



Uniwersytet
Wrocławski

**Wydział Fizyki
i Astronomii**
Instytut Fizyki Doświadczalnej

pl. M. Borna 9
50-204 Wrocław
tel. +48 71 375 93 02, +48 71 328 73 65
fax +48 71 328 73 65
e-mail: sekr@ifd.uni.wroc.pl
www.ifd.uni.wroc.pl

Elektronika (konspekt)

Franciszek Gołek (golek@ifd.uni.wroc.pl)

www.pe.ifd.uni.wroc.pl

Wykład 10

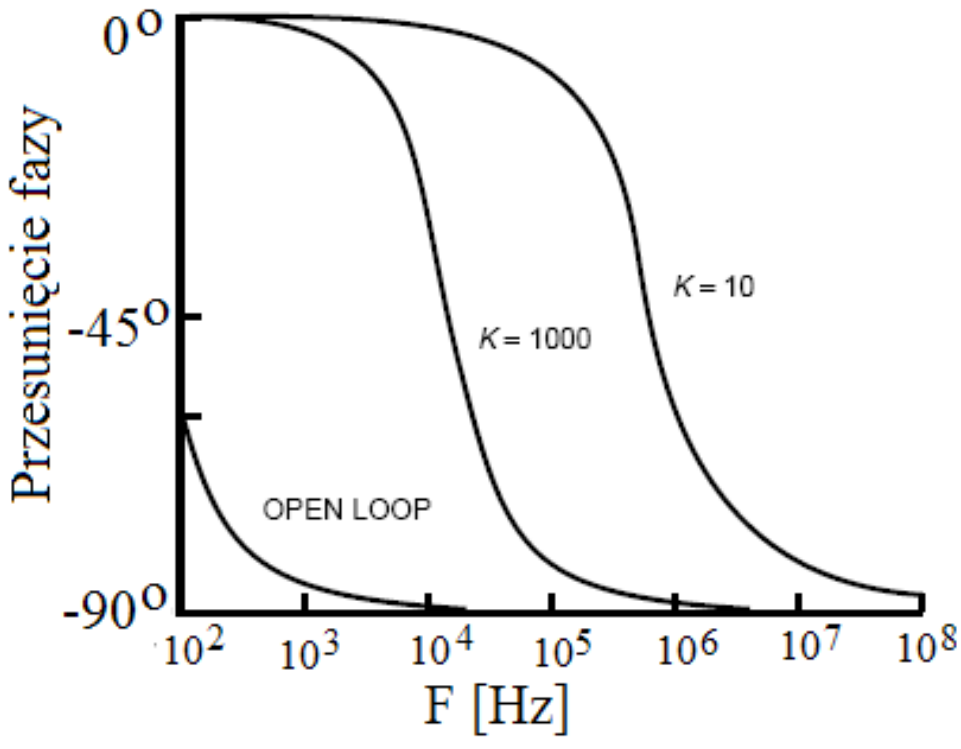
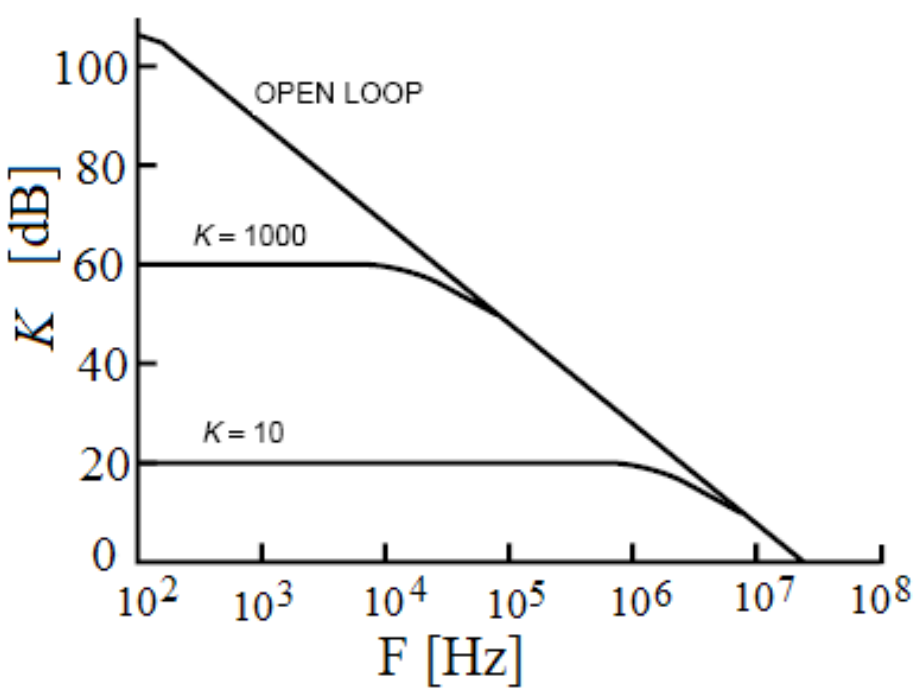
Sprzężenia zwrotne i oscylatory

Ograniczenia WO. W wielu rozważaniach wzmacniacze operacyjne traktowane są jako wzmacniacze idealne.

W praktyce jednak należy uwzględniać pewne istotne ograniczenia:

- 1) Zwykle zasilanie WO wynosi od $U_{SS} = \pm 10$ do ± 20 V, są też wzmacniacze zasilane z jedną polaryzacją np. + 5 V. Ten fakt oznacza, że wzmacniacze nie mogą wygenerować napięcia większego niż wartości zasilające. Maksymalne napięcie wyjściowe co do modułu jest zwykle o około 1,5 V niższe od zasilającego!
- 2) Ofset napięcia i prądu wejściowego powoduje, że przy zerowym sygnale na wyjściu może pojawiać się niezerowe napięcie wyjściowe.
- 3) Dryf czasowy i temperaturowy ofsetu i parametrów wzmacniacza.
- 4) Ważnym ograniczeniem jest nie przekraczanie na zaciskach wejściowych napięcia zasilania. Takie przekroczenie może prowadzić do zniszczenia wzmacniacza operacyjnego. Pewnym zabezpieczeniem jest stosowanie rezystorów włączonych szeregowo do wejść.

5) Przy wzmacnianiu sygnałów W.CZ. przeszkodą jest ograniczenie od góry pasma wzmacnianych częstotliwości. Sytuację poprawia ujemne sprzężenie zwrotne.



Sprężenia zwrotne

Ujemne sprzężenie zwrotne USZ – samoregulacja.

Ma ono miejsce, gdy sygnał wejściowy jest osłabiany przez część β (może to być ułamek zespolony) sygnału wyjściowego. Np. napięcie sprzężenia zwrotnego jest odejmowane od napięcia sygnału wejściowego.



Dodatnie sprzężenie zwrotne DSZ – możliwość samowzbudzenia.

DSZ ma miejsce, gdy część sygnału wyjściowego jest dodawana do sygnału wejściowego tak, że powiększa to sygnały wejściowy i wyjściowy.

USZ: $U_{\text{wzmacniane}} = U_{\text{wzm}} = U_{\text{we}} - \beta U_{\text{wy}}$ **Wszystko w postaci zespolonej!**

$$U_{\text{wy}} = K_U U_{\text{wzm.}} = K_U (U_{\text{we}} - \beta U_{\text{wy}})$$

Wypadkowe wzmocnienie napięciowe: $K_{UW} = U_{\text{wy}}/U_{\text{we}}$

$$U_{\text{wy}}/U_{\text{we}} = K_U (U_{\text{we}} - \beta U_{\text{wy}})/U_{\text{we}} = K_U - K_U \beta U_{\text{wy}}/U_{\text{we}}$$

$$U_{\text{wy}}/U_{\text{we}} = K_U / (1 + \beta K_U)$$

Wypadkowe wzmocnienie K_{UW} dla USZ:

(Harold Stephen Black 1927 USA)

DSZ: Tu znak β jest przeciwny i wypadkowe wzmocnienie K_{UW} dla DSZ ma postać:

$$K_{UW} = \frac{K_u}{1 + \beta K_u}$$

$$K_{UW} = \frac{K_u}{1 - \beta K_u}$$

Przykład. Wzmacniacz operacyjny o wzmacnieniu $k_U=10^5$ i niestabilności tego wzmacnienia **10%** został zaopatrzony w układ sprzężenia zwrotnego obniżającego wzmacnienie do wartości $k'_U=10^2$. Ile wynosi współczynnik sprzężenia zwrotnego β i jaka jest niestabilność wzmacnienia po tej zmianie?

Rozwiązanie: Zakładamy, że niestabilności leżą w zakresie niskich częstotliwości co pozwala zaniedbać przesunięcia fazy i uwzględnić tylko moduły wielkości β i K_{11} .

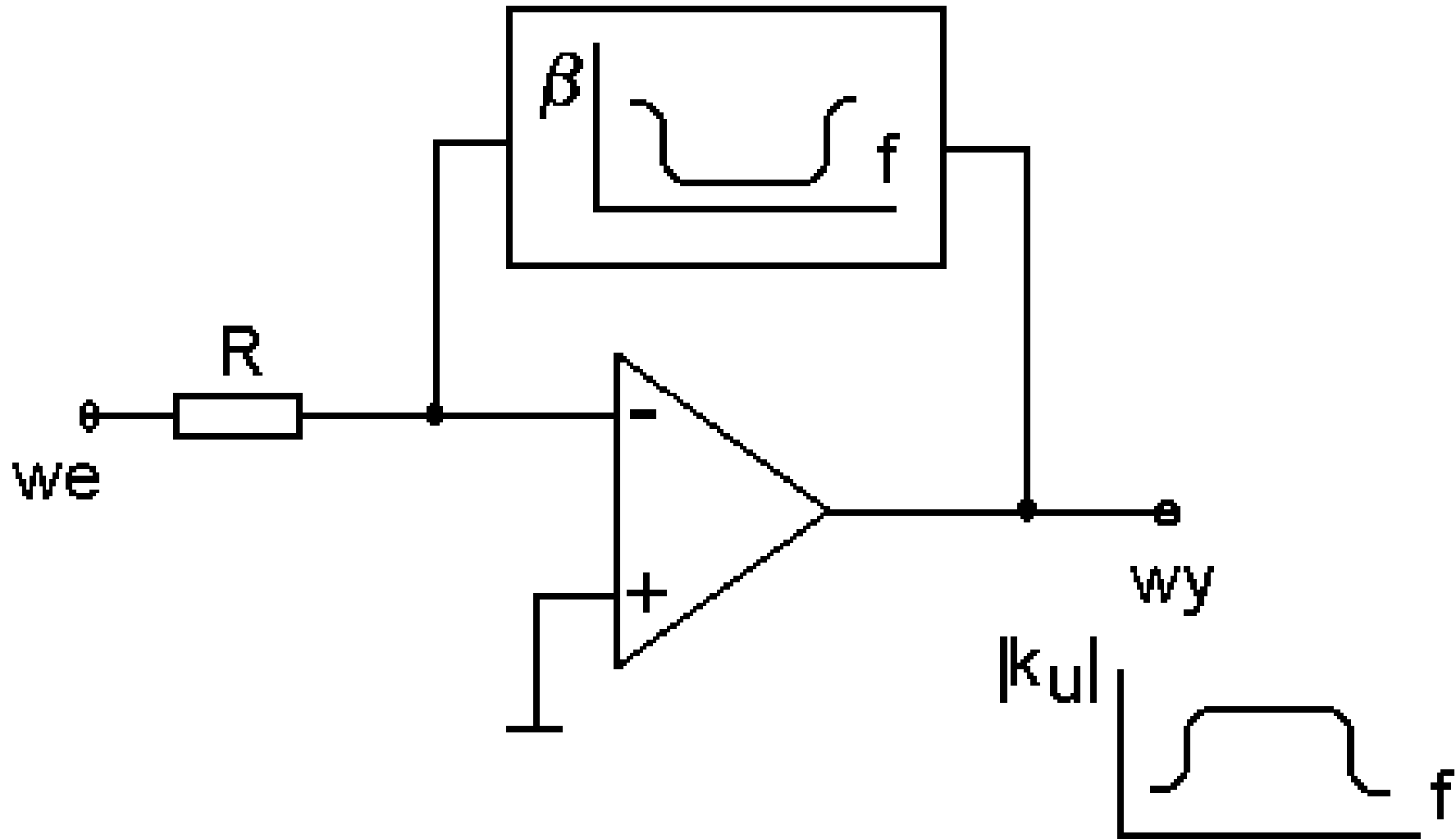
$$k_{UW} = \frac{k_U}{1 + \beta k_U} ; 10^2 = \frac{10^5}{1 + \beta 10^5} ; \beta = 0.01$$

Bez sprzężenia było: $\Delta k_U/k_U = 0.1$. Do określenia $\Delta k_{UW}/k_{UW}$ posłużymy się pochodną z k_{UW} :

$$\begin{aligned} \frac{\Delta k_{UW}}{k_{UW}} &= \frac{\frac{d}{dk_U}(k_{UW}) \Delta k_U}{k_{UW}} = \frac{\frac{1}{(1 + \beta k_U)^2} 0.1 k_U}{\frac{k_U}{1 + \beta k_U}} = \frac{0.1}{1 + \beta k_U} \\ &= \frac{0.1}{1 + 0.01 \cdot 10^5} = 10^{-4} \text{ czyli } 0.01\% \end{aligned}$$

Filtry aktywne

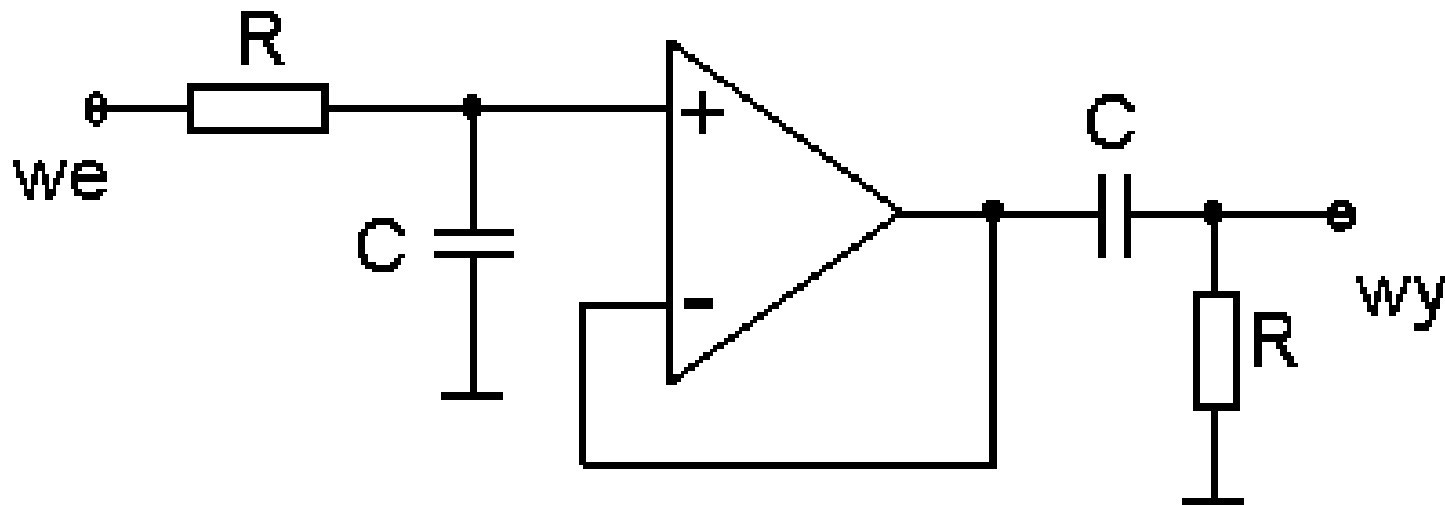
Filtry aktywne buduje się wstawiając w obwodzie ujemnego sprzężenia zwrotnego wzmacniacza impedancję zależną od częstotliwości.



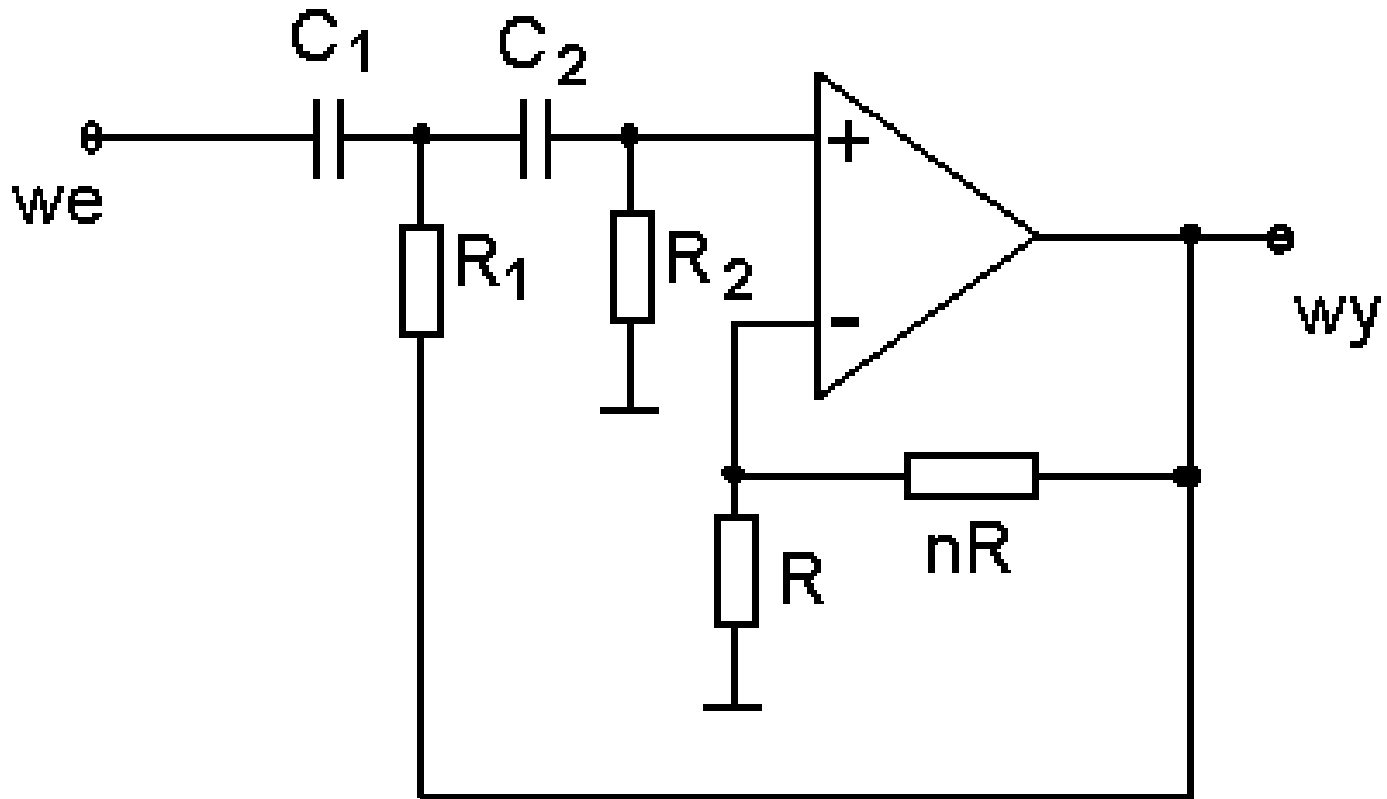
Filtr aktywny pasmowo-przepustowy (drugiego rzędu)

Dwa kaskadowo połączone filtry: filtr dolno-przepustowy i górnoprzepustowy (rozdzielone wtórnikiem napięciowym).

Dzięki dużej impedancji wejściowej wtórnika napięciowego drugi filtr nie obciąża pierwszego.



Filtr aktywny górno-przepustowy dwubiegunowy
(Typ ZNSN - źródło napięciowe sterowane napięciem).
Zwiększając ilość biegunów (np. przez kaskadowe
łączenie filtrów aktywnych) zwiększamy stromość
charakterystyki częstotliwościowej na brzegach pasma.



Oscylatory (generatory)

Najogólniej generatory to układy przetwarzające energię. Nawet przy naturalnym przepływie energii często dochodzi do generowania rozmaitych przebiegów i zjawisk (np. fala akustyczna przy wodospadzie, rozmaite zjawiska przyrodnicze, liczne zabawki – zwłaszcza te demonstrujące rzekome perpetuum mobile).

W elektronice generatory są układami wytwarzającymi określone przebiegi elektryczne.

Wzmacniacze z dodatnim sprzężeniem zwrotnym są w elektronice podstawowym typem generatorów (jak dotąd). Stosowane są również (choć rzadziej) tzw. generatory relaksacyjne, generatory samodławne oraz generatory z elementem o ujemnej rezystancji dynamicznej odtłumiającym obwody rezonansowe.

Zastosowania generatorów są bardzo szerokie i bardzo częste. Ich rolą jest nie tylko generowanie określonych przebiegów napięcia ale też bardzo często stanowią sobą układy odmierzające czas. Generator jako źródło sygnału okresowego jest podstawowym elementem praktycznie wszystkich urządzeń cyfrowych (tzw. zegary). Generatory są stosowane w multimetrach cyfrowych, oscyloskopach, cyfrowych układach pomiarowych, sprzęcie audio-wideo, komputerach, peryferyjnych układach komputerowych (drukarki, terminale itp.) i wielu innych.

Generator jako wzmacniacz z dodatnim sprzężeniem zwrotnym

Wielkości K_U (wzmocnienia) i β (współczynnik sprzężenia zwrotnego), opisujące działanie wzmacniacza i obwodu sprzężenia zwrotnego są oczywiście funkcjami zespolonymi zależnymi od częstotliwości ω . Warunkiem podtrzymywania oscylacji jest, aby mianownik wyrażenia:

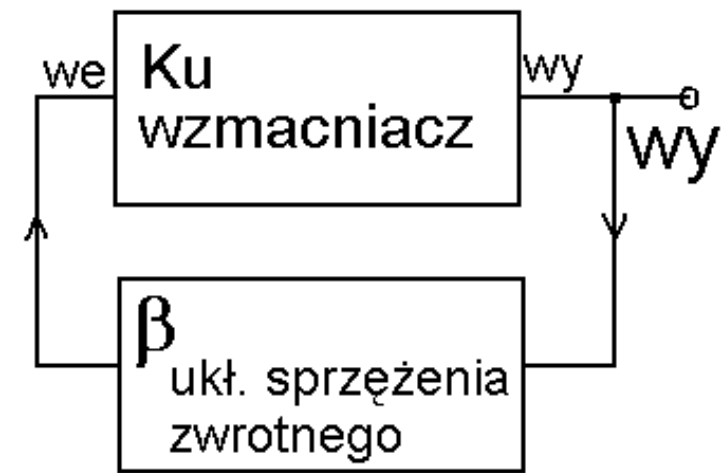
wynosił „0”, tj. aby $1 - \beta K_U = 0$, czyli

$$\beta K_U = \beta e^{j\varphi} k_U e^{j\psi} = \beta k_U e^{j(\varphi+\psi)} = 1$$

co daje warunek amplitudy: $|\beta K_U| = \beta k_U = 1$

i warunek fazy: $\varphi + \psi = n2\pi$

Zatem: $\text{Re}(\beta K_U) = 1$ i $\text{Im}(\beta K_U) = 0$



$$K_{UW} = \frac{K_U}{1 - \beta K_U}$$

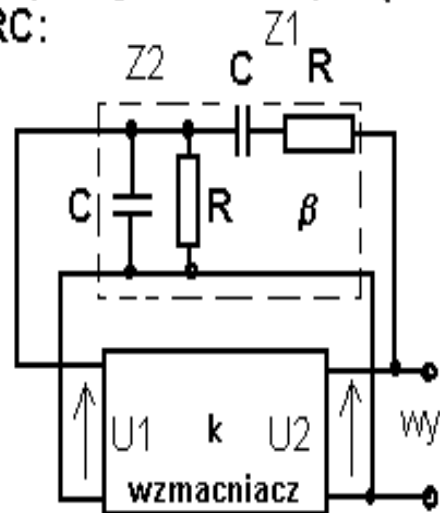
Gdy włączamy zasilanie to w pierwszej chwili mamy szum i stan nieustalony. Ale ta składowa „szumu”, której częstotliwość spełnia warunek fazy szybko rośnie aż osiągnie warunek amplitudy. Ograniczenie dalszego wzrostu amplitudy wynika z osłabienia wartości K_U wzmacniacza dla

Przykład: Zakładając, że wsp. wzmocnienia napięciowego k jest liczbą rzeczywistą (małe częstotliwości) obliczyć częstotliwość i współczynnik k generatora RC generującego przebieg sinusoidalny. ($k = \frac{U_2}{U_1}$ mówi co wzmacniacz robi z U_1)

Rozw. Dla sinusoidy iloczyn $k\beta = 1$ (dla iloczynu mniejszego od 1 mamy brak oscylacji a dla większego od 1 mamy większą i zniekształconą amplitudę). Wartość wsp. sprzężenia zwrotnego β określa dzielnik napięcia **RC**:

$$\beta = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I Z_2}{I (Z_1 + Z_2)} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{\frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C} + \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C}} = \frac{\frac{R}{1 + j\omega CR}}{R + \frac{1}{j\omega C} + \frac{R}{1 + j\omega CR}}$$

$$= \frac{R}{(R + \frac{1}{j\omega C})(1 + j\omega CR) + R}$$



$$k\beta = 1 \rightarrow \frac{kR}{(R + \frac{1}{j\omega C})(1 + j\omega CR) + R} = 1 \rightarrow kR = R + j\omega CR^2 + \frac{1}{j\omega C} + R + R \rightarrow$$

$$kR = 3R + j(\omega CR^2 - \frac{1}{\omega C})$$

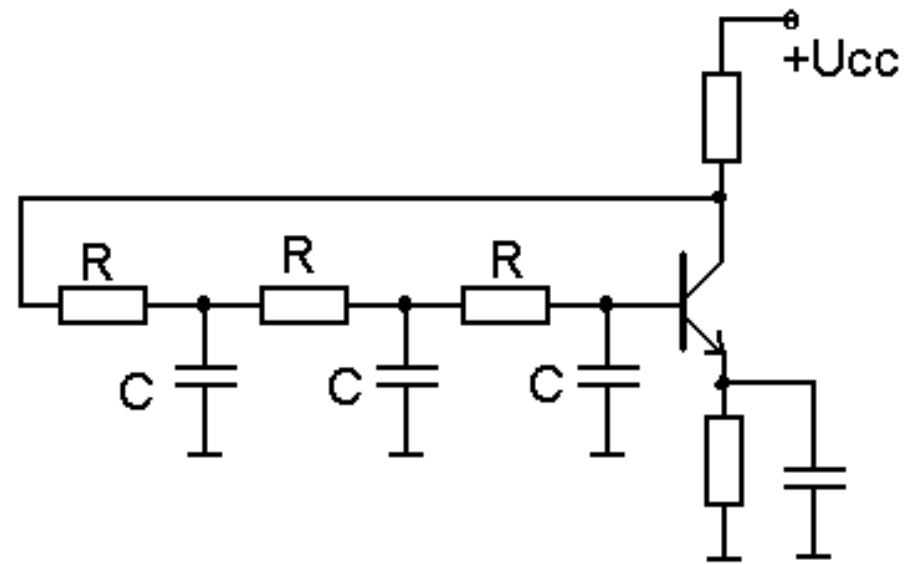
Dwie liczby zesp. są równe gdy ich składowe są identyczne. \rightarrow

$$kR = 3R \rightarrow k = 3$$

$$0 = \omega CR^2 - \frac{1}{\omega C} \rightarrow \omega^2 = \frac{1}{R^2 C^2} \rightarrow \omega = \frac{1}{RC}$$

Generator drabinkowy

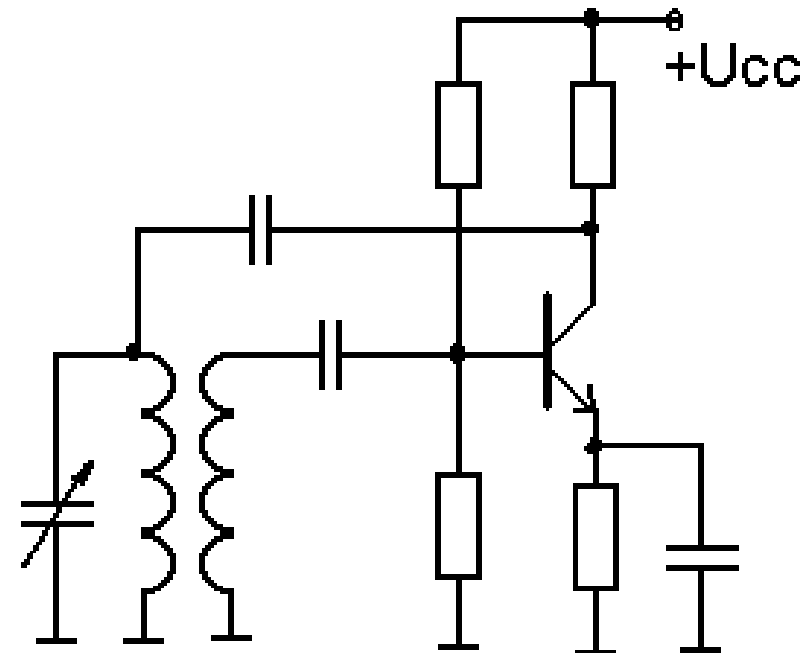
Jest to generator z trzystopniowym przesuwaniem fazy. Przesuwanie fazy sygnału z kolektora o 180° (przed podaniem go na bazę) odbywa się na trzech stopniach RC.



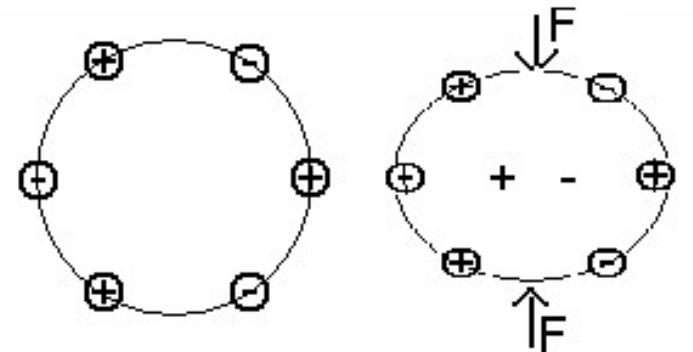
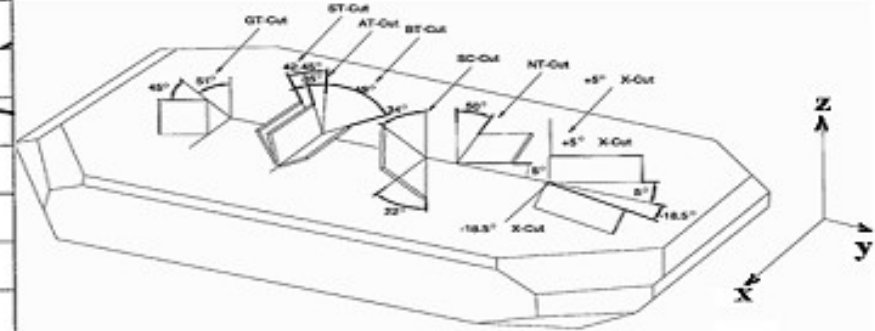
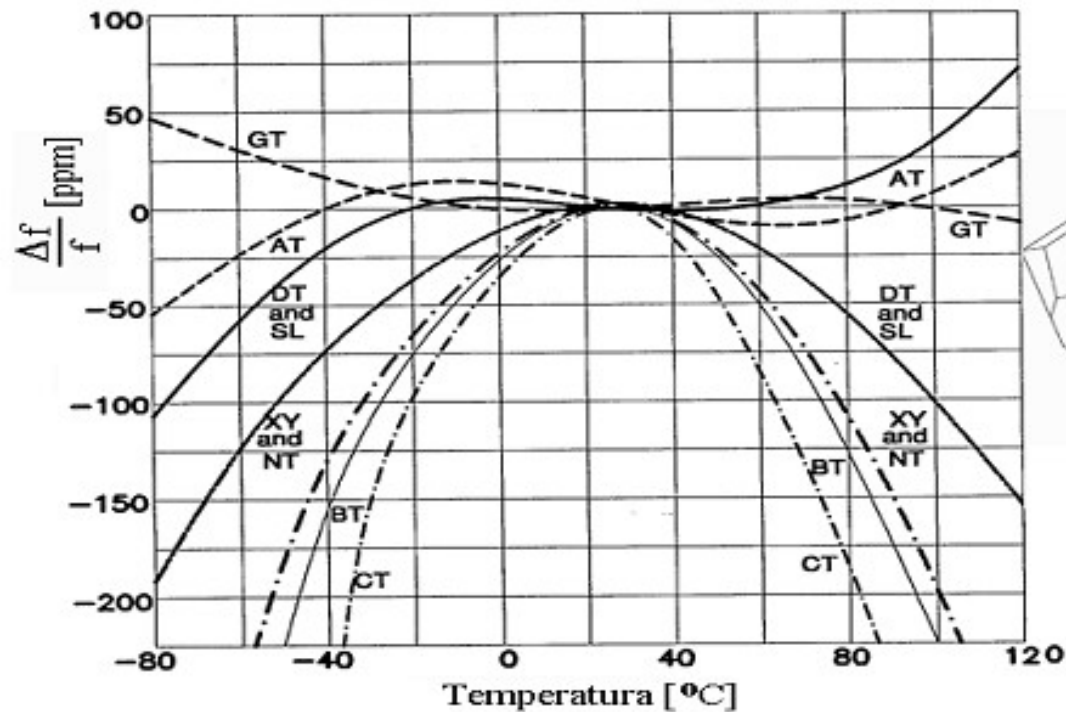
Generator Meissnera

W generatorze Meissnera dodatnie sprzężenie zwrotne realizowane jest za pomocą transformatora.

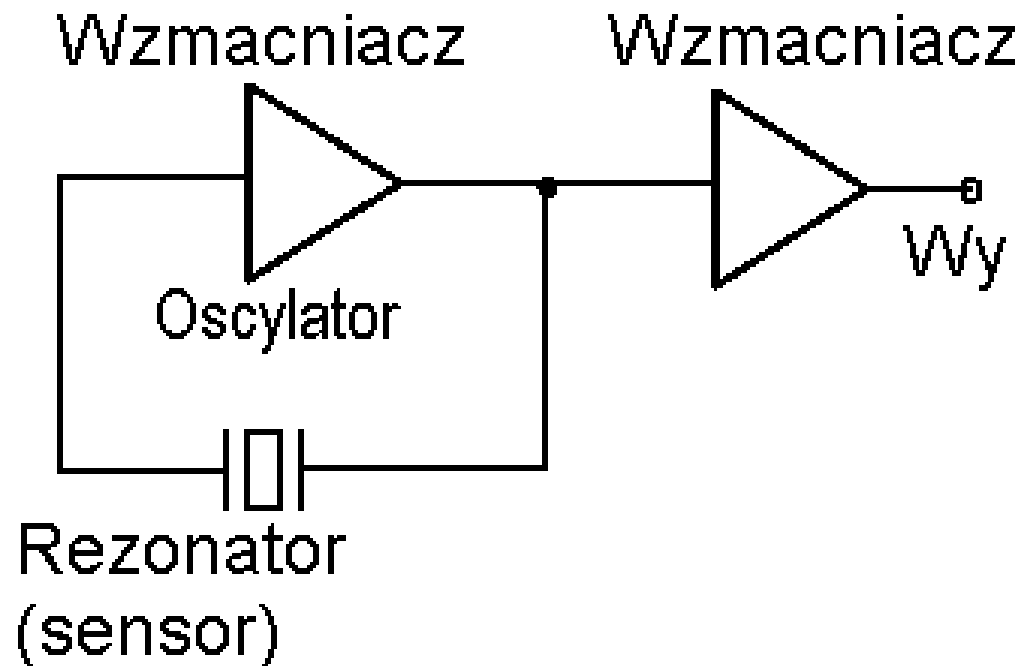
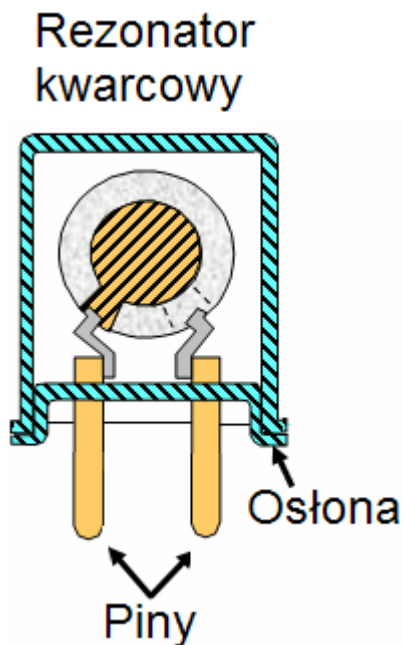
Przykład generatora z obwodem rezonansowym w obwodzie kolektora.



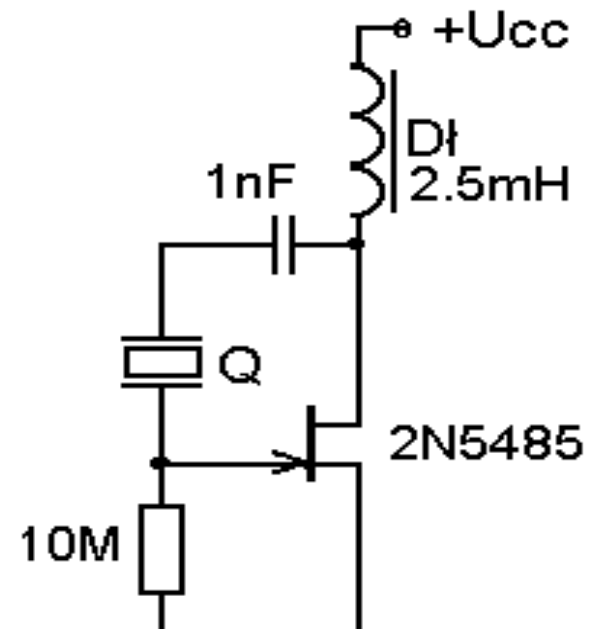
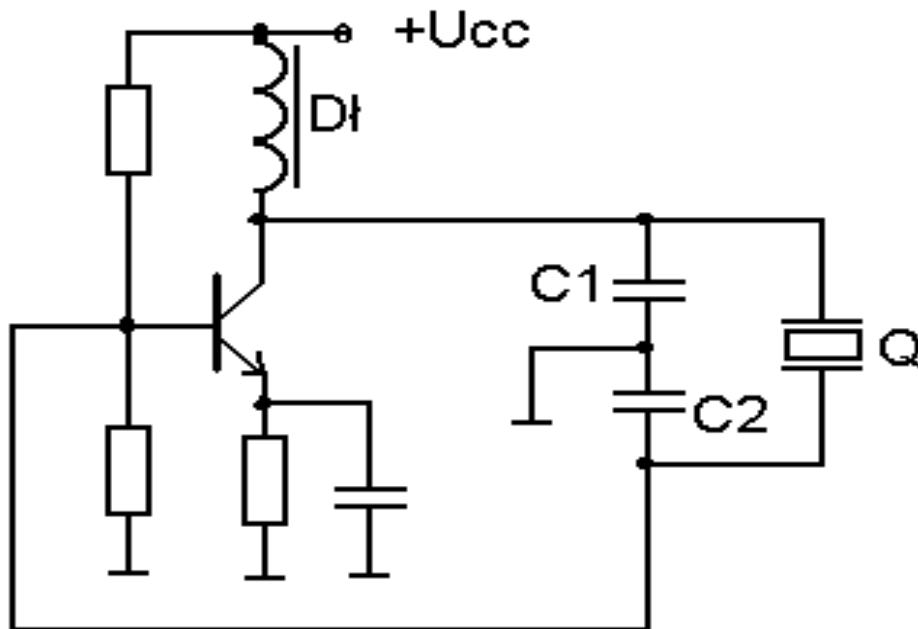
Mikrowaga kwarcowa. W roku 1920 Walter Cady zaproponował wykorzystanie kwarcu do budowy bardzo stabilnych oscylatorów. Duża dobroć kwarcu, (duży Q-faktor czyli małe straty energii oscylacji), niskie koszty wytwarzania oraz istnienie cięć krysztalu o prawie zerowym współczynniku temperaturowym przyczyniły się do powszechnego stosowania rezonatorów kwarcowych w elektronice i wielu innych dziedzinach. Pod względem ilości produkowanych przez człowieka krysztalów kwarc jest na drugim miejscu po krzemie. Stosowane cięcia poniżej:



Idea oscylatora (generatora) z rezonatorem kwarcowym jako sensorem zmieniającym częstotliwość swoich oscylacji zależnie od masy adsorbantu lub lepkości substancji, z którą jest w kontakcie.



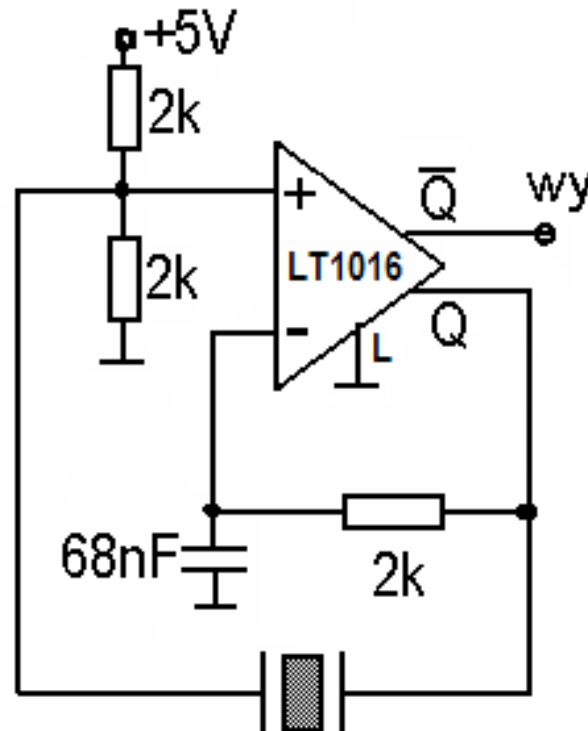
Generatory kwarcowe. Piezoelektryczny odpowiednio wycięty i wyszlifowany kryształ kwarcu (SiO_2) jako rezonator wykazuje bardzo dużą dobroć (10^6) i wyjątkową stabilność częstotliwości. Typowa niestabość częstotliwości jest rzędu 10^{-7} , a w specjalnych rozwiązaniach bywa lepsza niż 10^{-11} . Dla porównania warto podać, iż niestabość częstotliwości generatorów typu LC sięga zaledwie 10^{-4} . Na rys. mamy generatory: Colpittsa i Pirce'a. W gen. Colpittsa dodatnie sprzężenie zwrotne realizowane jest za pomocą podzielonej pojemności w obwodzie rezonansowym. Ważne zastosowania to „zegary” w układach cyfrowych.



Generatory kwarcowe jako sensory do monitorowania zmian ilości substancji osadzanych na powierzchni kryształu poprzez pomiar zmiany jego częstotliwości rezonansowej.

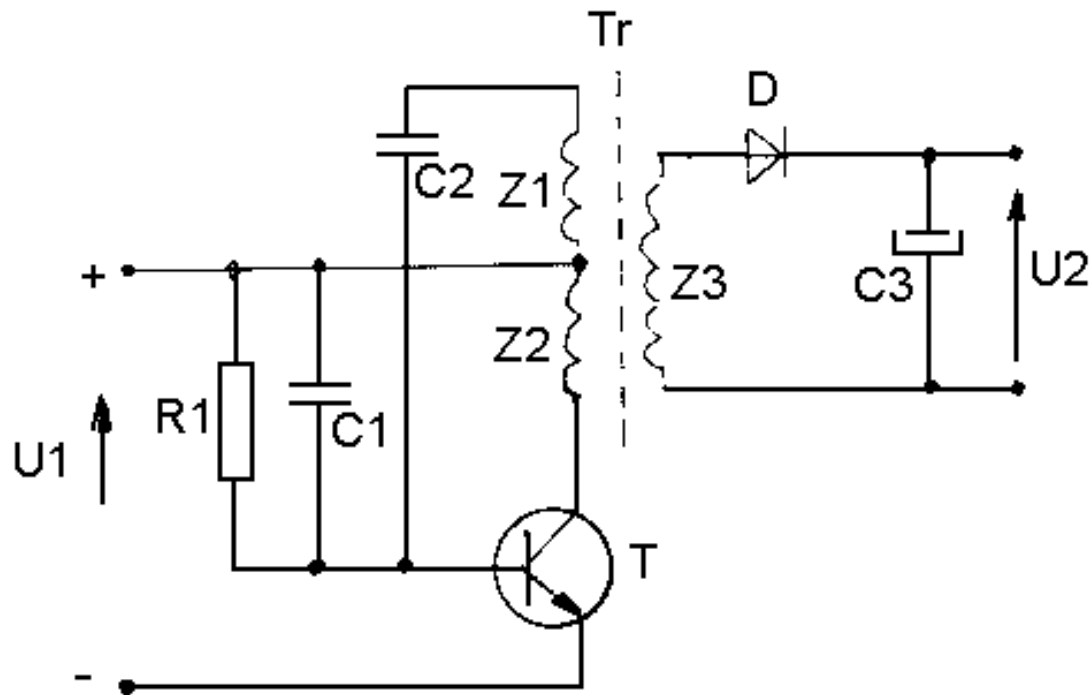
Bardzo praktyczny związek: $\Delta m/m = c \times \Delta f/f$ czyli $\Delta m = c' \times \Delta f$ (c – stała, m – masa rezonatora kwarcowego, f – częstotliwość rezonansowa rezonatora kwarcowego) zachodzi dla $\Delta m/m \leq 0.01$ i przy stałej temperaturze.

Zasilanie +5V.



Generator Hartleya w przetwornicy napięcia

W samym generatorze dodatnie sprzężenie zwrotne zrealizowane jest dzięki podziałowi indukcyjności ($Z1$ i $Z2$) w obwodzie rezonansowym. Transformator służy tu do przekazania wygenerowanego przebiegu o zwiększonej amplitudzie do układu prostownika.



Generator z mostkiem Wiena

Mostek jest równoległym połączeniem zwykle dwóch dzielników napięcia. M. W. służył do pomiaru pojemności.

$$U_- = U_{wy} R_3 / (R_3 + R_4). \quad \mathbf{X}_1 = -j/\omega C_1, \quad \mathbf{X}_2 = -j/\omega C_2.$$

$$\mathbf{Z}_1 = R_1 \mathbf{X}_1 / (R_1 + \mathbf{X}_1), \quad \mathbf{Z}_2 = R_2 + \mathbf{X}_2,$$

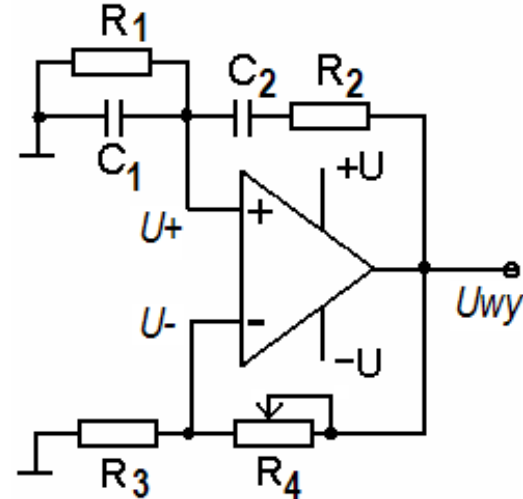
$$U_+ = U_{wy} \mathbf{Z}_1 / (\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2) - u$$

$$U_+ = U_{wy} [(R_1 \mathbf{X}_1) / (R_1 + \mathbf{X}_1)] / [R_1 \mathbf{X}_1 / (R_1 + \mathbf{X}_1) + R_2 + \mathbf{X}_2]$$

Warunek amplitudy: $U_+ > U_-$.

Warunek fazy: zgodność faz między U_{wy} i różnicą $U_+ - U_- = U_{wy} \mathbf{Z}_1 / (\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2) - U_{wy} R_3 / (R_3 + R_4)$ będzie spełniona gdy $\mathbf{Z}_1 / (\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2)$ będzie

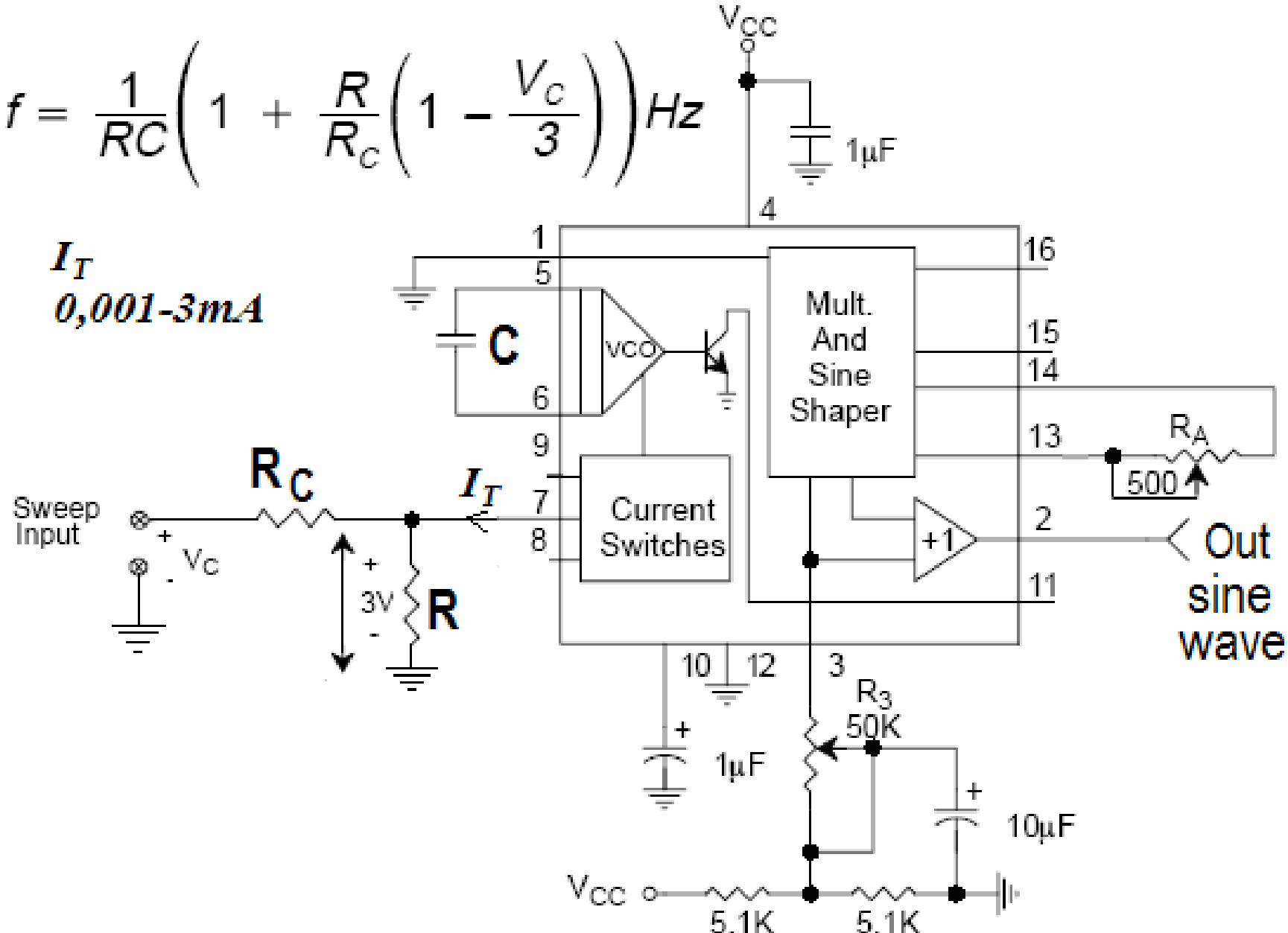
$$\frac{\frac{R_1 \frac{-j}{\omega C_1}}{R_1 + \frac{-j}{\omega C_1}}}{\frac{R_1 \frac{-j}{\omega C_1}}{R_1 + \frac{-j}{\omega C_1}} + R_2 + \frac{-j}{\omega C_2}} = \frac{-j \frac{R_1}{\omega C_1}}{-j \frac{R_1}{\omega C_1} + (R_1 + \frac{-j}{\omega C_1})(R_2 + \frac{-j}{\omega C_2})} = \frac{-j \frac{R_1}{\omega C_1}}{-j(\frac{R_1}{\omega C_1} + \frac{R_2}{\omega C_1} + \frac{R_1}{\omega C_2}) + \underbrace{R_1 R_2 - \frac{1}{\omega C_1} \frac{1}{\omega C_2}}_0}$$



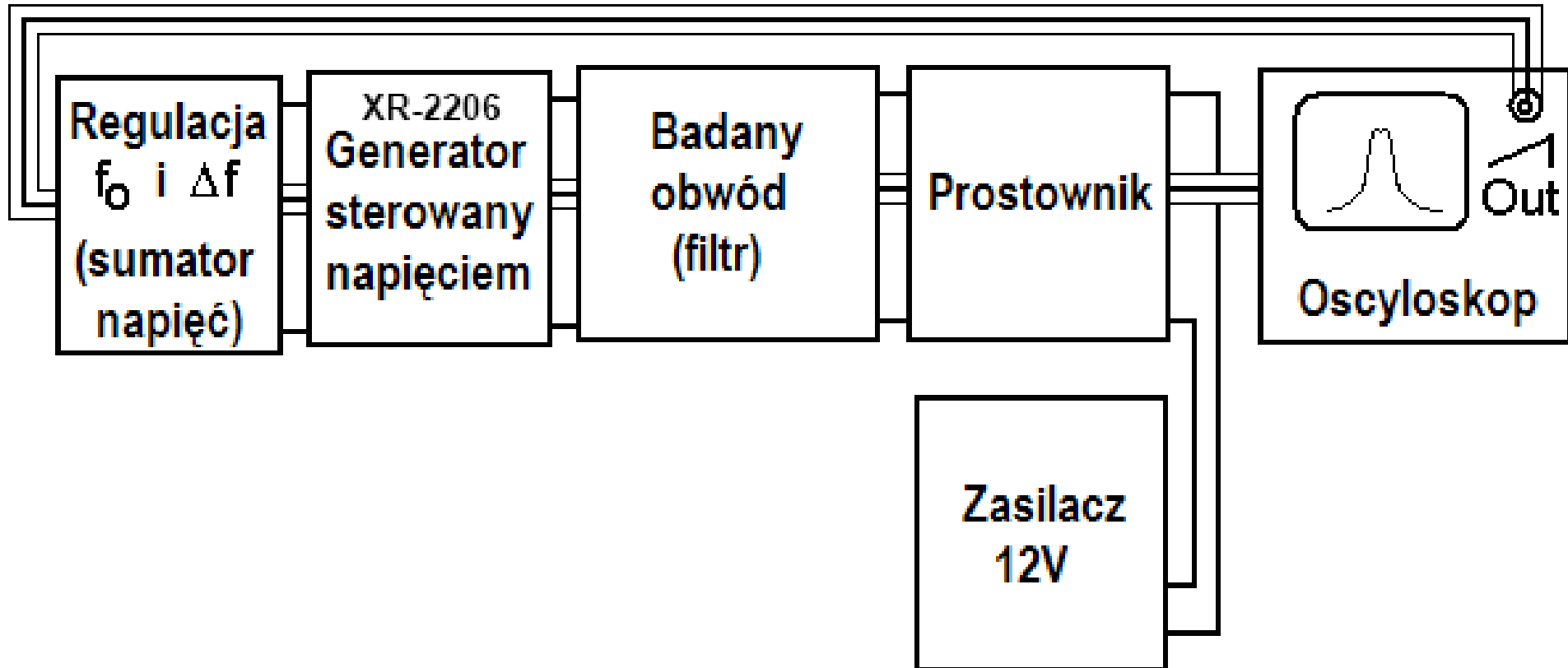
Generator sterowany napięciem (przykład z XR-2206)

$$f = \frac{1}{RC} \left(1 + \frac{R}{R_c} \left(1 - \frac{V_c}{3} \right) \right) \text{ Hz}$$

I_T
0,001-3mA

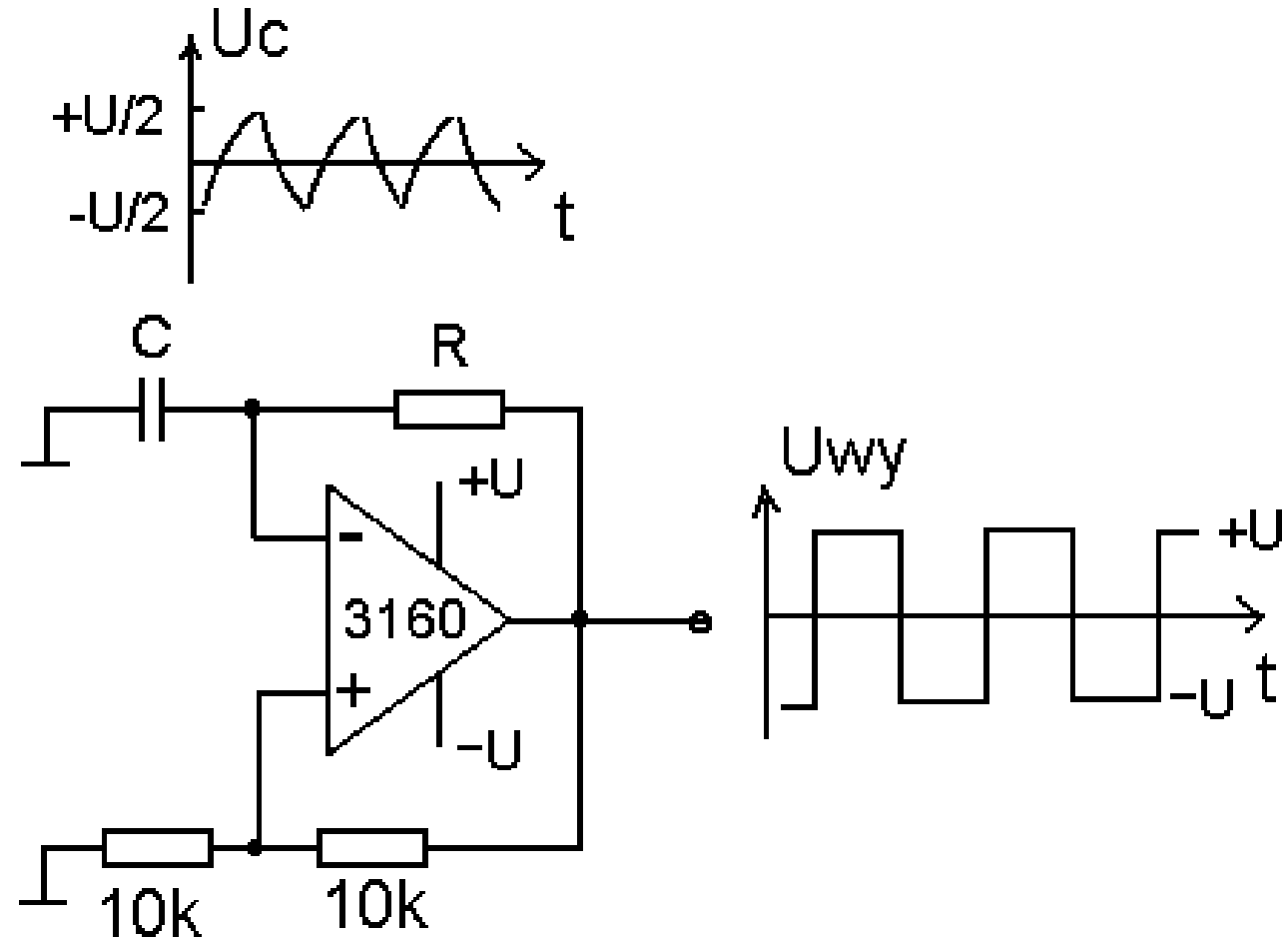


Wobulator Wobulator to generator o zmieniającej się w określony sposób częstotliwości, zwykle liniowo z czasem. Wobulatory służą do wyznaczania charakterystyk przenoszenia filtrów, wzmacniaczy i innych obwodów elektronicznych. Rysunek przedstawia schemat blokowy prostego wobulatora z generatorem sterowanym napięciem z podstawy czasu oscyloskopu:



Generator relaksacyjny ze wzmacniaczem operacyjnym

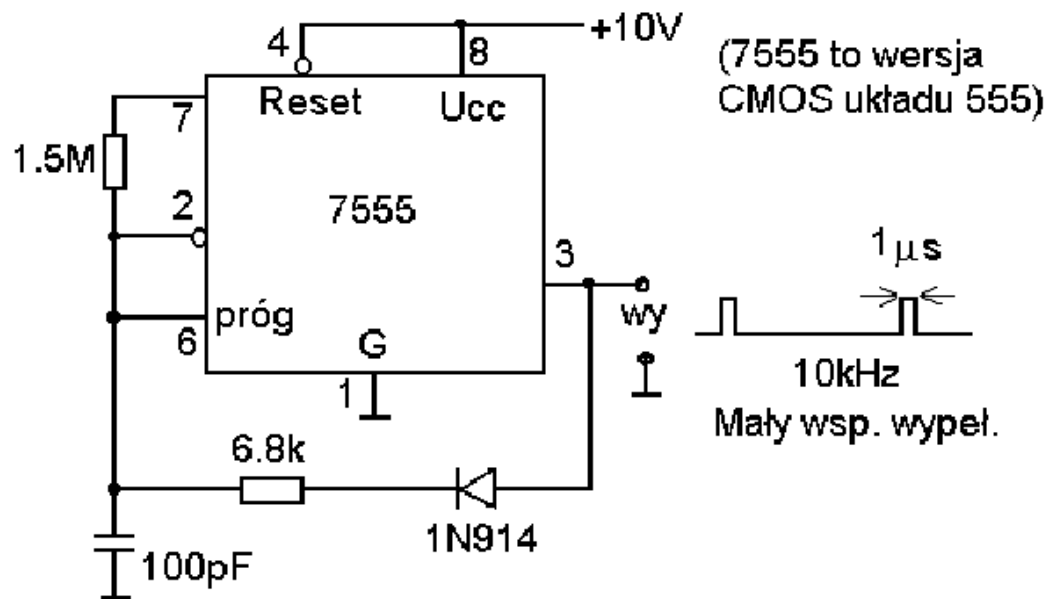
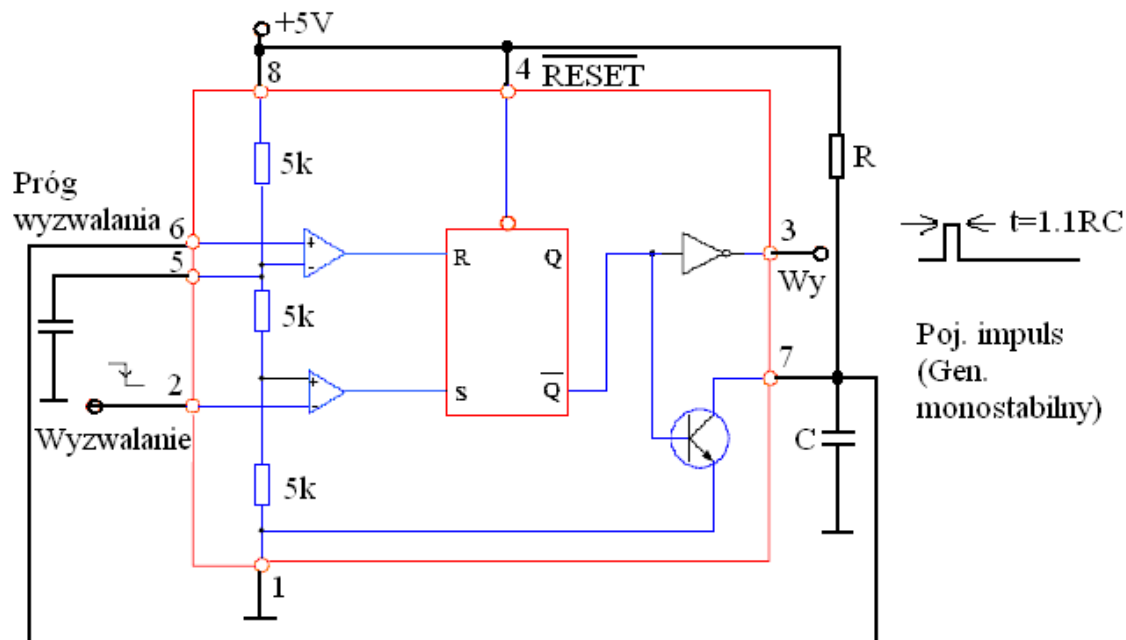
Kondensator C jest przeładowywany poprzez rezystor R . Na wyjściu mamy przeskoki potencjału między wartościami napięć zasilania $+U$ i $-U$. Przeskok następuje w chwili, gdy C osiąga połowę aktualnego napięcia wyjściowego (połowę bo dzielnik $10k$ i $10k$ tyle wymusza na wejściu $+$).



Układ czasowy 555

Jest najbardziej rozpowszechniony układem scalonym stosowanym do generacji fal prostokątnych, trójkątnych itp. Opublikowano liczne i rozmaite jego aplikacje.

Przykładowe aplikacje.



Generatory jako wzorce czasu i częstotliwości

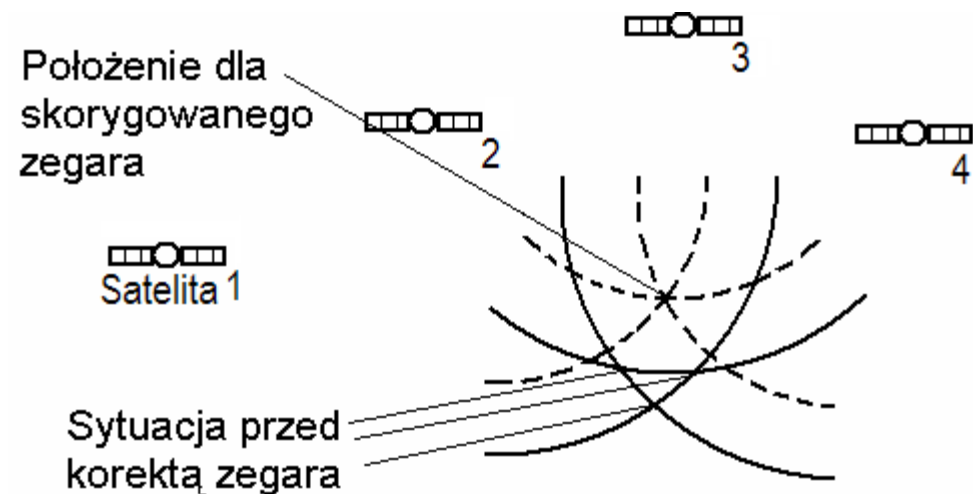
Każdy przyrząd pomiarowy wymaga kalibracji, w tym porównania z wzorcem jednostki pomiarowej i korekty. Obecnie (od roku 1967) najdoskonalszymi wzorcami sekundy i jej odwrotności czyli częstotliwości 1 Hz są **zegary atomowe**.

Fontannowy **atomowy zegar** cezowy NIST-F1 zapewnia precyzję 5×10^{-16} . Chmurka atomów cezu ochłodzona laserami do temperatury około 10^{-6} K jest pchnięta (wiązką lasera) do góry aby przechodzić przez wnękę rezonatora mikrofalowego 2 razy. Raz wznosząc się do góry z prędkością kilka cm/s i drugi raz przy grawitacyjnym spadku (jak fontanna). Mała prędkość i wielokrotne przebywanie w rezonatorze trwające całe sekundy pozwala na precyzyjne dostrojenie wnęki mikrofalowej do naturalnej częstotliwości rezonansowej atomów cezu 9 192 631 777 Hz. Dostrojenie obserwowane jest przez detekcję fluorescencji atomów. **Zastosowanie:** GPS (Global Positioning System), nawigacja, stacje nadawcze, radioastronomia.

Lokalizacja przy pomocy GPS

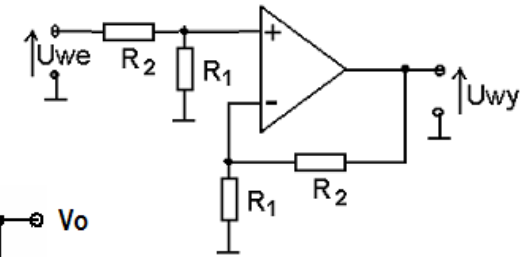
W dużym uproszczeniu każdy satelita tego systemu, z precyzją pokładowego zegara atomowego, ciągle wysyła sygnały zawierające informację o swojej pozycji i czasie wysłania danego sygnału oraz informację o pozostałych satelitach systemu (ich pozycjach). Odbiornik GPS porównując czas otrzymania sygnału z czasem jego wysłania oblicza odległość do danego satelity. Analizując odległości do minimum czterech satelitów odbiornik GPS jest w stanie określić swoją pozycję trójwymiarowo i czas. Z ciągłego powtarzania takiego wyznaczania pozycji GPS określa szybkość i kierunek przemieszczania się.

Odbiorniki GPS posiadają zegary kwarcowe, których niedokładność można korygować dzięki analizie opóźnień sygnałów z trzech satelitów.

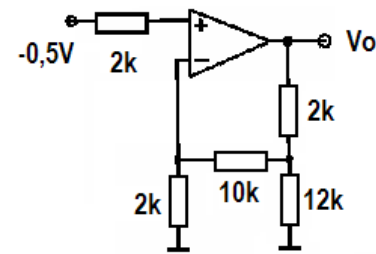


Elektronika. Lista – 10

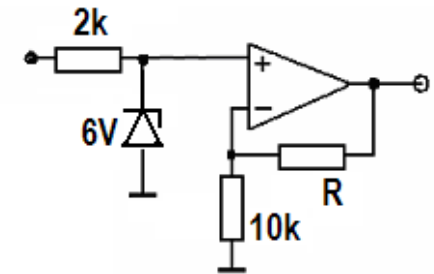
1. Oblicz wzmocnienie poniższego układu dla $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ i $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$.



2. Oblicz wartość V_o w podanym układzie.



3. Oblicz wartość prądu w rezystorze R w układzie obok.



4. Oblicz częstotliwość oscylacji oscylatora wiedząc, że: $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$, $C_1 = C_2 = 1 \mu\text{F}$

