



# Układy generacyjne

Wrocław 2010



## Wprowadzenie

**GENERATORY** – układy elektroniczne, które w kontrolowany sposób przetwarzają energię źródła zasilania w drgania elektryczne o określonym kształcie, częstotliwości i mocy przekazując je do obciążenia.



## Rodzaje

### Podział ze względu na stałość częstotliwości i mocy generowanych drgań:

- ⇒ generatory częstotliwości – duża stałość częstotliwości (wzorce  $f$ , wzbudnice nadajników),
- ⇒ generatory mocy – duża moc wyjściowa i duża sprawność energetyczna bez optymalizacji stałości częstotliwości.

### Podział ze względu na sposób generacji drgań:

- ⇒ generatory przebiegu sinusoidalnego (analogowe),
- ⇒ generatory przebiegów niesinusoidalnego (prostokątny) – przerzutniki,
- ⇒ cyfrowe generatory DDS (bezpośrednia synteza cyfrowa - Direct Digital Synthesis)



## Parametry generowanych drgań

### Częstotliwość generowanego przebiegu

#### Zakres przestrajania.

#### Stażność częstotliwości:

- ⇒ bezwzględna niestałość częstotliwości:

$$\Delta f(t) = f(t) - f_0$$

$f_0$  – częstotliwość na początku obserwacji,  
 $f(t)$  – częstotliwość w chwili  $t$  obserwacji.

- ⇒ względna niestałość częstotliwości:

$$\delta f(t) = \frac{\Delta f(t)}{f_0}$$

Dobowe stałości częstotliwości dla generatorów:

- atomowych  $\pm(10^{-12} - 10^{-14})$ ,
- kwarcowych  $\pm(10^{-6} - 10^{-10})$ ,
- LC  $\pm(10^{-3} - 10^{-4})$ ,
- RC  $\pm(10^{-2} - 10^{-3})$ .

- ⇒ stałość częstotliwości – średnia względnych niestałości  $f$  mierzonych w czasie doby lub roku:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{f_0} \frac{\int_0^T (df) dt}{T}$$



## Parametry generowanych drgań

**Wartość amplitudy.**

**Zawartość harmonicznych w nominalnych warunkach pracy.**

**Poziomy i widma fluktuacji amplitudy i fazy.**

**Moc i sprawność.**



## Generatory przebiegu sinusoidalnego (analogowe)





## Wprowadzenie

**Drgania sinusoidalne** – podstawowy rodzaj drgań występujący w przyrodzie.

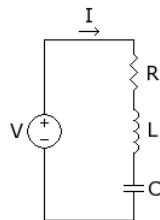
$$u(t) = U \sin(2\pi ft + \phi)$$

Drgania tego typu znajdują powszechne zastosowanie w urządzeniach nadawczo-odbiorczych, w aparaturze kontrolno-pomiarowej, w systemach cyfrowych do generacji wzorcowych przedziałów czasu.



## Wprowadzenie

### Rezonans szeregowy – rezonans napięć



Rezonans występuje gdy wartość spadków napięć na cewce i kondensatorze są sobie równe.

Impedancja zastępcza obwodu:

$$Z = R + j(X_L - X_C)$$

Reaktancja zastępcza obwodu w stanie rezonansu jest równa 0 ( $\text{Im}(Z) = 0$ ).

$$X_L - X_C = 0$$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

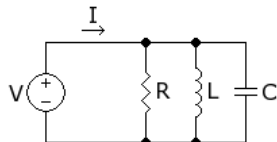
Częstotliwość rezonansowa:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$



## Wprowadzenie

### Rezonans równoległy – rezonans prądów



Rezonans występuje gdy wartość prądów płynących przez cewkę i kondensator są sobie równe.

Admitancja zastępcza obwodu:

$$Y = G + j(B_c - B_L)$$

Susceptancja zastępcza obwodu w stanie rezonansu jest równa 0 ( $\text{Im}(Y) = 0$ ).

$$B_c - B_L = 0$$

$$\omega C = \frac{1}{\omega L}$$

Częstotliwość rezonansowa:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$



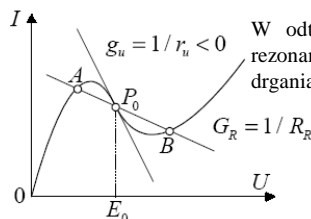
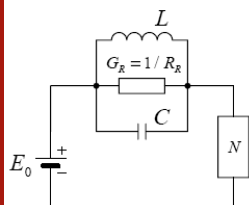
## Rodzaje generatorów

⇒ generatory sprzężeniowe – element aktywny objęty pętlą +SZ, dzięki czemu uzyskuje się od tłumienie obwodu generacyjnego,

⇒ generatory dwójnikowe (generatory o ujemnej rezystancji) – element o ujemnej rezystancji lub konduktancji wykorzystany jest do od tłumienia obwodu generacyjnego.

typu N (np. dioda tunelowa)

Odtłumienie obwodu rezonansowego jest możliwe jeśli w  $P_0$  wypadkowa konduktancja obwodu równoległego jest równa 0.



W odtłumionym (bezsstratnym) układzie rezonansowym powstają niegasnące drgania, gdy:

$$G_R < |g_u|$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

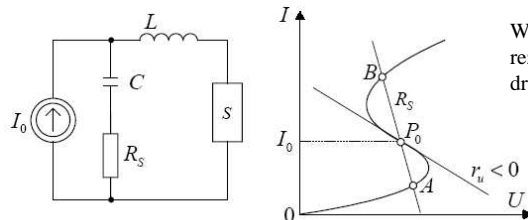


## Rodzaje generatorów

⇒ generatory sprzężeniowe – element aktywny objęty pętlą +SZ, dzięki czemu uzyskuje się od tłumienie obwodu generacyjnego,

⇒ generatory dwójnikowe (generatory o ujemnej rezystancji) – element o ujemnej rezystancji lub konduktancji wykorzystany jest do od tłumienia obwodu generacyjnego.

typu S (np. tranzystor lawinowy, tyrystor)



Odtłumienie obwodu rezonansowego jest możliwe jeśli w  $P_0$  wypadkowa rezystancja obwodu szeregowego jest równa 0.

W odtłumionym (bezstratnym) układzie rezonansowym powstają niegasnące drgania, gdy:

$$R_s < |r_u|$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$



## Generatory sprzężeniowe

⇒ generatory LC,

⇒ generatory ze stabilizacją piezoelektryczną – kwarcowe,

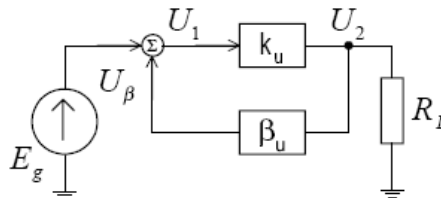
⇒ generatory RC.



## Generatory sprzężeniowe

### Warunek wzbudzenia drgań

Ogólny schemat blokowy generatora sprzężeniowego



wzmocnienie wzmacniacza bez SZ

$$k_u(j\omega) = \frac{U_2}{U_1} = |k_u| \exp(j\varphi_u)$$

transmitancja pasywnego czwórnika SZ

$$\beta_u(j\omega) = \frac{U_\beta}{U_2} = |\beta_u| \exp(j\varphi_\beta)$$

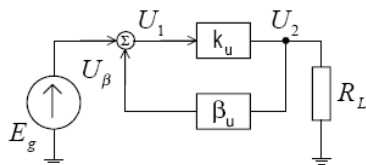
transmitancja układu ze SZ

$$k_f(j\omega) = \frac{U_2}{E_g} = \frac{k_u(j\omega)}{1 - k_u(j\omega)\beta_u(j\omega)}$$



## Generatory sprzężeniowe

### Warunek wzbudzenia drgań



Aby sprawdzić czy generator jest zdolny do generacji drgań, należy:

- przerwać obwód SZ,
- obciążyć WY SZ rezystancją równą  $R_{WE}$  wzmacniacza,
- podać na wzmacniacz napięcie  $U_1$ ,
- zmierzyć napięcie  $U_2$ ,
- generator jest zdolny do wytworzenia drgań gdy  $U_1 = U_2$

Warunek generacji:

$$U_1(j\omega) = U_2(j\omega) = \beta_u(j\omega)k_u(j\omega)U_1(j\omega)$$

Wzmocnienie w pętli SZ musi być zatem równe:

$$k_u(j\omega)\beta_u(j\omega) = \text{Re}(k_u\beta_u) + j \text{Im}(k_u\beta_u) = |k_u\beta_u| \exp[j(\varphi_u + \varphi_\beta)] = 1$$



## Generatory sprzężeniowe

### Warunek wzbudzenia drgań

**Warunek amplitudy:**

$$|k_u \beta_u| = 1 = \operatorname{Re}(k_u \beta_u) = 1$$

drgania mogą być generowane wówczas, gdy wzmacniacz kompensuje tłumienie wprowadzone przez obwód SZ (w praktyce warunek  $\geq 1$ , gdyż nawet niewielkie zmniejszenie wzmocnienia mogłoby prowadzić do zerwania drgań; warunek  $> 1$  może powodować zniekształcenia  $U_{wy}$  wynika to z nieliniowości wzmacniacza)

**Warunek fazy:**

$$\operatorname{Im}(k_u \beta_u) = 2\pi n, \quad \text{lub} \quad \varphi_u + \varphi_\beta = 2\pi n, \quad \text{gdzie} \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

drgania mogą być generowane wówczas, gdy napięcie wyjściowe jest w fazie z napięciem wejściowym

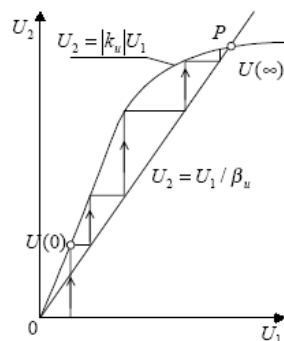
Warunki generacji powinny być spełnione tylko dla jednej określonej częstotliwości. Zapewnia się to z pewnym przybliżeniem przez odpowiedni dobór elementów RC lub LC.



## Generatory sprzężeniowe

### Proces wzbudzenia drgań – miękkie

Proces narastania drgań i osiągnięcia stanu ustalonego generatora można przedstawić w oparciu o ch-yki przejściowe  $k_u$  i  $\beta_u$ . Nieliniowości elementów aktywnych powodują, że ch-yki wzmacniaczy są także nieliniowe i zależne od klasy pracy wzmacniacza. Ch-yka  $\beta_u$  jest liniowa, jeśli jest on zrealizowany z liniowych elementów pasywnych



Ch-yka wzmacniacza w początkowym okresie jest liniowa (wzmacniacz klasy A, AB lub B).

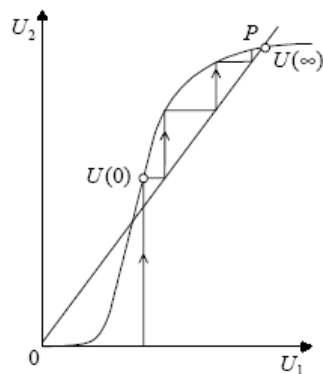
Nawet dla małych amplitud napięcia  $k_u \beta_u \gg 1$ .

Po załączeniu napięcia zasilania i przypadkowym pobudzeniu (np. napięciem szumów) amplituda drgań narasta od wartości początkowej  $U(0)$  do wartości ustalonej  $U(\infty)$  w pkt P, w którym  $k_u \beta_u = 1$ . Dalszy wzrost amplitudy nie jest możliwy



## Generatory sprzężeniowe

### Proces wzbudzenia drgań – twarde



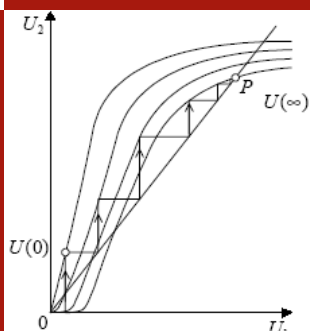
Ch-yka wzmacniacza narasta dopiero po pewnej wartości progowej napięcia  $U_I$  (wzmacniacz klasy C).

Przy małych amplitudach napięcia warunek generacji nie jest spełniony ( $|k_u| < 1/|\beta_u|$ ).

Aby nastąpiło wzbudzenie drgań układ musi być silnie pobudzony, np. przez podanie napięcia zasilania. Amplituda drgań narasta od wartości początkowej  $U(0) > 0$  do wartości ustalonej  $U(\infty)$  w pkt P, w którym  $k_u \beta_u = 1$ .

## Generatory sprzężeniowe

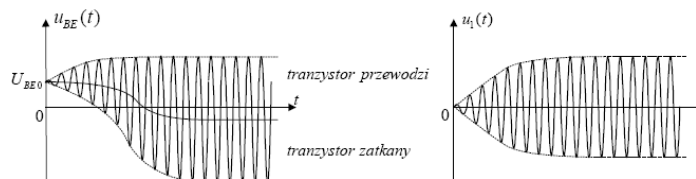
### Proces wzbudzenia drgań – ukł.autom.polaryzacji obw.wej.wzm.



Wzmacniacz selektywny pracuje w klasie C z dynamiczną polaryzacją obwodu wejściowego.

Na początku wzmacniacz pracuje w klasie A – wzbudzenie miękkie.

Pod wpływem narastającej amplitudy drgań wytwarza się rosnące napięcie polaryzujące obwód wejściowy wzmacniacza przesuując punkt pracy wzmacniacza do klasy C.





## Generatory LC Rodzaje

W generatorach LC stosuje się tranzystory bipolarne lub unipolarne, można je realizować również na wzmacniaczach operacyjnych lub brankach cyfrowych.

Połączenie elementu aktywnego z obwodem rezonansowym może być realizowane za pomocą obwodów sprzęgających wykonanych jako transformatory, dzielniki pojemnościowe lub indukcyjne.

Istnieją 3 podstawowe struktury generatorów LC (różne sprzężenie obwodu rezonansowego

z elementem aktywnym)

- generator Colpittsa,
- generator Hartleya,
- generator Meissnera.

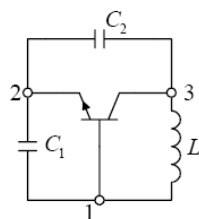
Na tej bazie powstało wiele innych odmian generatorów np.:

- generator Clappa odmiana Colpittsa,
- generatory kwarcowe (Pierce'a) odmiana Colpittsa i Hartleya.

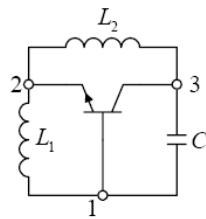


## Generatory LC Rodzaje

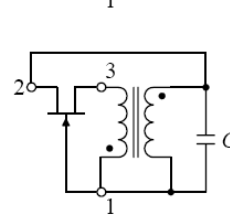
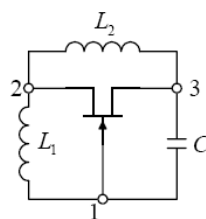
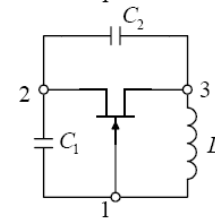
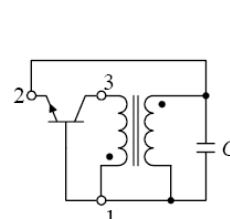
Generator Colpittsa



Generator Hartleya



Generator Meissnera



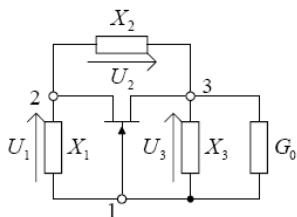
gdy węzeł 1 uziemiony – konfiguracja OB. Lub OG; gdy węzeł 2 uziemiony – konfiguracja OE lub OS



## Generatory LC

### Warunki generacji – generator „trójpunktowy” - OG

Układ z elementem aktywnym (JFET) nieobciążającym obwód rezonansowy – konfiguracja OG



obwód rezonansowy to elementy  $X_1, X_2, X_3$ ,  
 $G_0$  element reprezentujący straty obwodu,

Ponieważ OG nie zmienia fazy napięcia wyjściowego  $U_3$ ,  
dzielnik  $X_1, X_2$  musi się składać z reaktancji tego samego typu  
aby podział  $U_3$  był bez zmiany fazy.

jeśli  $X_1, X_2 = X_C$  to  $X_3 = X_L$  – generator Colpittsa

jeśli  $X_1, X_2 = X_L$  to  $X_3 = X_C$  – generator Hartleya

Z warunku fazy wyznaczyć można częstotliwość drgań generatora (dla częstotliwości rezonansowej  $\omega_0$  obwód rezonansowy reprezentuje konduktancję  $G_0$ )

$$X_1 + X_2 + X_3 = 0$$

Z warunku amplitudy otrzymujemy:

$$k_{u0}(\omega_0)\beta_0(\omega_0) = k_u(\omega_0) \frac{X_1}{X_1 + X_2} \geq 1$$



## Generatory LC

### Warunki generacji – generator „trójpunktowy” - OG

$$k_{u0}(\omega_0)\beta_u(\omega_0) = k_u(\omega_0) \frac{X_1}{X_1 + X_2} \geq 1$$

Ponieważ  $k_u(\omega_0)$  jest duże, to przy  $k_u \gg 1$  warunek amplitudy jest łatwy do spełnienia nawet przy  $X_1 \ll X_2$ , tj. przy:

$C_1 \gg C_2$  dla Colpittsa,

$L_1 \ll L_2$  dla Hartleya.

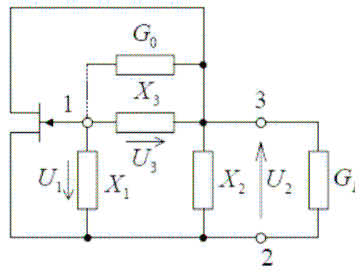
Warunek ten jest szczególnie istotny dla tranzystorów bipolarnych, wówczas  $X_1$  jest bocznikowane niewielką  $r_{wej}$  tranzystora. Wpływ tej rezystancji będzie mały, gdy  $X_1 \ll X_2$  oraz  $X_1 \ll r_{wej}$ .



## Generatory LC

### Warunki generacji – generator „trójpunktowy” - OS

Układ OS z elementem aktywnym (JFET) – konfiguracja OS, obciążenie  $G_L$



Układ OS odwraca fazę o  $180^\circ$ , zatem dzielnik  $X_1, X_2$  powinien wnieść dalsze przesunięcie o  $180^\circ$  tak aby była zgodność faz napięć  $U_1$  oraz  $U_3$ . Słuszny jest zatem warunek fazy jak dla OG:

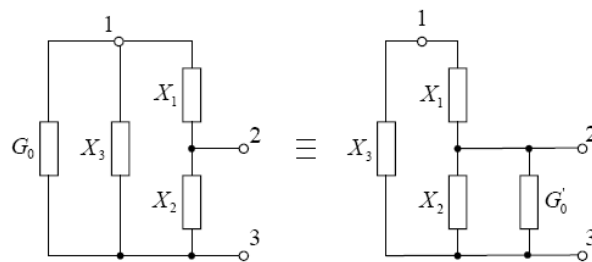
$$X_1 + X_2 + X_3 = 0$$



## Generatory LC

### Warunki generacji – generator „trójpunktowy” - OS

Konduktancję  $G_0$  można przetransformować do zacisków do których przyłączona jest  $G_L$



$$G'_0 = \frac{G_0}{p^2}$$

$$p = \frac{X_2}{X_1 + X_2}$$



## Generatory LC

### Warunki generacji – generator „trójpunktowy” - OS

Dla częstotliwości rezonansowej ( $\omega_0$ ) transmitancje  $k_u$  i  $\beta_u$  wynoszą:

$$k_u(\omega_0) = \frac{-g_m}{g_{ds} + G_L + G_0 / p^2}$$

$$\beta_u(\omega_0) = \frac{X_1}{X_1 + X_3} = -\frac{X_1}{X_2} = 1 - \frac{1}{p}$$

Zatem warunek amplitudy przyjmuje postać:

$$k_u(\omega_0)\beta_u(\omega_0) = \left( \frac{-g_m}{g_{ds} + G_L + G_0 / p^2} \right) \left( 1 - \frac{1}{p} \right) = 1$$

Po przekształceniu:

$$p^2(g_{ds} + G_L + g_m) - pg_m + G_0 = 0$$



## Generatory LC

### Warunki generacji – generator „trójpunktowy” - OS

Warunkiem powstania drgań w układzie jest, aby pierwiastki równania były rzeczywiste. Otrzymujemy jeden pierwiastek:

$$p_1 \approx \frac{g_m}{g_m + G_L}$$

Ponieważ:

$$p_1 = \frac{X_2}{X_1 + X_2} \approx \frac{g_m}{g_m + G_L}$$

otrzymujemy warunek amplitudy:

$$\frac{X_1}{X_2} \approx \frac{G_L}{g_m}$$



## Generatory LC

### Warunki generacji – generator Colpittsa, Hartleya

Warunki powstania drgań w układzie Colpittsa:

– amplitudy:

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{G_L}{g_m}$$

– fazy:

$$\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \omega_0^2 L$$

Warunki powstania drgań w układzie Hartleya:

– amplitudy:

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{G_L}{g_m}$$

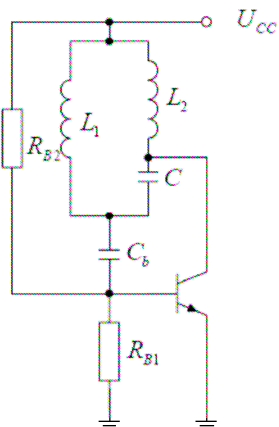
– fazy:

$$L_1 + L_2 = \frac{1}{\omega_0^2 C}$$



## Generatory LC

### Generator Hartleya – zasilanie szeregowe (WE)



Składowa stała  $I_C$  płynie przez cewkę obwodu rezonansowego.

Połączenie obwodu rezonansowego z bazą tranzystora oddzielone jest przez  $C_b$  sprzęgającą.

Na  $C_b$  po wytworzeniu się drgań pojawia się dodatkowe napięcie przesuwające stopniowo pkt. pracy tranzystora do pracy w klasie AB, B lub C.

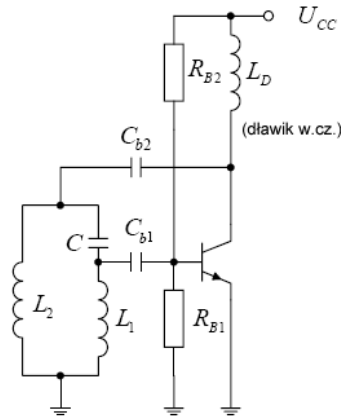
Stała czasowa rozładowania  $C_b$  powinna być duża w porównaniu z okresem drgań generatora.

Częstotliwość generowanych drgań równa jest częstotliwości obwodu rezonansowego.



## Generatory LC

### Generator Hartleya – zasilanie równoległe (WE)



Składowa stała  $I_C$  płynie przez dławik w.cz. a nie płynie przez obwód rezonansowy (obwód równoległy). Obwód rezonansowy zapewnia  $180^0$  przesunięcia fazowego (WE-kolejne  $180^0$ ) – spełniony warunek fazy. Częstotliwość generowanych drgań równa jest częstotliwości obwodu rezonansowego.

Sposób zasilania stosowany szczególnie w generatorach mocy, ponieważ przez dławik nie płynie prąd w.cz. i zapewnione jest dzięki temu dobre dopasowanie źródła zasilającego.

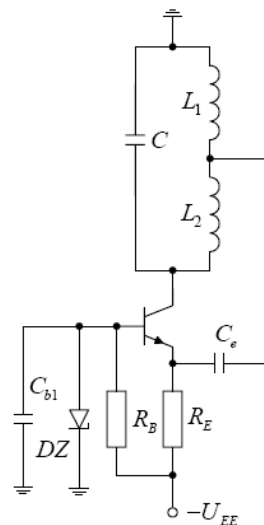
W układzie również występują małe straty mocy w obwodzie zasilania.

Wada: trudność wykonania dławika tak by nie posiadał własnych rezonansów.



## Generatory LC

### Generator Hartleya – zasilanie od strony emitera (WB)



Składowa stała  $I_C$  płynie przez obwód rezonansowy. Sygnał z obw.rezon. przez SZ ( $C_e$ ) nie jest przesunięty w fazie – WB nie zmienia fazy zatem mamy +SZ.

Częstotliwość generowanych drgań równa jest częstotliwości obwodu rezonansowego.

Układ stosowany w generatorach małej mocy.



## Generatory LC

### Generator Hartleya

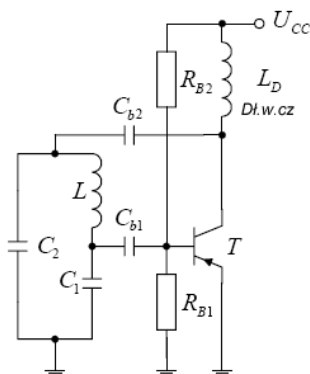
Przestrajanie (zmiana generowanej  $f$ ) może być realizowane przez zmianę  $L$  lub  $C$  (częściej stosowane).

Aby uzyskać dużą stałość częstotliwości (ograniczyć wpływ temperatury) należy stosować obwód rezonansowy o dużej  $Q$ .



## Generatory LC

### Generator Colpittsa – zasilanie równoległe (WE)



Składowa stała  $I_C$  płynie przez dławik w.cz. i nie płynie przez obwód rezonansowy. Obwód rezonansowy zapewnia  $180^\circ$  przesunięcia fazowego (WE-kolejne  $180^\circ$ ) – spełniony warunek fazy. Częstotliwość generowanych drgań równa jest częstotliwości obwodu rezonansowego.

Sposób zasilania stosowany szczególnie w generatorach mocy, ponieważ przez dławik nie płynie prąd w.cz. i zapewnione jest dzięki temu dobre dopasowanie źródła zasilającego.

W układzie również występują małe straty mocy w obwodzie zasilania.

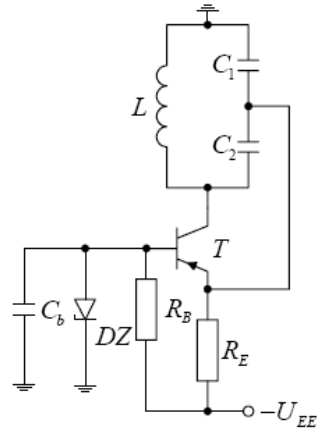
Wada: trudność wykonania dławika tak by nie posiadał własnych rezonansów.





## Generatory LC

### Generator Colpittsa – zasilanie od strony emitera (WB)



Układ stosowany w generatorach małej mocy.



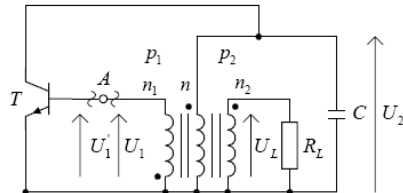
## Generatory LC

### Generator Colpittsa

Przestrzajanie (zmiana generowanej  $f$ ) może być realizowane przez zmianę  $L$  lub jednoczesną zmianę  $C$  przy zachowaniu ich stałego stosunku.



## Generatory LC Generator Meissnera



Sprężenie obwodu rezonansowego poprzez transformator

Rozcięcie pętli pozwala na określenie wzmocnienia  $k_u \beta_u$ .

Zakładając częstotliwość graniczną tranzystora dużo większą od częstotliwości generacji można przyjąć, że  $y_{we}$  tranzystora ma charakter rzeczywisty.

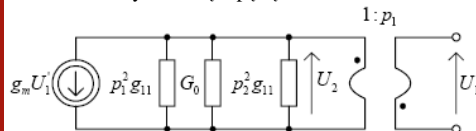
Obwód LC dla częstotliwości rezonansowej:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$p_1 = \frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n} \quad p_2 = \frac{U_L}{U_2} = \frac{n_2}{n}$$

$n$  – liczba uzwojeń

Model liniowy z rozcięta pętlą SZ



można zastąpić konduktancją dynamiczną  $G_0$

$$G_0 = \frac{\omega_0 C}{Q}$$

$Q$  – dobroć układu



## Generatory LC Generator Meissnera

Wypadkowa konduktancja obwodu dla częstotliwości rezonansowej  $f_0$

$$G_R = G_0 + p_1^2 g_{11} + p_2^2 G_L$$

Ponieważ OE odwraca fazę o  $180^\circ$ , to dla spełnienia warunku fazy, dodatkowe przesunięcie o  $180^\circ$  musi zapewnić transformator (przy odpowiednim połączeniu w obwodzie bazy).

Warunek amplitudy

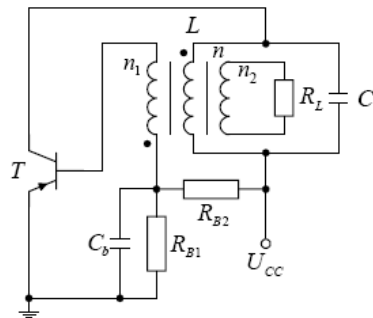
$$k_u(\omega_0)\beta_u(\omega_0) = \left( \frac{-g_m}{g_{ds} + p_1^2 g_{11} + p_2^2 G_L} \right) (-p_1) = 1$$

Z tego warunku wyznaczamy przekładnię transformatora.



## Generatory LC

### Generator Meissnera – zasilanie szeregowe (WE)



Obwód rezonansowy musi dać przesunięcie  $180^\circ$  realizowane jest to poprzez nawinięcie uzwojeń trafo. w przeciwnym kierunku.

$C_b$  zapewnia małą impedancję w obwodzie sterującym dla przebiegów w.c.z. (zwiera  $R_{B1}$ ,  $R_{B2}$ ), ponadto jest elementem automatycznej polaryzacji bazy.

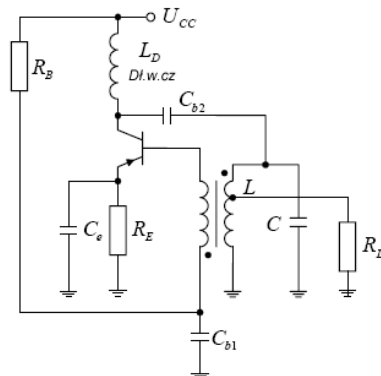
Gdy narasta amplituda drgań na  $C_b$  stopniowo narasta ujemne napięcie (ładowanie impulsami  $I_B$ ). Dzięki temu generator wzbudza się miękko (klasa A) a w miarę narastania amplitudy drgań jego punkt pracy przesuwa się do klasy AB, B lub C.

W tym sposobie pracy układ wykazuje własności stabilizujące amplitudę generowanego przebiegu.



## Generatory LC

### Generator Meissnera – zasilanie równoległe (WE)



$C_{b1}$  spełnia podobną rolę jak C przy zasilaniu szeregowym.

$C_{b2}$  sprzęga obwód rezonansowy z kolektorem tranzystora.



## Generatory LC

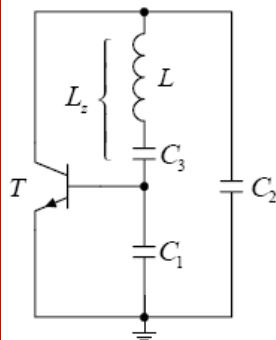
### Generator Meissnera

Przestrajanie (zmiana generowanej  $f$ ) może być realizowane przez zmianę  $C$  w obwodzie rezonansowym.



## Generatory LC

### Generator Clappa – odmiana Colpittsa



Indukcyjność zastępcza:

$$L_z = L - \frac{1}{\omega_2^2 C_3}$$

silnie rośnie wraz ze wzrostem  $f$ , dzięki temu w układzie zwiększa się stałość częstotliwości generowanych drgań.

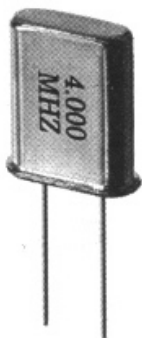
W układzie tym  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $L$  mogą być znacznie większe niż odpowiedniki w układzie Colpittsa.

Istotną zaletą przy projektowaniu generatorów o dużych częstotliwościach, wówczas wartości  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $L$  potrzebne do zapewnienia wymaganej częstotliwości drgań stają się porównywalne z pojemnościami i indukcyjnościami pasywnymi układu.



## Generatory kwarcowe

### Rezonator kwarcowy



Przetwornik elektromechaniczny składający się z wibratora kwarcowego i obudowy chroniącej go przed wpływami zewnętrznymi.

Element kwarcowy wycięty z monokryształu kwarcu, najczęściej w postaci prostokątnych lub okrągłych, płaskich lub soczewkowatych płytek.

Na element kwarcowy napyla się elektrody z cienkich warstw metalicznych (złoto, srebro, aluminium).

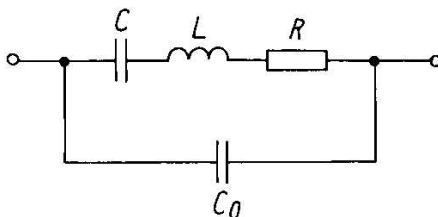
Jeżeli od elektrod przyłożone zostanie napięcie zmienne (sinus) to w elemencie piezoelektrycznym (kwarc) wytworzy się zmienne pole elektryczne. W wyniku zjawiska piezoelektrycznego wibrator zaczyna drgać, co prowadzi do pojawienia się na jego powierzchni zmiennych ładunków elektrycznych (płynie prąd).

Rezonator zachowuje się jak obwód rezonansowy o dużej dobroci. Współczynnik temperaturowy częstotliwości rezonansowej jest bardzo mały. Osiągalna stałość częstotliwości duża:  $\pm(10^{-6} - 10^{-10})$ .



## Generatory kwarcowe

### Rezonator kwarcowy – model zastępczy



$L$ ,  $R$  i  $C$  odpowiadają parametrom mechanicznym kwarcu, ( $L$  – masa kwarcu,  $R$  – oporność mechaniczna,  $C$  – sprężystość płytki kwarcu),

$C_0$  – pojemność statyczna elektrod i przewodów doprowadzających.

Przykładowe parametry rezonatorów

f [Hz]	100 k	500 k	1 M	4 M	10 M	20 M	60 M	120 M
R [ $\Omega$ ]	400	500	250	100	20	10	30	50
L [H]	93,8	20,3	3,62	0,100	0,0169	0,0042	0,0035	0,00293
C [pF]	0,027	0,005	0,007	0,015	0,015	0,015	0,002	0,0006
$C_0$ [pF]	6	6	5	5	3,5	3	5	4



## Generatory kwarcowe Rezonator kwarcowy – rezonanse

Dobroć rezonatora (duża bo duży stosunek  $L$  do  $C$ ):

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Impedancja rezonatora:

$$Z_K = \frac{j}{\omega} \cdot \frac{\omega^2 LC - 1}{C_0 + C - \omega^2 L C C_0}$$

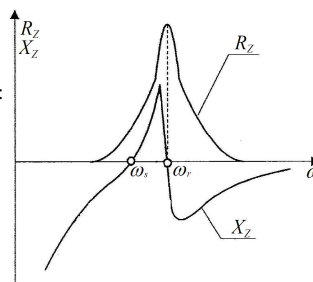
W układzie rezonatora mogą występować dwa rodzaje rezonansu:

⇒ szeregowy ( $Z_K = 0$ )

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

⇒ równoległy ( $Z_K = \infty$ )

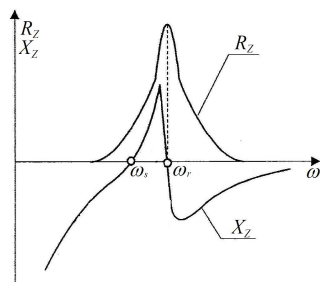
$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 + \frac{C}{C_0}} = f_s \sqrt{1 + \frac{C}{C_0}}$$



$f_s$  zależy tylko od parametrów kwarcu natomiast  $f_R$  również od  $C_0$  związanej z pojemnościami montażowymi. W związku z tym rezonans równoległy jest mniej stabilny.



## Generatory kwarcowe Rezonator kwarcowy – rezonanse



Pomiędzy  $f_s$  a  $f_r$  reaktancja rezonatora ma charakter indukcyjny a więc może on pracować jako element indukcyjny w typowym układzie Colpittsa.

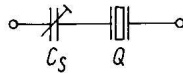
Dzięki dużej dobroci rezonatora (stroma charakterystyka fazowa w okolicy  $f_r$ ) uzyskuje się dużą stabilność  $f$  generowanego sygnału.



## Generatory kwarcowe

### Rezonator kwarcowy – strojenie

Często pojawia się konieczność dostrojenia kwarcu w niewielkim zakresie. W tym celu do kwarcu szeregowo dopina się dodatkowy  $C_s$  o wartości dużo większej od  $C$ .



Wypadkowa impedancja tego połączenia: 
$$Z_k' = \frac{1}{j\omega C_s} \cdot \frac{C + C_0 + C_s - \omega^2 LC(C_0 + C_s)}{C_0 + C - \omega^2 LCC_0}$$

uwzględniając, że  $C \ll C_0 + C_s$ :

$$f_s' = f_s \left[ 1 + \frac{C}{2(C_0 + C_s)} \right]$$

względna zmiana częstotliwości:

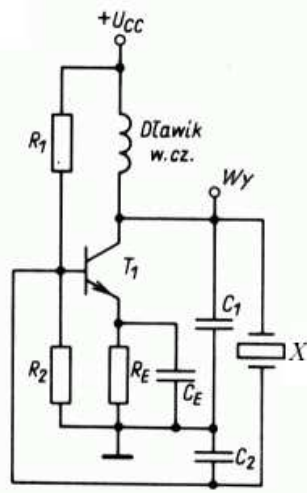
$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{C}{2(C_0 + C_s)}$$

Dodatkowa  $C_s$  nie zmienia  $f_R$  (zero mianownika  $Z_k$  nie zależy od  $C_s$ ). Przy  $C_s$  dążącym do 0,  $f_s$  można zwiększyć prawie do  $f_R$ .



## Generatory kwarcowe

### Generator Colpittsa – Pierce'a



Generator pracuje w rezonansie równoległym (obwód rezonansowy zapewnia przesunięcie fazy  $180^\circ$ ).

Od zastępczej pojemności dzielnika  $C_1, C_2$  zależy generowana częstotliwość (obwód rezonansowy  $X, C_1, C_2$ ).

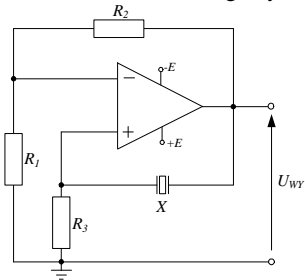
Od stosunku  $C_1/C_2$  zależy wartość współczynnika SZ i spełnienie warunku amplitudy.



## Generatory kwarcowe

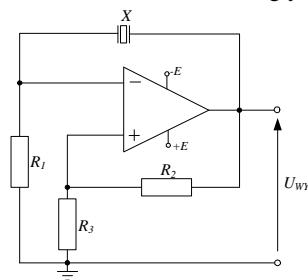
### Rodzaje rezonansów

Układ w rezonansie szeregowym



X w pętli +SZ (nie zmienia fazy)

Układ w rezonansie równoległym

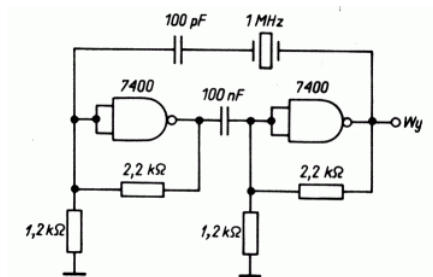


X w pętli -SZ (zmienia fazę o 180°)



## Generatory kwarcowe

### Generator sygnału prostokątnego



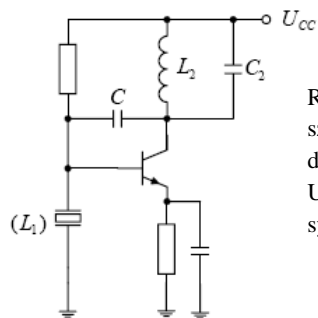




## Generatory kwarcowe

### Generator drgań o $f$ ponadpodstawowej

Wytworzenie kwarcu na  $f$  większą niż 30 MHz jest trudne. Większe  $f$  można wytwarzać synchronizując generator LC rezonatorem o mniejszej  $f$  w pętli fazowej PLL, lub pobudzić kwarc do drgań na wyższej harmonicznej.



Rezonator jest włączony w obwód +SZ (rezonans szeregowy). Główny obwód rezonansowy LC (o mniejszej dobroci) dostrojony musi być do  $f_s$  lub jej harmonicznej. Umożliwia to generowanie stabilnych częstotliwościowo sygnałów o  $f \geq f_s$ .



## Generatory RC

Generatory RC stosuje się do pracy w zakresie małych częstotliwości (kilka Hz do kilkuset Hz). W tym zakresie  $f$  w generatorach LC wartości  $L$  i  $C$  stają się zbyt duże (nie nadają się do miniaturyzacji) a dobroć obwodu rezonansowego maleje.

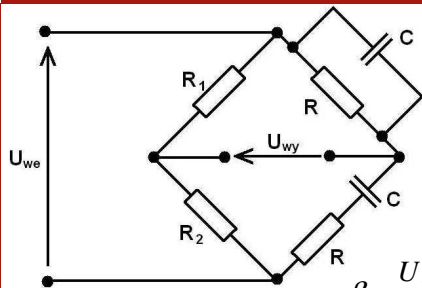
Generator RC można zrealizować zastępując obwód rezonansowy LC biernym filtrem pasmowoprzepustowym RC. Stosowane są struktury selektywne (mostek Wienera, podwójne T, bocznikowane T, itp.) oraz przesuwniki fazowe RC.

W porównaniu z generatorami LC mają gorszą stałość częstotliwości  $[\pm(10^{-2} - 10^{-3})]$ , jednakże generują sygnał o bardzo małych zniekształceniach i umożliwiają przestrajanie  $f$  w zakresie 1:10 na jednym podzakresie.

Generatory RC powszechnie stosowane są jako generatory serwisowe i laboratoryjne.



## Generatory RC Mostek Wienera



$$\beta = \frac{U_{wy}}{U_{we}} = \underbrace{\left( \frac{j\omega RC}{1 - \omega^2 R^2 C^2 + j3\omega RC} \right)}_{\beta^+} - \underbrace{\left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)}_{\beta^-}$$

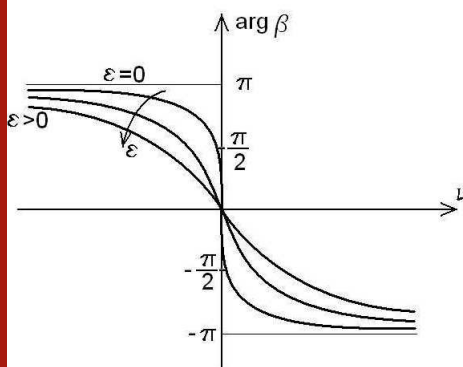
Mostek jest idealnie zrównoważony, gdy moduł transmitancji  $\beta$  osiąga minimum.

Wówczas:

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} \quad \frac{R_2}{R_1} = 2 \quad \beta^+ = \frac{1}{3} \quad Q = \frac{f_0}{\Delta f} = \frac{1}{3}$$



## Generatory RC Mostek Wienera



Przy  $\omega_0$  transmitancja  $\beta$  wynosi 0. Aby zatem zostały spełnione warunki generacji należałoby zastosować wzmacniacz o  $K_u \rightarrow \infty$ .

W  $\omega_0$  następuje również przeskok przesunięcia fazowego pomiędzy  $\pi/2$  a  $-\pi/2$ .

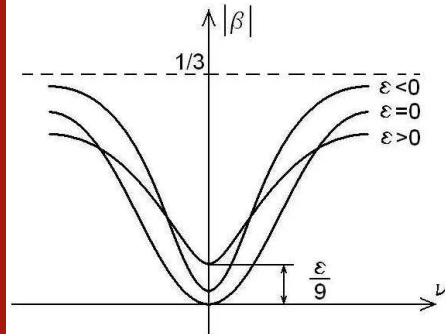
Oznacza to, że przy pełnym zrównoważeniu nie jest możliwe zbudowanie generatora. Koniecznie staje się zatem rozrównoważenie mostka

$$v = \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \quad \text{- odstrojenie,}$$

$$\varepsilon = \frac{R_2}{R_1} - 2 \ll 1 \quad \text{- współczynnik rozstrojenia mostka dla } \omega_0,$$



## Generatory RC Mostek Wienia



Przy nierównoważonym mostku możemy zapisać:

$$\beta^+ = \frac{1}{3 + j\nu}$$

$f_0$  generatora zależy od elementów RC

$$\beta^- = \frac{1}{3 + \varepsilon}$$

$R_1, R_2$  decydują o spełnieniu warunku generacji oraz ustalają amplitudę generowanego sygnału



## Generatory RC Mostek Wienia

$$\beta = \beta^+ - \beta^- = \frac{1}{3 + j\nu} - \frac{1}{3 + \varepsilon} = \frac{\varepsilon}{9} \frac{1 - j\frac{\nu}{\varepsilon}}{\left(1 + j\frac{\nu}{\varepsilon}\right)\left(1 + \frac{\varepsilon}{\nu}\right)}$$

zakładając  $\nu \ll 3$  (dla  $\omega = \omega_0, \nu = 0$ ) w zakresie  $\varepsilon \ll 3$  otrzymujemy:

$$\beta \approx \frac{\varepsilon}{9} \left(1 - j\frac{\nu}{\varepsilon}\right) = \beta_0 \left(1 - j\frac{\nu}{\varepsilon}\right)$$

Wówczas dobroć mostka wynosi:

$$Q = \frac{\omega_0}{2} \left| \frac{-2}{\varepsilon \omega_0} \right| = \frac{1}{\varepsilon} = \frac{1}{9|\beta_0|}$$



## Generatory RC Mostek Wiena

Z warunku amplitudy  $k_u(\omega_0) \beta(\omega_0) \geq 1$  otrzymujemy:

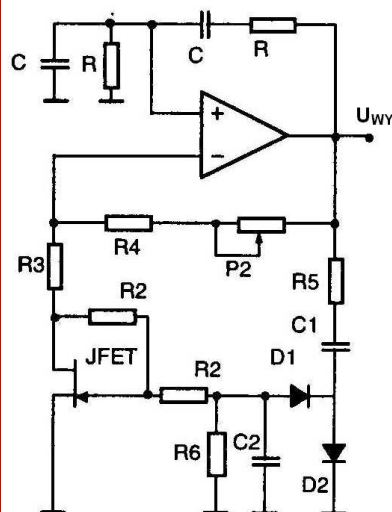
$$\varepsilon \geq \frac{9}{k_u(\omega_0)}$$

Fazy transmitancji  $\beta^+$  i  $\beta^-$  są zgodne. Przy  $\varepsilon \geq 0$  mostek nie odwraca fazy i warunek fazy jest spełniony dla  $\omega_0$  niezależnie od stopnia niezerównoważenia mostka.

$R_1, R_2$  pracują zwykle w gałęzi automatycznej regulacji wzmocnienia (ARW) generatora.



## Generatory RC Mostek Wiena – ARW



Układ ARW zrealizowany jako podwajacz napięcia niesymetryczny z JFET linearyzowanym.

JFET spełniający rolę regulowanej elektrycznie rezystancji pracuje w obszarze liniowym (triodowym), w którym zastosowano linearyzację ch- $\gamma_k$  wyj przy pomocy -SZ ( $R_2$ ).

- ⇒ napięcie na  $C_2$  jest ujemne i bezpośrednio steruje bramkę JFET-a,
- ⇒ gdy amplituda  $U_{wy}$  rośnie to rośnie ujemne napięcie na  $C_2$ ,
- ⇒ rośnie ujemne napięcie na bramce JFET,
- ⇒ rośnie rezystancja statyczna JFET  $r_{DS}$ ,
- ⇒ rośnie -SZ,
- ⇒ maleje amplituda napięcia wyjściowego.



# Generatory funkcyjne

Wroclaw 2009



## Wstęp

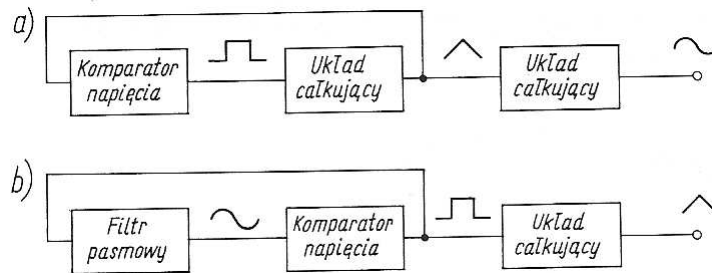
Generatorem funkcyjnym nazywamy układ, wytwarzający kilka wzajemnie zsynchronizowanych przebiegów o różnych kształtach ale tej samej  $f$ .

Generatory wytwarzają na ogół przebiegi trójkątne, prostokątne i sinusoidalne, dostępne z oddzielnych wyjść.

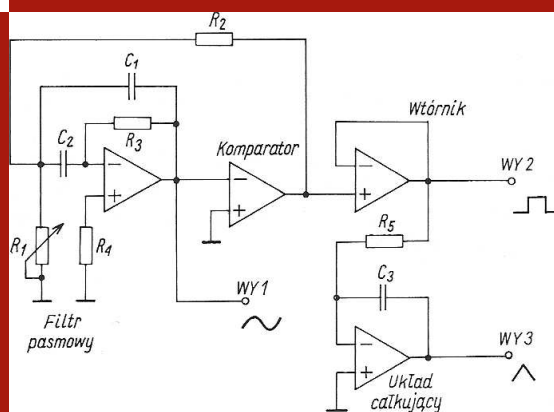
Do budowy używa się WO i komparatorów.



## Sposoby generacji



## Generator funkcyjny



$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_p R_3 C_1 C_2}}$$

$$R_p = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}$$

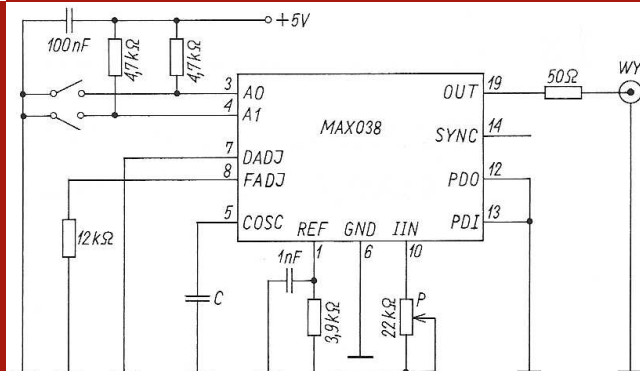
Wskutek +SZ wy. komparatora i we. filtra, układ generuje sin, z którego na komparatorze kształtowany jest prostokąt. Z prostokąta kształtowany jest trójkąt w układzie integratora.

Wtórnik separuje wy. prostokąta od wej. filtra.

$f$  regulowana jest potencjometrem  $R_1$ .



## Generator funkcyjny Układ scalony



$R$ ,  $C$  określają  $f$ . Konstrukcja sprowadza się do odtworzenia noty aplikacyjnej.

Na wej A0 i A1 ustalany jest cyfrowo rodzaj przebiegu (1,X – sin; 0,0 – prostokąt; 0,1 – trójkąt).

P – regulacja  $f$  (od 0,2 Hz do 20 MHz).

$U_{wyp-p} = 2V$