 + U_1R_3}{R_1 + R_2} ; \quad (10.31)$$

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

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

stąd

$$U_B = \frac{U_2R_4}{R_2 + R_4} ; \quad (10.32)$$

Po przekształceniu wzorów (10.31) i (10.32) otrzymujemy:

$$U_{wy} = -\frac{R_3}{R_1}U_1 + \frac{(R_1 + R_3)R_4}{(R_2 + R_4)R_1}U_2 ; \quad (10.33)$$

jeśli spełniony będzie warunek

$$\frac{R_3}{R_1} = \frac{R_4}{R_2} ; \quad (10.34)$$

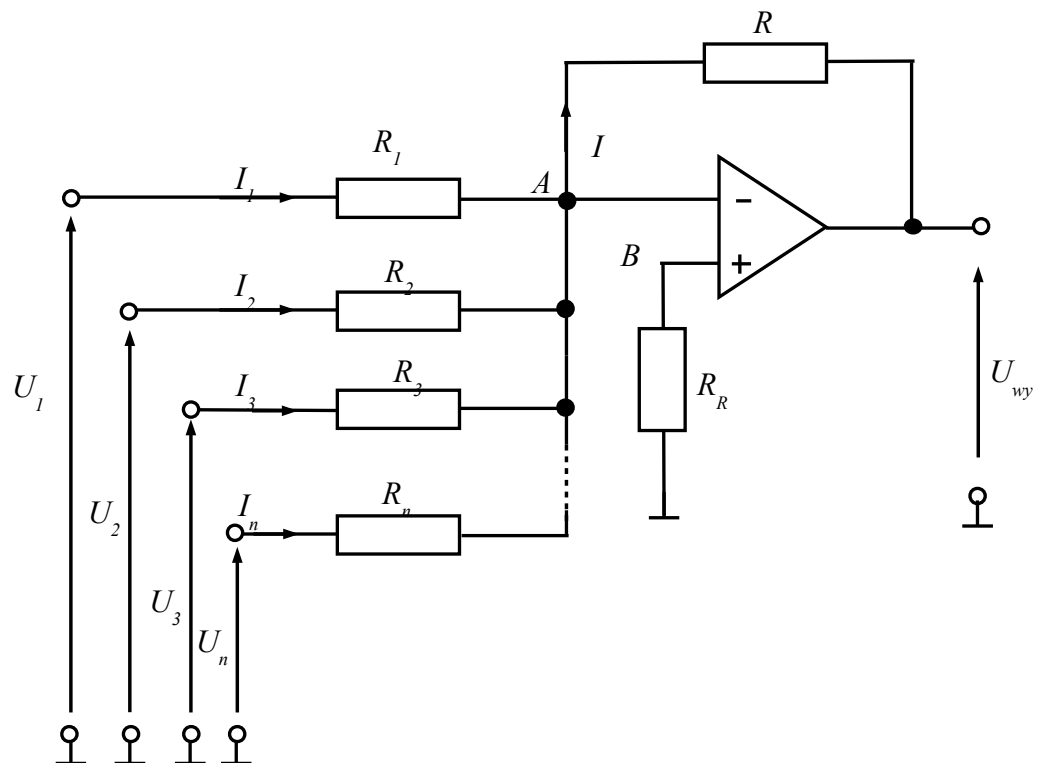
to

$$U_{wy} = \frac{R_3}{R_1}(U_2 - U_1) ; \quad (10.35)$$

Rezystancja wejściowa dla wejścia odwracającego, przy $U_2 = 0$ jest równa $R_1 + R_3$, a dla wejścia nieodwracającego $R_2 + R_4$. Kompensację błędu spowodowanego wejściowymi prądami polaryzującymi uzyskuje się w wyniku zastosowania rezystorów spełniających warunek $R_1 \parallel R_3 = R_2 \parallel R_4$.

WZMACNIACZ SUMUJĄCY

Za pomocą tego wzmacniacza łatwo można zrealizować dodawanie.



Rys. 10.13. Schemat wzmacniacza sumującego.

Korzystając z procedury 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 .

W wyniku połączenia wzmacniacza różnicowego i sumującego otrzymujemy układ realizujący jednocześnie sumowanie i odejmowanie napięć.

W celu uniknięcia błędów należy pamiętać, aby rezystancje „widzialne” między wejściem wzmacniacza operacyjnego a masą były jednakowe dla obu wejść wzmacniacza operacyjnego.

WZMACNIACZ CAŁKUJĄCY – INTEGRATOR

Integrator otrzymuje się poprzez włączenie kondensatora C w obwód sprzężenia zwrotnego.

$$I_1 = I;$$

$$CU = Q;$$

$$CdU = idt;$$

$$I_1 = \frac{U_{we}}{R_1}; \quad I = -C \frac{dU_{wy}}{dt};$$

$$\frac{U_{we}}{R_1} = -C \frac{dU_{wy}}{dt};$$

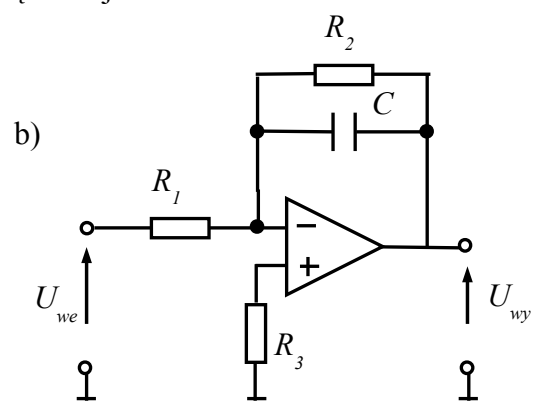
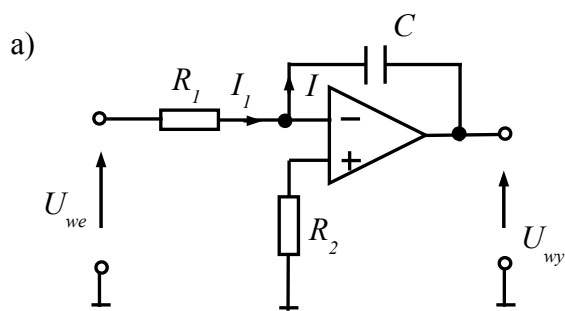
$$\frac{dU_{wy}}{dt} = -\frac{1}{CR_1} U_{we};$$

Napięcie wyjściowe można wyznaczyć poprzez scałkowanie obu stron równania

$$U_{wy}(t) = -\frac{1}{CR_1} \int U_{we}(t) dt + U_0; \quad (10.38)$$

U_0 – wartość początkowego napięcia w chwili początkowej $t = 0$.

Stąd też nazwa układu jako całkujący.



Rys. 10.14. Schematy integratora:

a) układ podstawowy, b) układ z obwodem RC w pętli sprzężenia zwrotnego

Korzystając z zapisu operatorowego

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

możemy określić wzmacnienie układu

$$k_u = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{1}{j\omega R_1 C}; \quad (10.39)$$

Wzmacnienie integratora zależy od częstotliwości sygnału. Jeżeli powyższy układ zostanie zmodyfikowany przez dołączenie rezystora R_2 równolegle do kondensatora C (rys 10.14b) to nastąpi ograniczenie wzmacnienia dla małych częstotliwości – otrzymuje się człon inercyjny. Wzmacnienie tego układu oblicza się ze wzoru:

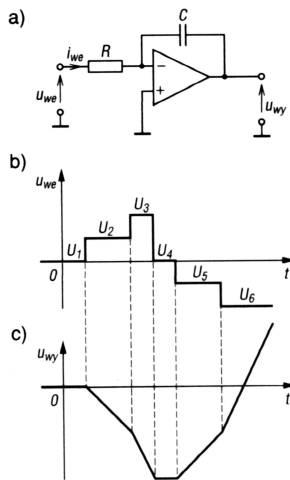
$$k_u = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{j\omega R_2 C}; \quad (10.40)$$

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

Przykład układu całkującego.

Układami całkującymi są dolnoprzepustowe filtry pierwszego rzędu, tj. filtry o nachyleniu charakterystyki -6 dB na oktawę (-20 dB na dekadę). Przykładem może być poznany wcześniej wzmacniacz operacyjny (rys. 10.15a). Wzmacniacz operacyjny w tym układzie jest objęty ujemnym sprzężeniem zwrotnym, można przyjąć (dla $k_u \rightarrow \infty$), że napięcia na jego wejściu odwracającym i nieodwracającym są takie same. Z tego powodu wartość

prądu wejściowego wynosi $\frac{U_{we}}{R}$. Prąd ten przepływa przez kondensator. napięcie wyjściowe jest równe napięciu na kondensatorze. Układ zapewnia sterowanie kondensatora prądem proporcjonalnym do wartości napięcia wejściowego. Praca tego układu odpowiada ładowaniu lub rozładowaniu pojemności przez źródło prądowe prądem proporcjonalnym do wartości napięcia wejściowego. Ponieważ kondensator jest układem całkującym prąd, to ten układ jest układem całkującym napięcie.



Rys. 10.15. Wzmacniacz całkujący.

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

Na rysunku 10.15c przedstawiono przebiegi wyjściowe w opisanym układzie, powstałe wskutek podania na wejście wzmacniacza napięcia o przebiegu pokazanym na rys. 10.15b. Układ ten z bardzo dużym przybliżeniem realizuje operację całkowania. Jego przebiegi wyjściowe mają praktycznie taki sam kształt jak przebiegi idealne (rys. 10.15b).

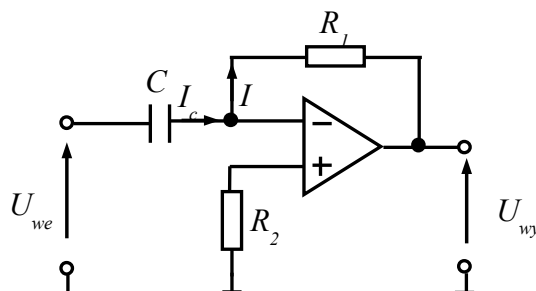
Zastosowanie układów całkujących.

Układy całkujące stosujemy przede wszystkim:

- w generatorach, do kształtowania przebiegu liniowego, trójkątnego i piłokształtnego,
- w filtrach,
- w układach wyznaczania wartości średniej.

WZMACNIACZ RÓŻNICZKUJĄCY

Wzmacniacz różniczkujący uzyskuje się przez zastąpienie rezystora, włączonego na wejściu odwracającego wzmacniacza operacyjnego, kondensatorem C (rys 10.16).



Rys. 10.16. Schemat wzmacniacza różniczkującego.

Wzmocnienie napięciowe takiego układu

$$k_u = - \frac{Z_1}{Z_2} ; \quad (10.41)$$

gdzie

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

po wykonaniu przekształceń otrzymujemy:

$$k_u = -j\omega R_1 C; \quad (10.42)$$

Analiza pracy wzmacniacza

$$I_C = I;$$

$$I_C = C \frac{dU_{we}}{dt}; \quad I = -\frac{U_{wy}}{R_1};$$

$$C \frac{dU_{we}}{dt} = -\frac{U_{wy}}{R_1};$$

Po wykonaniu odpowiednich przekształceń otrzymujemy:

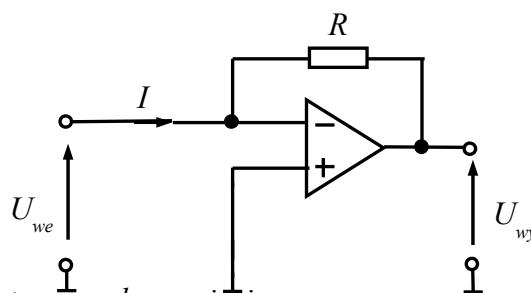
$$U_{wy}(t) = -CR_1 \frac{dU_{we}(t)}{d(t)}; \quad (10.43)$$

Jest to zależność napięcia wyjściowego od napięcia wejściowego w funkcji czasu.

Wzmacniacz różniczkujący ma wiele wad m.in. jest wrażliwy na szumy sygnału o wielkiej częstotliwości oraz skłonności do oscylacji.

KONWERTER PRĄD – NAPIĘCIE

Układ, który przetwarza sygnał prądowy na sygnał napięciowy jest nazywany konwerterem prąd – napięcie (rys.10.17)



Rys.10.17. Schemat konwertera prąd – napięcie.

Na podstawie analizy pracy wzmacniacza operacyjnego otrzymujemy:

$$U_{wy} = -IR; \quad (10.44)$$

Układ ten charakteryzuje się małą rezystancją wejściową. Może on współpracować tylko ze źródłami prądowymi o dużej rezystancji wewnętrznej, ponieważ jego wejście stanowi masę

pozorną. Wartość prądu wejściowego I nie zależy wówczas od parametrów układu konwertera, ale od źródła sygnału wejściowego.

PRZESUWNIK FAZY

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

Zależność między napięciem wyjścia od napięcia wejściowego

$$U_{wy} = - \frac{1 - j\omega CR_2}{1 + j\omega CR_2} U_{we}; \quad (10.45)$$

$$U_{wy} = (a + jb)U_{we};$$

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

$$U_{wy} = - \frac{(1 - j\omega CR_2)^2}{1 + \omega^2 C^2 R_2^2} U_{we};$$

$$U_{wy} = - \frac{1 - 2j\omega CR_2 - \omega^2 C^2 R_2^2}{1 + \omega^2 C^2 R_2^2} U_{we};$$

$$U_{wy} = - \frac{1 - 2j\omega CR_2 - \omega^2 C^2 R_2^2}{1 + \omega^2 C^2 R_2^2} U_{we};$$

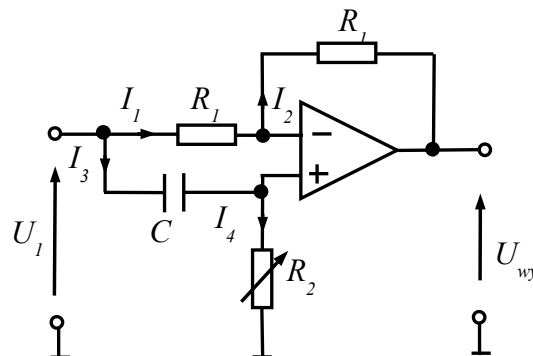
$$U_{wy} = - \frac{1 - \omega^2 C^2 R_2^2 - 2j\omega CR_2}{1 + \omega^2 C^2 R_2^2} U_{we};$$

$$\phi = \operatorname{arctg} \frac{b}{a};$$

$$\phi = \operatorname{arctg} \frac{2\omega CR_2}{1 - \omega^2 C^2 R_2^2}; \quad (10.46)$$

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.



Rys. 10.18. Schemat zasadniczy przesuwnika fazy.

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 wtórnikiem napięciowym, a jego przesunięcie fazowe wynosi 0° .