



**Politechnika Wrocławska**

**Instytut Telekomunikacji, Teleinformatyki i Akustyki**

# Generatory drgań sinusoidalnych

Wrocław 2006



# 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.

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

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



# Wprowadzenie

## *Podział generatorów*

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

⇒ generatory częstotliwości – duża stałość częstotliwości (wzorce  $f$ , wzбудnice nadajników)

⇒ generatory mocy – duża moc wyjściowa i duża sprawność energetyczna bez optymalizacji stałości częstotliwości.

### **Podział ze względu na rozwiązania układowe i sposób pracy elementów aktywnych:**

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

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



# Wprowadzenie

## *Podział generatorów – generatory sprzężeniowe*

**Podział ze względu na rodzaj elementów wykorzystanych do generacji drgań:**

⇒ generatory LC,

⇒ generatory ze stabilizacją piezoelektryczną – kwarcowe,

⇒ generatory RC.



# Wprowadzenie

## *Ocena jakości generowanych drgań*

### **Stałość 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:

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

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

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

Dobowe stałości częstotliwości dla generatorów:

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

**Zawartość harmoniczných w nominalnych warunkach pracy.**

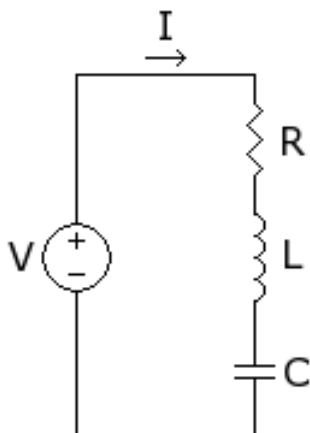
**Zakres przestrajania.**

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



# 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 (  $\text{Im}(Z) = 0$  ).

$$X_L - X_C = 0$$

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

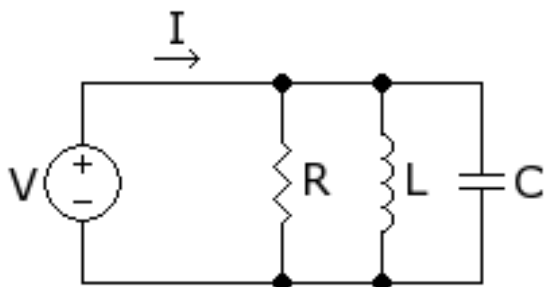
Częstotliwość rezonansowa:

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



# 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:

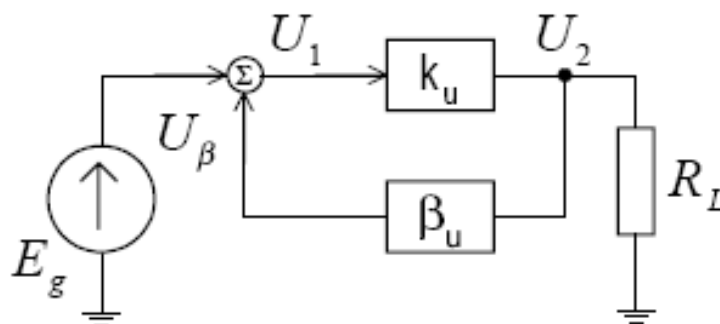
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$



# Warunki generacji drgań

## Generatory sprzężeniowe

*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

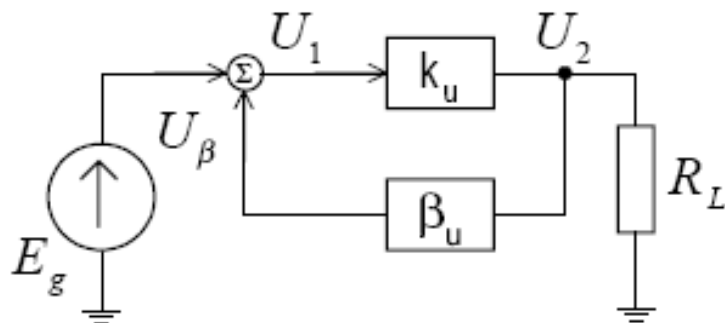
$$k_f(j\omega) = \frac{U_2}{E_g} = \frac{k_u(j\omega)}{1 - k_u(j\omega)\beta_u(j\omega)}$$





# Warunki generacji drgań

## Generatory sprzężeniowe



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:

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



# Warunki generacji drgań

## *Generatory sprzężeniowe*

**Warunek amplitudy:**

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

drżania 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:**

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

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

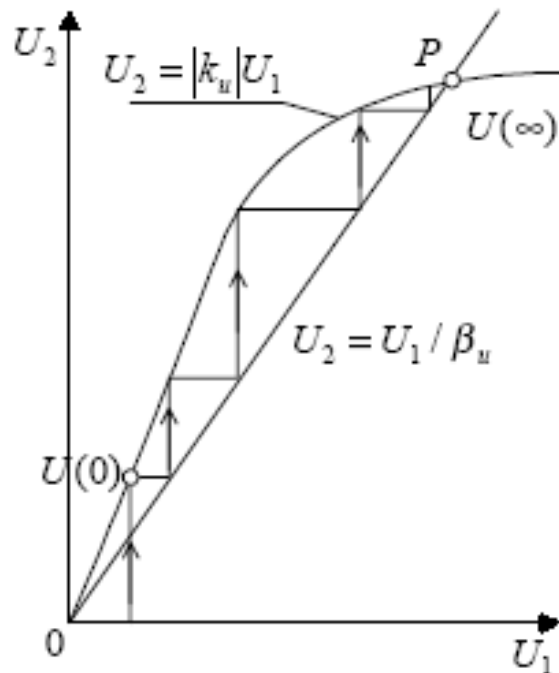
Warunki generacji powinny być spełnione tylko dla jednej określonej częstotliwości. Zapewnia się to z pewnym przybliżeniem przez odpowiedni dobór elementów RC lub LC.



# Proces wzbudzania się drgań

## *Wzbudzanie 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 wzmacniaczy. 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).

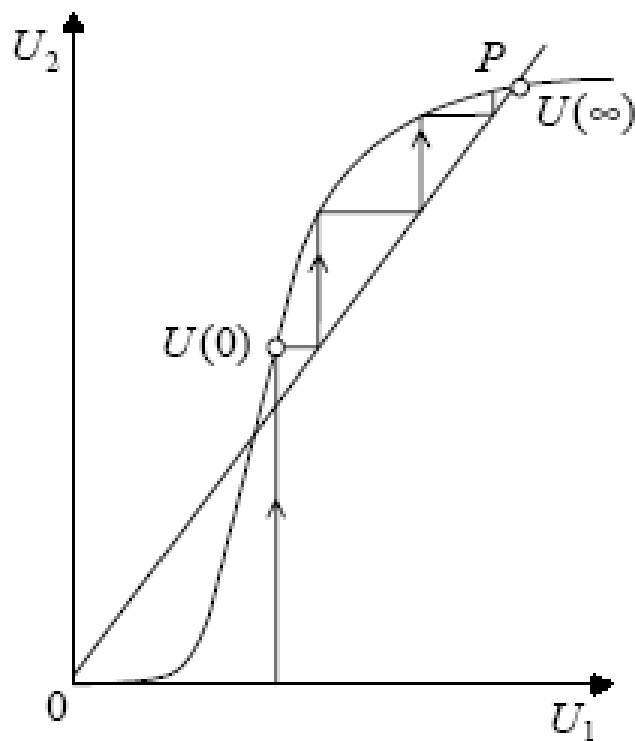
Nawet dla małych amplitud napięcia  $k_u \beta_u \gg 1$ .

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



# Proces wzbudzania się drgań

## *Wzbudzenie twarde*



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

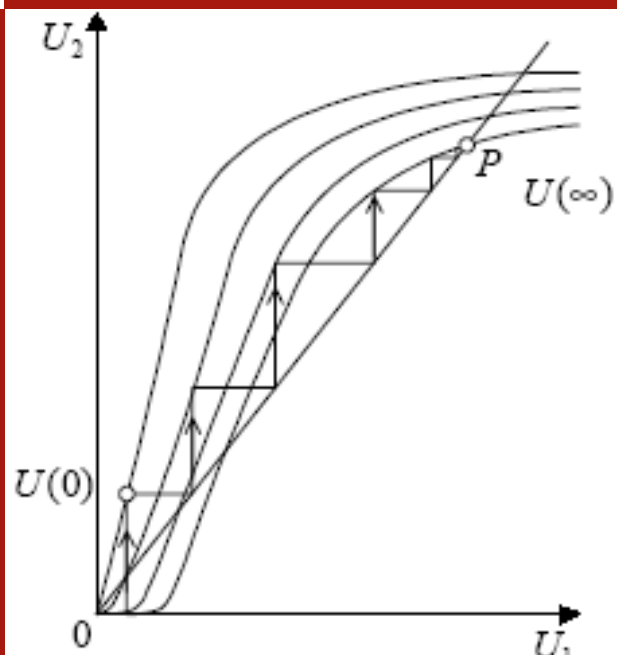
Przy małych amplitudach napięcia warunek generacji nie jest spełniony ( $|k_u| < 1/|\beta_u|$ ).

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  $k_u \beta_u = 1$ .



# Proces wzbudzania się drgań

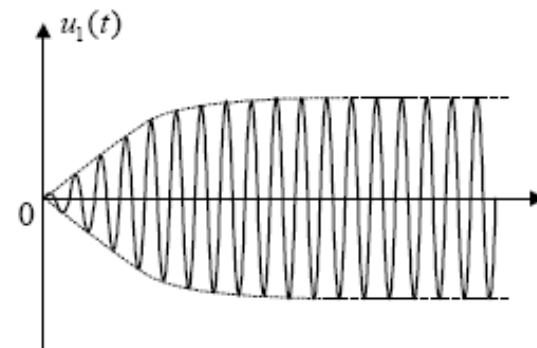
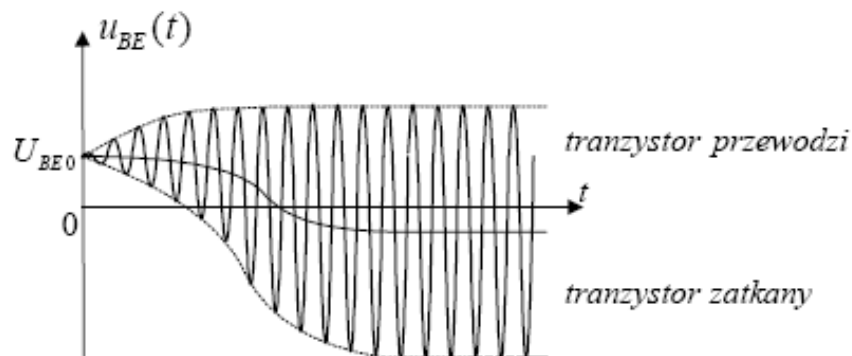
*Wzbudzenie w układzie z automatyczną polaryzacją obw. wej. wzmacniacza*



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 przesuwając punkt pracy wzmacniacza do klasy C.





# Warunki generacji drgań

## *Generatory dwójnikowe (o ujemnej rezystancji)*

Zasada działania generatorów z elementami aktywnymi o ujemnej rezystancji opiera się na ich zdolności odtłumiania stratnych obwodów rezonansowych LC.

Dynamiczna rezystancja (konduktancja) ujemna elementów aktywnych jest wynikiem ich  $ch-yk$  prądowo-napięciowych, które na pewnym odcinku posiadają ujemne nachylenie.

Elementy o ujemnej rezystancji typu:

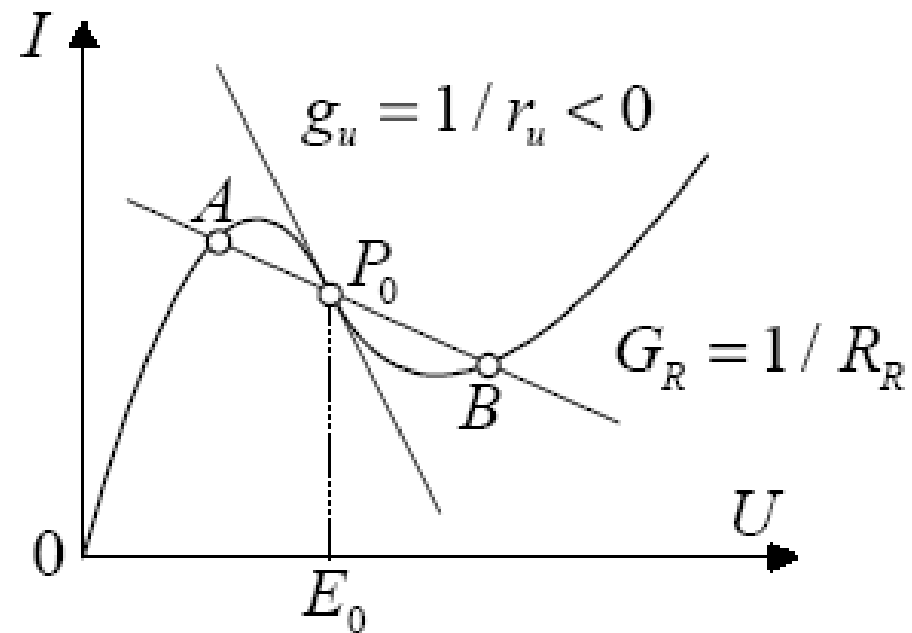
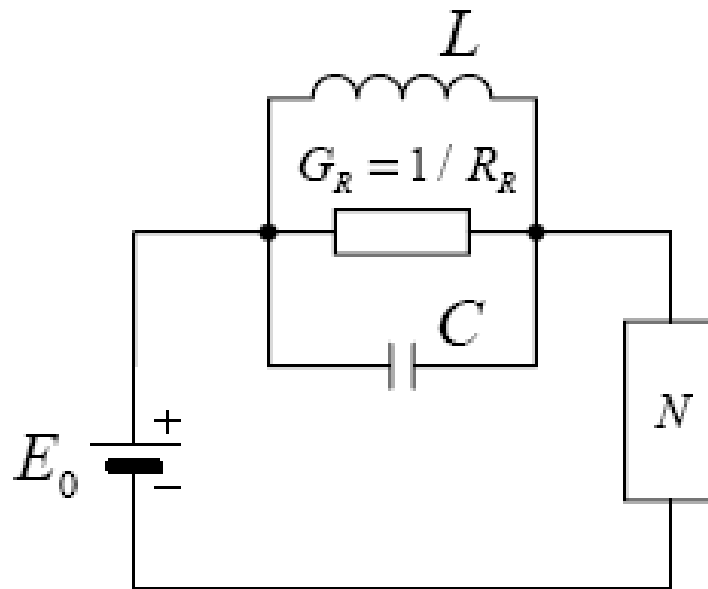
- N (uzależnione napięciowo, np. dioda tunelowa) stosowane do odtłumiania obwodów równoległych,
- S (uzależnione prądowo, np. tranzystor lawinowy, tyrystor) stosowane w obwodach szeregowych.



# Warunki generacji drgań

## *Generatory dwójnikowe (o ujemnej rezystancji)*

Generator LC z obwodem równoległym odtłumianym przez element typu N



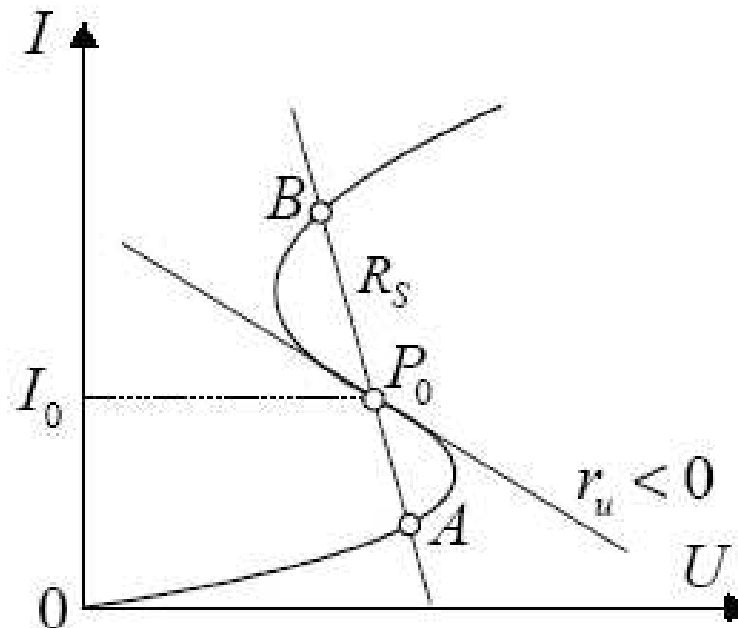
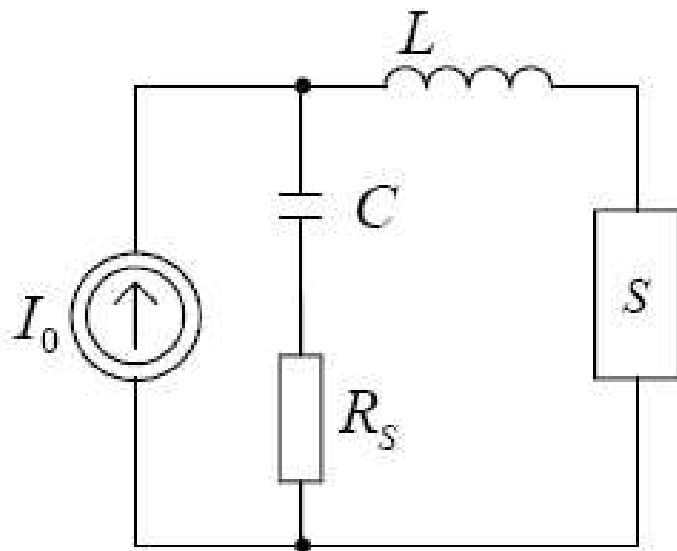
Element typu N tworzy obwód niestabilny gdy jest obciążony małą konduktancją – *element stabilny zwarcioowo*.



# Warunki generacji drgań

## *Generatory dwójnikowe (o ujemnej rezystancji)*

Generator LC z obwodem szeregowym odtłumianym przez element typu S



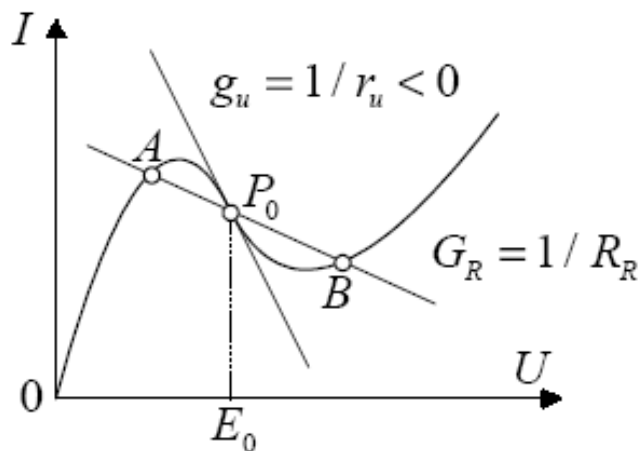
Element typu S tworzy obwód niestabilny gdy jest obciążony małą rezystancją – *element stabilny rozwarciovo*.





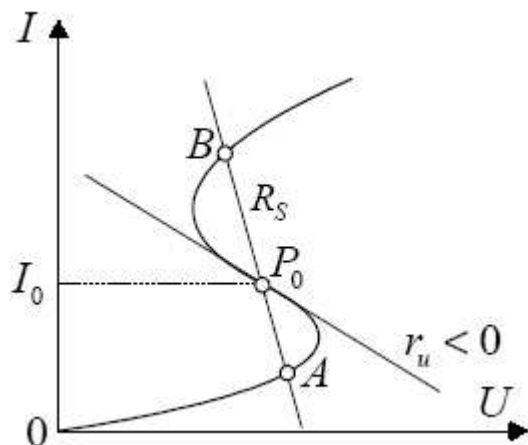
# Warunki generacji drgań

## Generatory dwójnikowe (o ujemnej rezystancji)



Odtłumienie obwodów rezonansowych jest możliwe jeśli w  $P_0$  wyznaczonym przez  $E_0$  lub  $I_0$  wypadkowa konduktancja obwodu równoległego lub rezystancja obwodu szeregowego jest równa 0.

Straty mocy związane z konduktancją obwodu równoległego  $G_R = 1/R_R$  mogą być kompensowane poprzez mniejsze nachylenie odcinka ch-yki  $g_u$  niż nachylenie  $G_R$ .



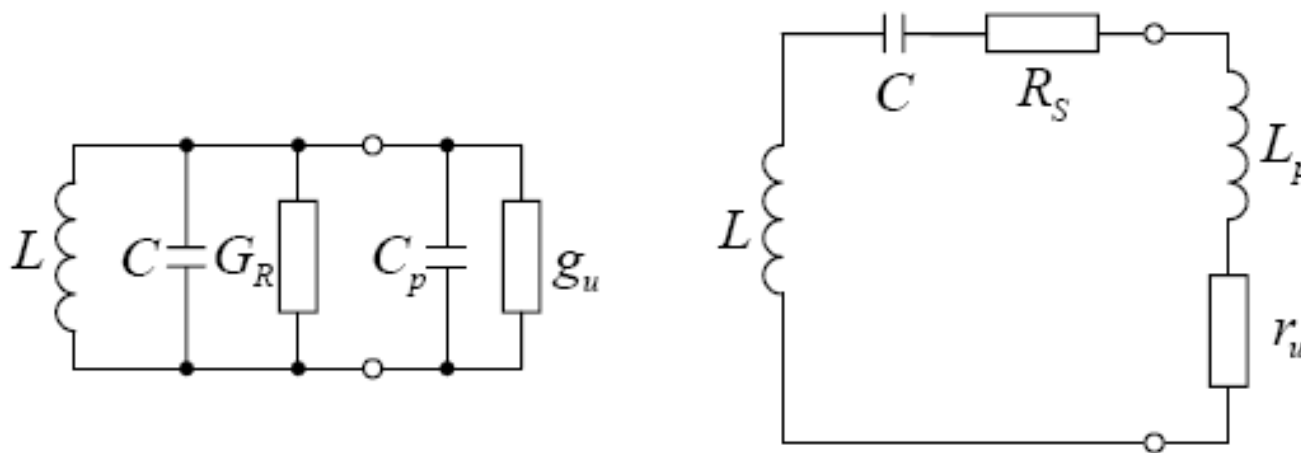
Straty mocy związane z rezystancją obwodu szeregowego  $R_S$  mogą być kompensowane poprzez mniejsze nachylenie odcinka ch-yki  $r_u$  niż nachylenie  $R_S$ .



# Warunki generacji drgań

## *Generatory dwójnikowe (o ujemnej rezystancji)*

W praktyce element typu N zawsze zawiera niewielką pasożytniczą pojemność równoległą  $C_p$ , zaś element typu S niewielką pasożytniczą indukcyjność szeregową  $L_p$ .

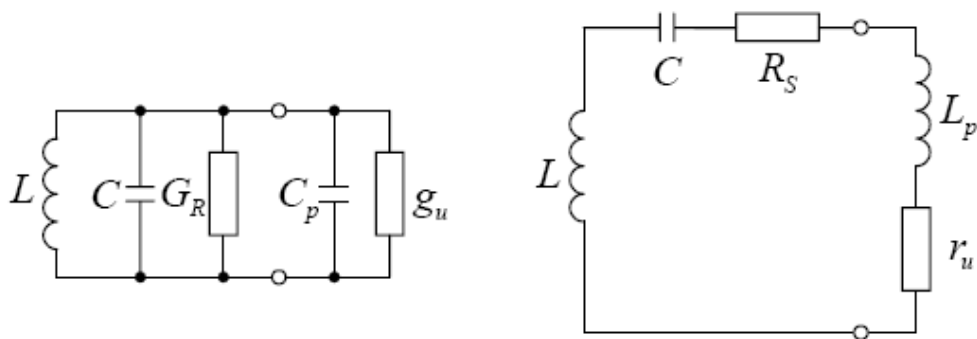


Linearyzowane schematy zastępcze generatorów z elementami o ujemnej rezystancji



# Warunki generacji drgań

## *Generatory dwójnikowe (o ujemnej rezystancji)*



Graniczne warunki generacji dla układu z elementem:

– typu N

$$Y = G_R + g_u + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C + j\omega C_p = 0$$

– typu S

$$Z = R_s + r_u + \frac{1}{j\omega C} + j\omega L + j\omega L_p = 0$$



# Warunki generacji drgań

## *Generatory dwójnikowe (o ujemnej rezystancji)*

**Graniczne warunki amplitudy ( $\text{Re} = 0$ ):**

$$G_R = |g_u| \quad R_S = |r_u|$$

aby drgania były podtrzymane warunek amplitudy powinien być spełniony z nadmiarem:

$$G_R < |g_u| \quad R_S < |r_u|$$

**Graniczne warunki fazy ( $\text{Im} = 0$ ):**

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{L(C + C_p)}}$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{(L + L_p)C}}$$

$\omega_0$  – pulsacja drgań (wzory Thomsona)



# Generatory LC

## *Rodzaje*

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

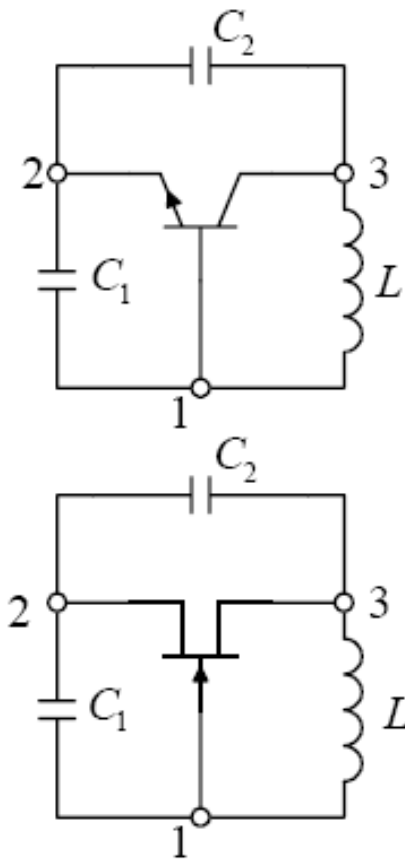
- generator Clappa odmiana Colpittsa,
- generatory kwarcowe (Pierce'a) odmiana Colpittsa i Hartleya.



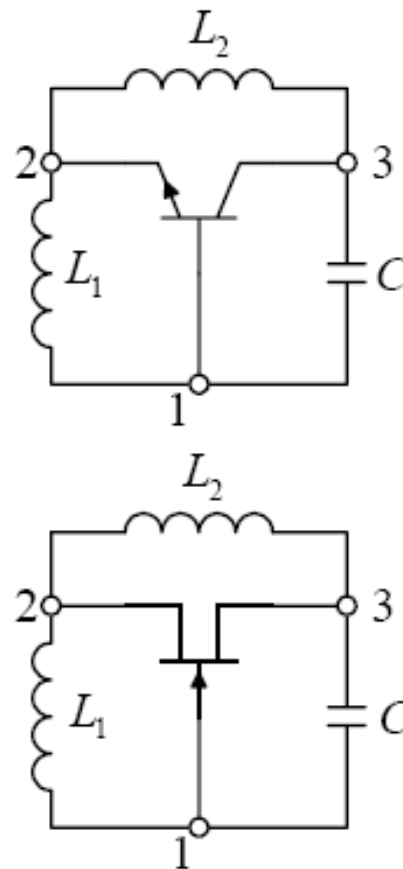
# Generatory LC

## Rodzaje

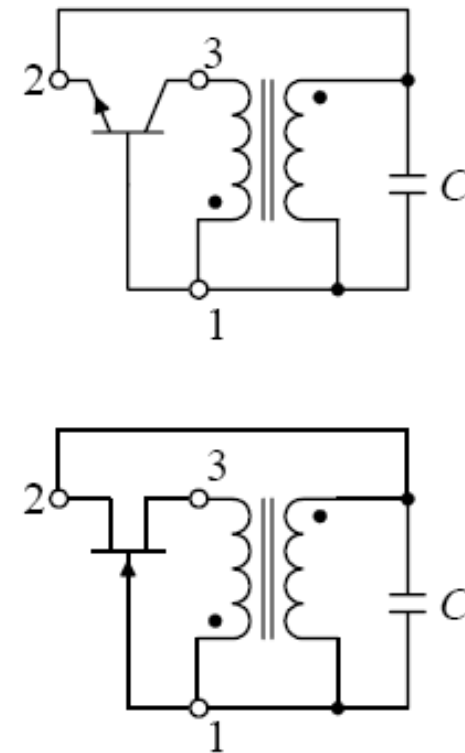
**Generator Colpitssa**



**Generator Hartleya**



**Generator Meissnera**



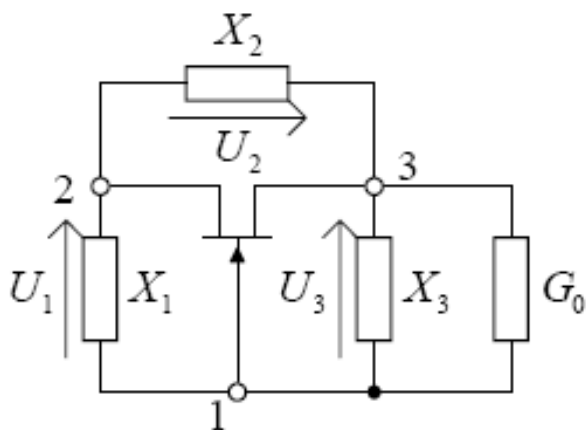
gdy węzeł 1 uziemiony – konfiguracja OB. Lub OG; gdy węzeł 2 uziemiony – konfiguracja OE lub OS



# Generatory LC

## Warunki generacji w generatorach „trójpunktowych” – 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 w generatorach „trójpunktowych” – 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  $X_1 \ll r_{wej}$ .

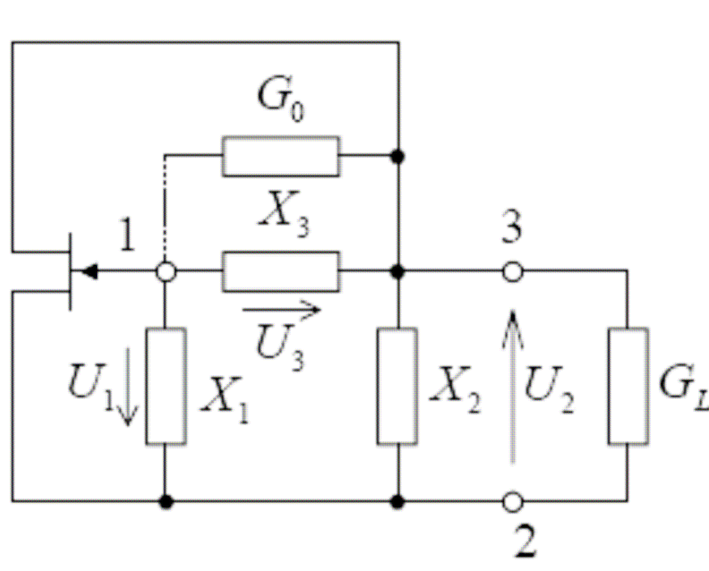




# Generatory LC

## *Warunki generacji w generatorach „trójpunktowych” – OS*

Układ 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:

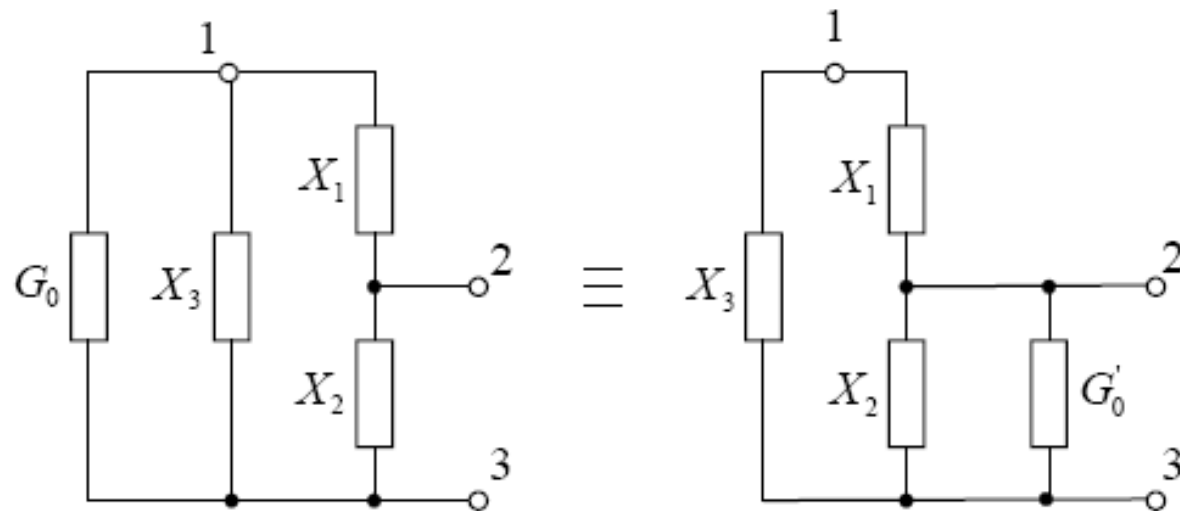
$$X_1 + X_2 + X_3 = 0$$



# Generatory LC

## *Warunki generacji w generatorach „trójpunktowych” – 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 w generatorach „trójpunktowych” – 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 w generatorach „trójpunktowych” – 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

## *Generatory Colpittsa i Hartleya – warunki generacji*

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:

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

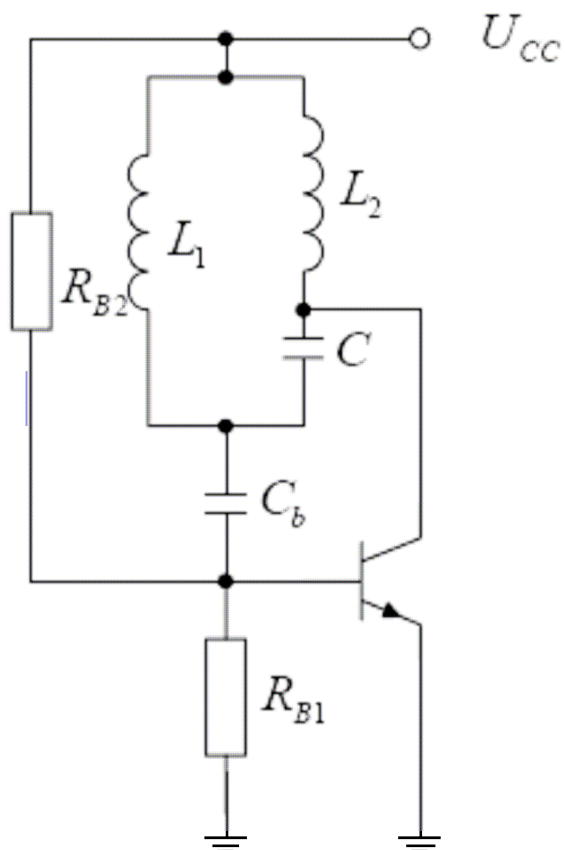
– fazy:

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



# Generatory LC

## *Generator Hartleya – zasilanie szeregowe*



Składowa stała  $I_C$  płynie przez cewkę obwodu rezonansowego.

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

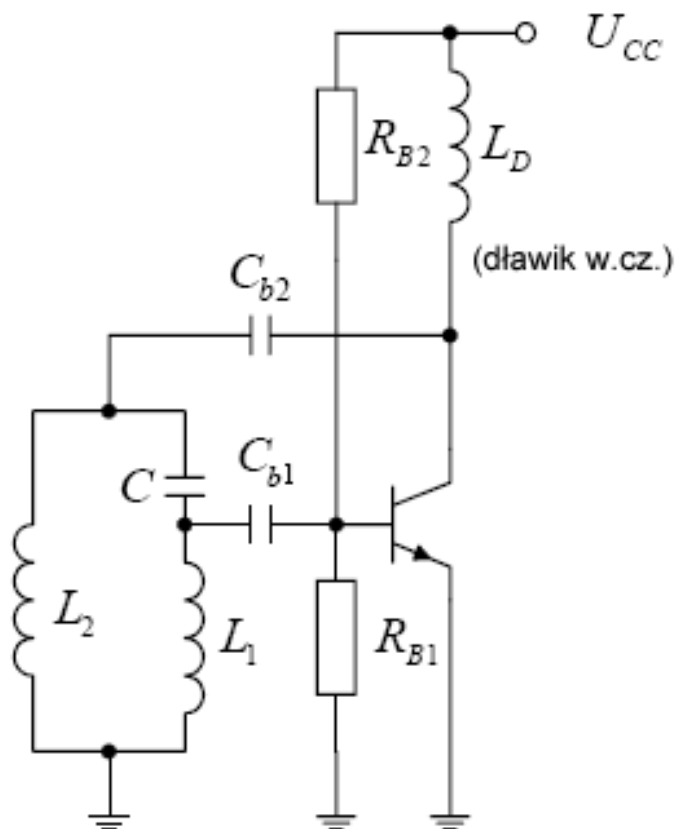
Na  $C_b$  po wytworzeniu się drgań pojawia się dodatkowe napięcie przesuwające stopniowo pkt pracy tranzystora do pracy w klasie AB, B lub C.

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



# Generatory LC

## *Generator Hartleya – zasilanie równoległe*



Składowa stała  $I_C$  płynie przez dławik w.cz. i nie płynie przez obwód rezonansowy.

Obwód rezonansowy połączony jest poprzez  $C_{b1}$  do bazy zaś poprzez  $C_{b2}$  do kolektora tranzystora.

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

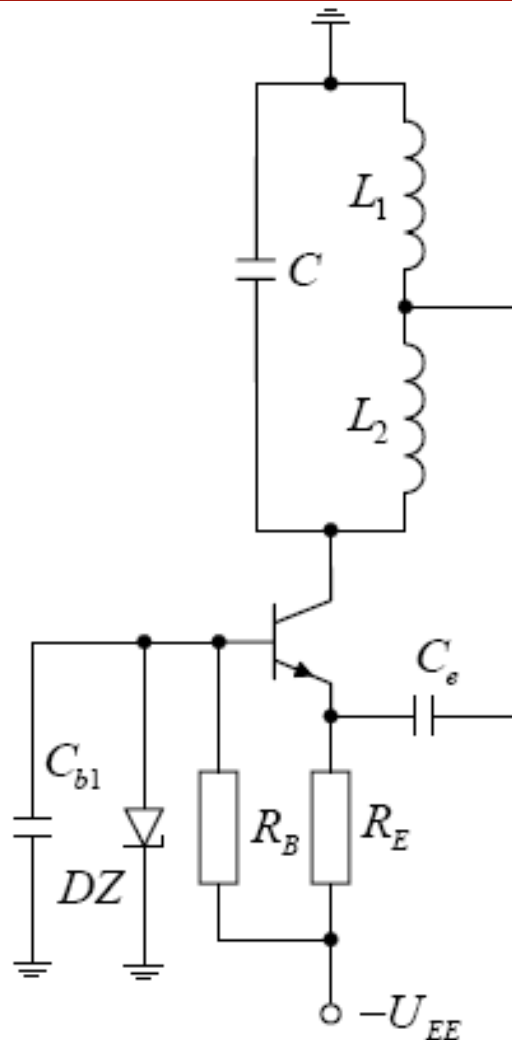
W układzie również występują małe straty mocy w obwodzie zasilania.

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



# Generatory LC

## *Generator Hartleya – zasilanie od strony emitery*



Baza uziemiona dla składowej zmiennej – układ OB.

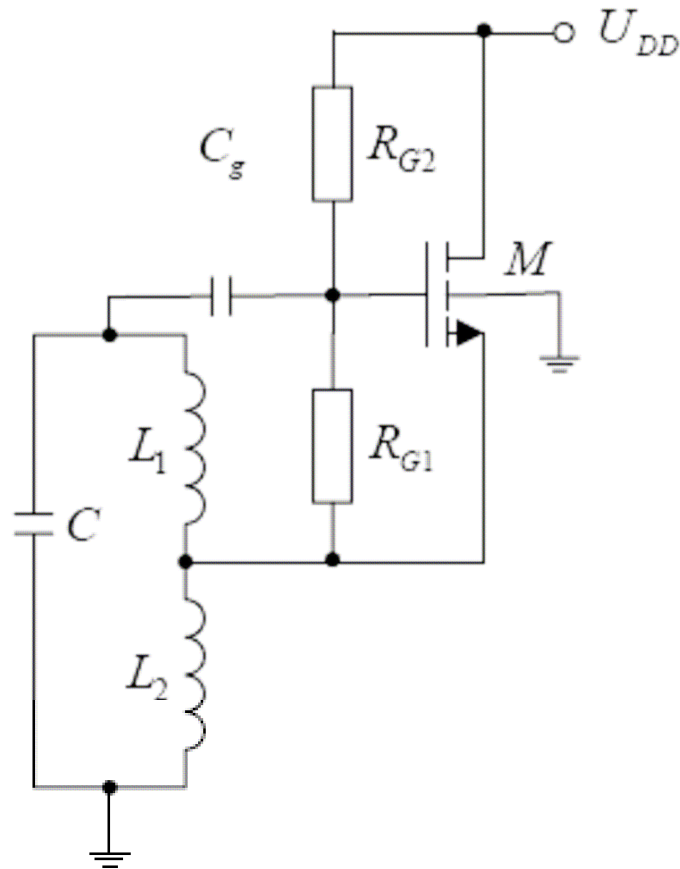
Układ stosowany w generatorach małej mocy.





# Generatory LC

## *Generator Hartleya – zasilanie szeregowe z tranzystorem MOSFET*



$R_{G1}$ ,  $R_{G2}$  zapewniają wstępną polaryzację bramki tranzystora.

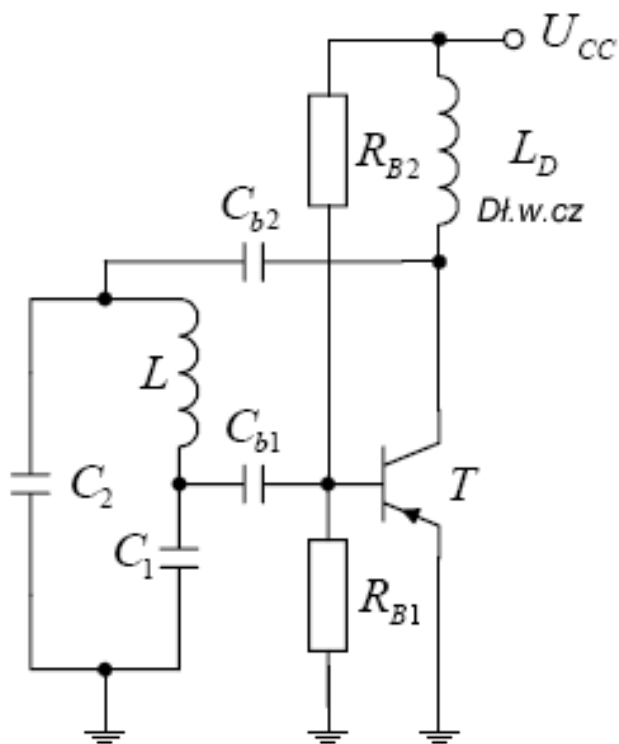
Obwód rezonansowy włączony szeregowo ze źródłem tranzystora – szeregowe sprzężenie źródłowe.

Podobnie jak dla układu z tranzystorem bipolarnym nie ma elementu separującego prąd w.c.z. W obwodzie wyjściowym tranzystora od zasilacza – wada tego układu.



# Generatory LC

## *Generator Colpittsa – zasilanie równoległe*



Składowa stała  $I_C$  płynie przez dławik w.cz. i nie płynie przez obwód rezonansowy.

Obwód rezonansowy połączony jest poprzez  $C_{b1}$  do bazy zaś poprzez  $C_{b2}$  do kolektora tranzystora.

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

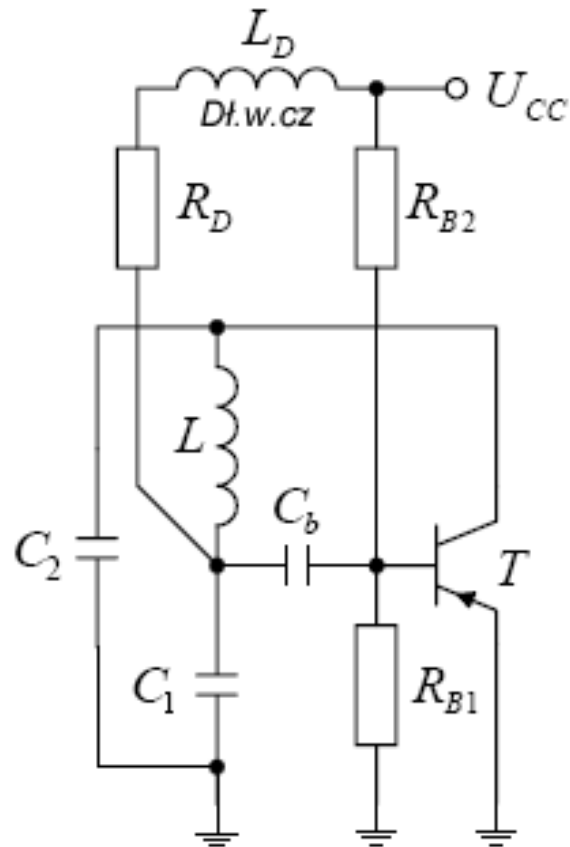
W układzie również występują małe straty mocy w obwodzie zasilania.

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



# Generatory LC

## *Generator Colpittsa – zasilanie równoległe - modyfikacja*

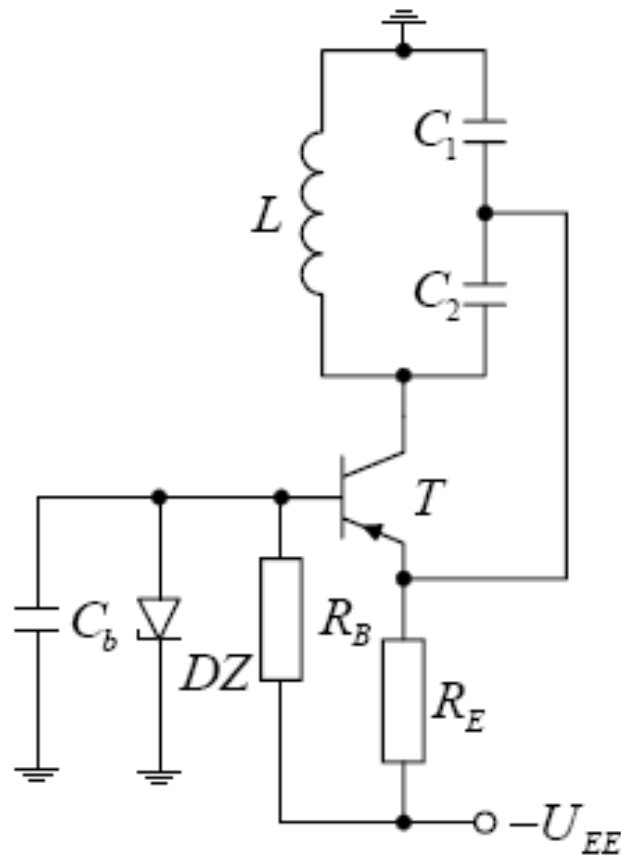


Dławik bocznikuje nie cały obwód rezonansowy a tylko jego niskoimpedancyjna część ( $C_1 \gg C_2$ ).  
Dzięki temu w znacznym stopniu zmniejsza się tłumiące działanie na obwód rezonansowy.



# Generatory LC

## *Generator Colpittsa – zasilanie od strony emitera*



Baza uziemiona dla składowej zmiennej – układ OB.

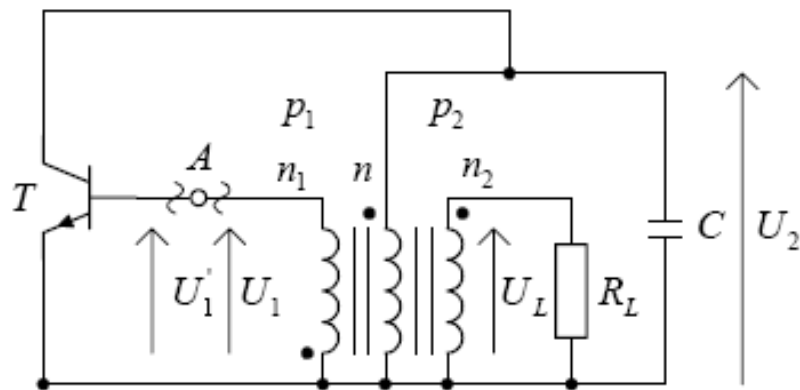
Układ stosowany w generatorach małej mocy.



# Generatory LC

## Generator Meissnera – warunki generacji

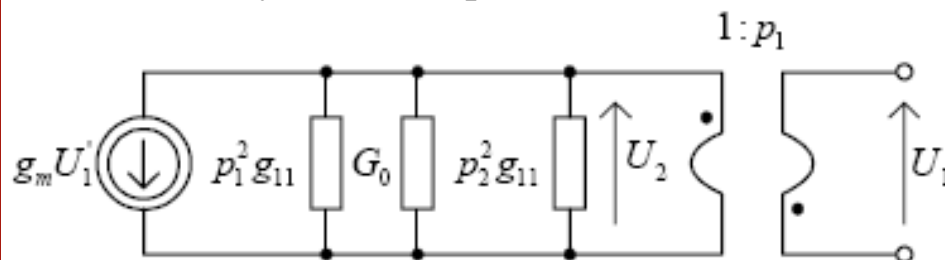
Schemat zmiennoprądowy



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

$n$  – liczba uzwojeń

Model liniowy z rozciętą pętlą SZ



Sprzężenie 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:

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

można zastąpić konduktancją dynamiczną  $G_0$

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

$Q$  – dobroć układu



# Generatory LC

## *Generator Meissnera – warunki generacji*

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

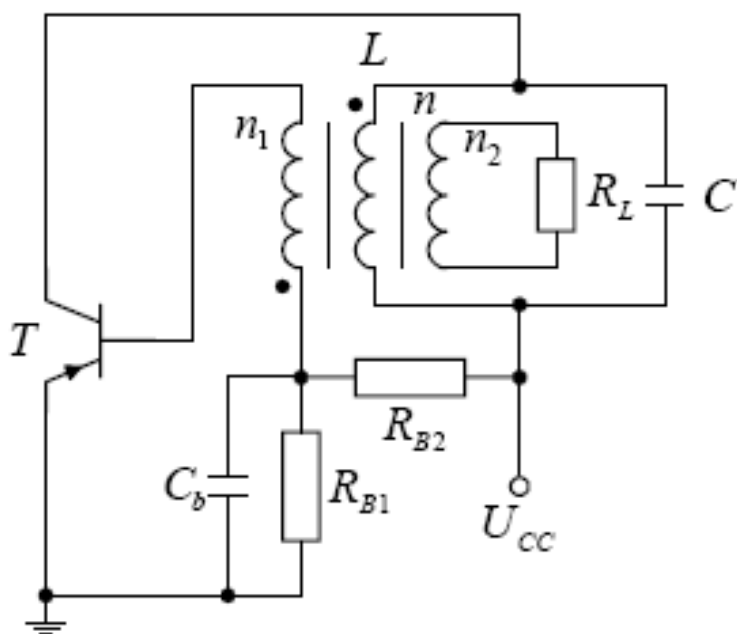
$$k_u(\omega_0)\beta_u(\omega_0) = \left( \frac{-g_m}{g_{ds} + p_1^2 g_{11} + p_2^2 G_L} \right) (-p_1) = 1$$

Z tego warunku wyznaczamy przekładnię transformatora.



# Generatory LC

## *Generator Meissnera – zasilanie szeregowe*



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

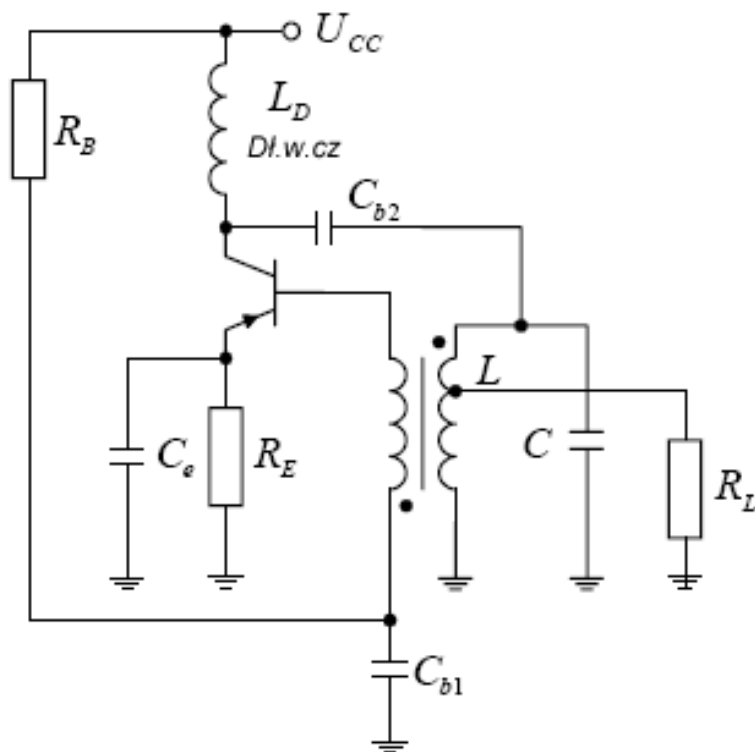
Gdy narasta amplituda drgań na  $C_b$  stopniowo narasta ujemne napięcie (ładowanie impulsami  $I_B$ ). Dzięki temu generator wzbudza się miękko (klasa A) a w miarę narastania amplitudy drgań jego pkt. Pracy przesuwa się do klasy AB, B lub C.

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



# Generatory LC

## *Generator Meissnera – zasilanie równoległe*



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

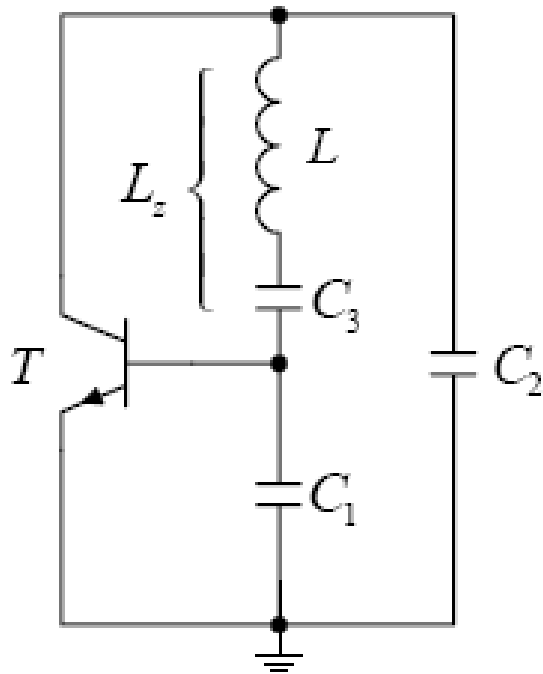
$C_{b2}$  sprzęga obwód rezonansowy z kolektorem tranzystora.





# Generatory LC

## *Generator Clappa – odmiana Colpittsa*



Układ generuje jedynie dla częstotliwości większych od częstotliwości rezonansu szeregowego obwodu  $L, C_3$ .

W tym zakresie  $f$  obwód może pełnić rolę indukcyjności zastępczej o wartości silnie rosnącej ze wzrostem  $f$  drgań.

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

Jeżeli  $C_1$  i  $C_2$  są tak dobrane, że są wyraźnie większe od  $C_3$  (kilkakrotnie większe) a wypadkowa pojemność obwodu wynikająca z szeregowego połączenia  $C_1, C_2$  i  $C_3$  niewiele mniejsza od  $C_3$  to układ generuje drgania o  $f$  nieznacznie większej od  $f$  rezonansu szeregowego  $L, C_3$ .

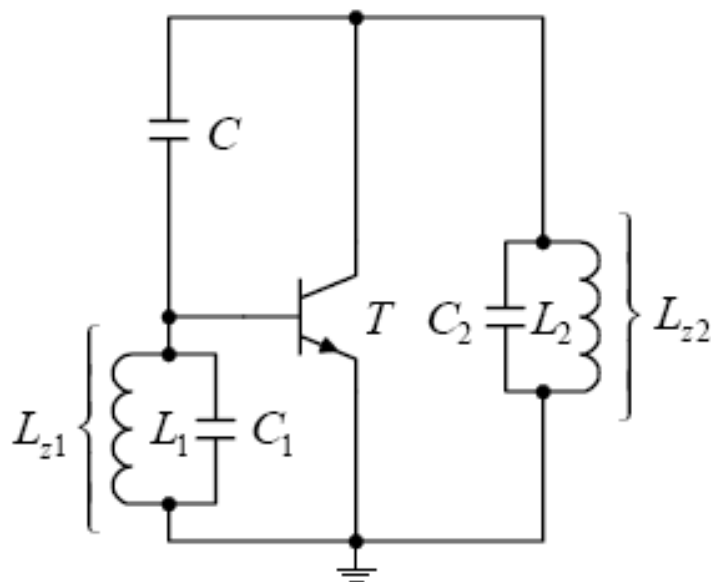
W układzie tym  $C_1, C_2, L$  mogą być znacznie większe niż odpowiedniki w układzie Colpittsa.

Istotna zaleta 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 pasożytniczymi układu.



# Generatory LC

## *Generator Kühna-Hutha – odmiana Hartleya*

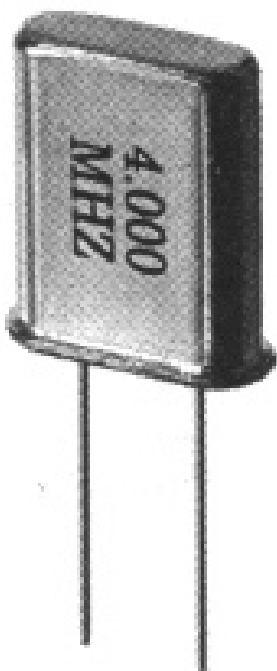


Funkcje indukcyjności zastępczych  $L_{z1}$  i  $L_{z2}$  spełniają odpowiednio obwody  $L_1, C_1$  i  $L_2, C_2$ .



# 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).

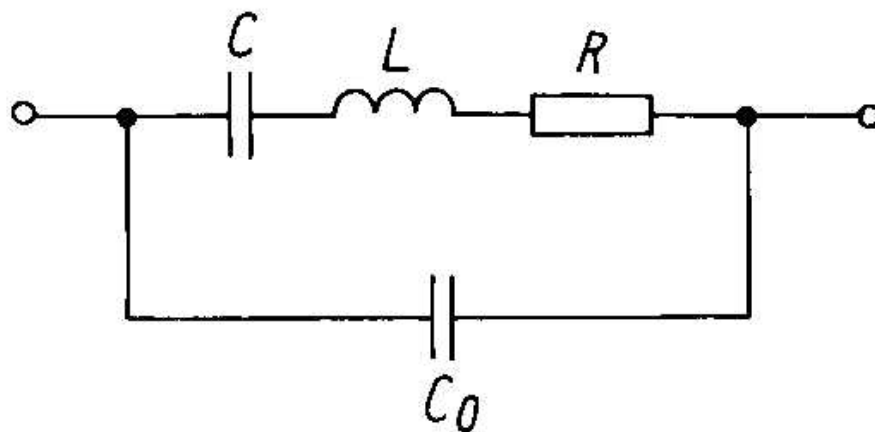
Jeżeli od elektrod przyłożone zostanie napięcie zmienne (sinus) to w elemencie piezoelektrycznym (kwarc) wytworzy się zmienne pole elektryczne. W wyniku zjawiska piezoelektrycznego wibrator zaczyna drgać, co prowadzi do pojawienia się na jego powierzchni zmiennych ładunków elektrycznych (płynie prąd).

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 <sub>0</sub> [pF]	6	6	5	5	3,5	3	5	4



# Generatory kwarcowe

## *Rezonator kwarcowy – rodzaje rezonansów*

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

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

Impedancja rezonatora:

$$Z_K = \frac{j}{\omega} \cdot \frac{\omega^2 LC - 1}{C_0 + C - \omega^2 LCC_0}$$

W układzie rezonatora mogą występować dwa rodzaje rezonansu:

$\Rightarrow$  szeregowy ( $Z_K = 0$ )

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

$\Rightarrow$  równoległy ( $Z_K = \infty$ )

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

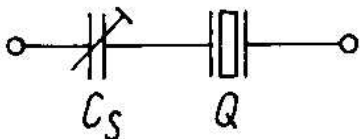
$f_s$  zależy tylko od parametrów kwarcu natomiast  $f_R$  również od  $C_0$  związanej z pojemnościami montażowymi. W związku z tym rezonans równoległy jest mniej stabilny.



# Generatory kwarcowe

## *Rezonator kwarcowy – 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

## *Rodzaje*

Zastosowanie rezonatora kwarcowego w układach generacyjnych wynika z charakteru zmian jego impedancji w funkcji częstotliwości. Możliwe są dwie grupy układowe generatorów kwarcowych:

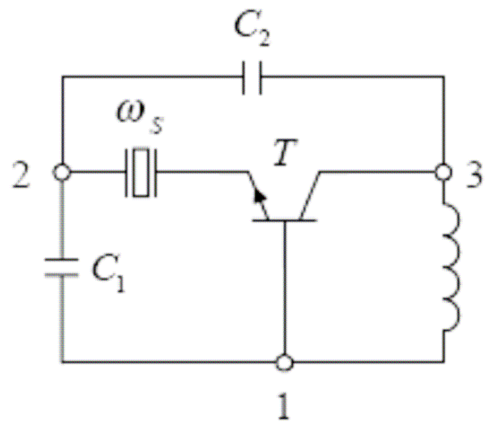
⇒ generatory, w których rezonator wykorzystywany jest jako selektywny element sprzęgający o małej rezystancji (praca przy rezonansie szeregowym) – generatory Butlera,

⇒ generatory, w których kwarc pracuje jako zastępcza indukcyjność, o wartości szybko rosnącej z częstotliwością (praca w przedziale częstotliwości pomiędzy rezonansem szeregowym a równoległym) – generatory Pierce’a

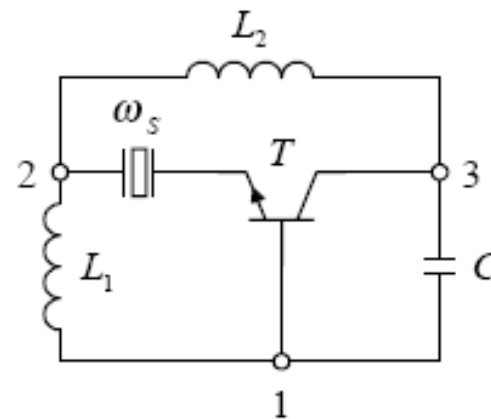


# Generatory kwarcowe

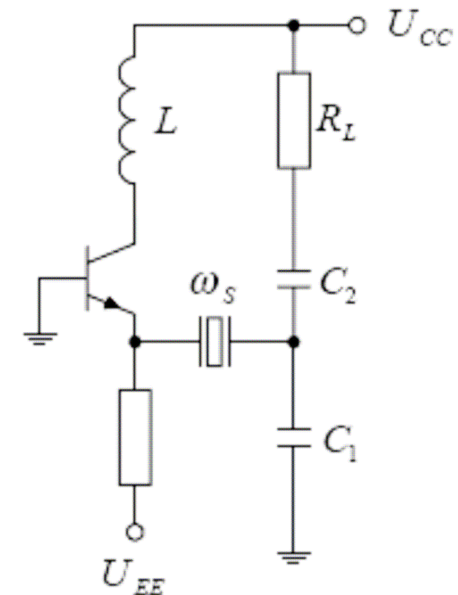
## Generatory Bultera



z czwórnikiem sprzęgającym  
Colpittsa



z czwórnikiem sprzęgającym  
Hartleya



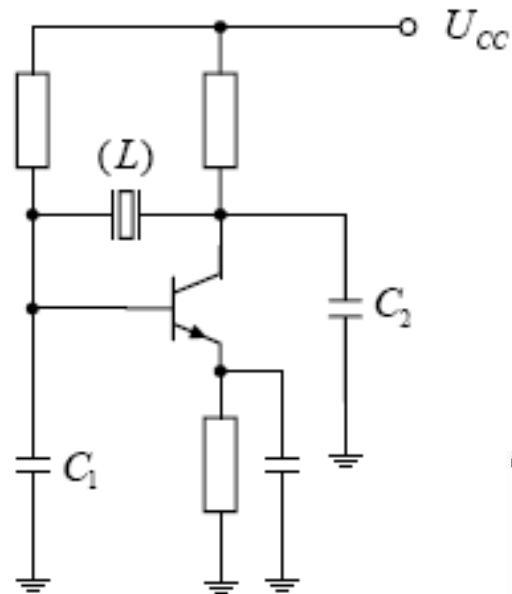
praktyczna realizacja z czwórnikiem  
sprzęgającym Colpittsa



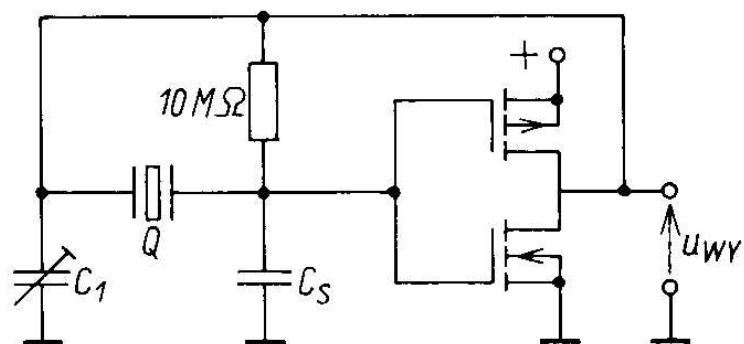


# Generatory kwarcowe

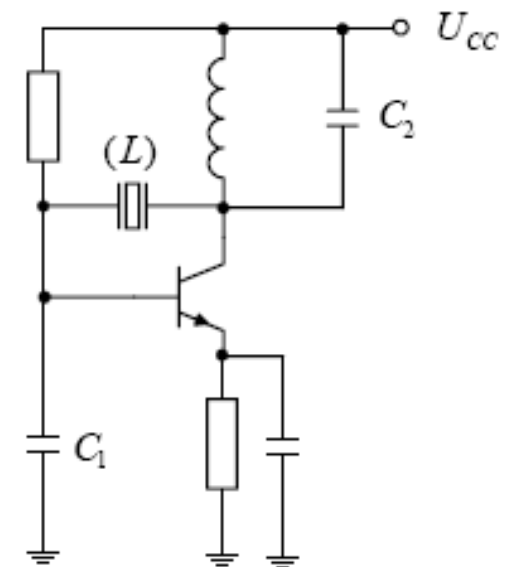
## Generatory Pierce'a



Colpittsa-Pierce'a  
z dwoma pojemnościami



Colpittsa-Pierce'a  
z inwerterem CMOS pracującym  
jako wzmacniacz

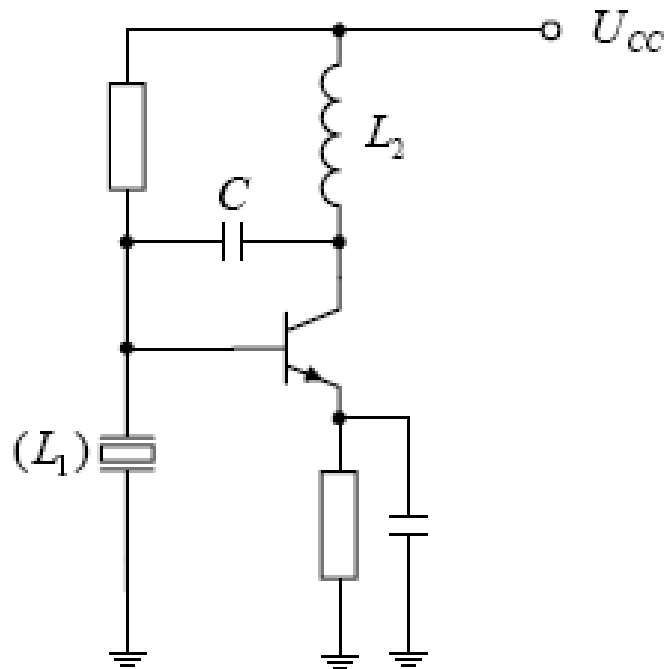


Colpittsa-Pierce'a  
z obwodem rezonansowym

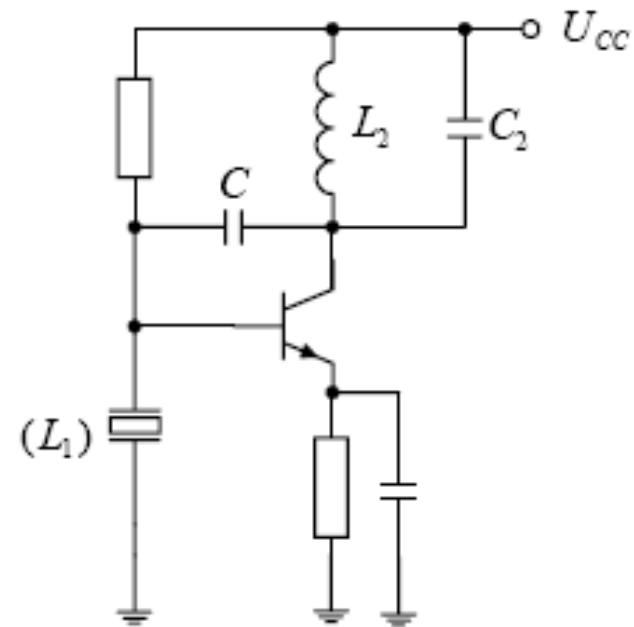


# Generatory kwarcowe

## *Generatory Pierce'a*



Hartleya-Pierce'a  
z indukcyjnością



Hartleys-Pierce'a z obwodem  
rezonansowym



# Generatory RC

## *Wprowadzenie*

Generatory RC stosuje się do pracy w zakresie małych częstotliwości (kilka Hz do 10 MHz). 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.

W generatorach RC stosowane są struktury selektywne (mostek Wiena, podwójne T, bocznikowane T, itp.) oraz przesuwniki fazowe RC.

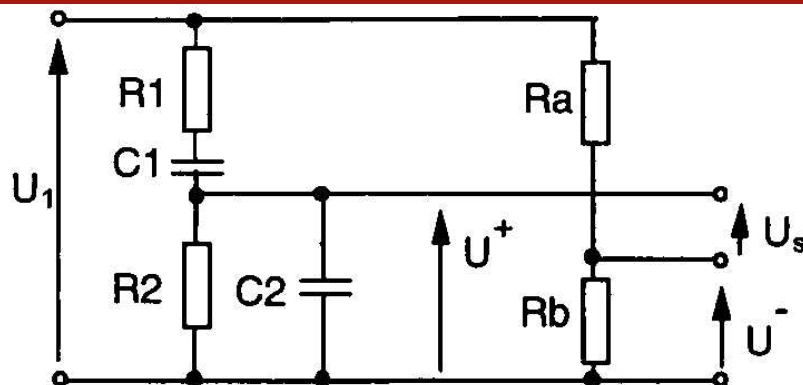
W porównaniu z generatorami LC mają gorszą stałość częstotliwości  $[\pm(10^{-2} - 10^{-3})]$ , jednakże generują sygnał o bardzo małych zniekształceniach i umożliwiają przestrajanie  $f$  w zakresie 1:10 na jednym podzakresie.

Generatory RC powszechnie stosowane są jako generatory serwisowe i laboratoryjne.



# Generatory RC

## Selektywne czwórniki RC – mostek Wiena



gdzie:  $\nu = \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}$  - odstrojenie,

$\omega_0^2 = \frac{1}{C_1 R_1 C_2 R_2}$  - pulsacja, przy której  $|\beta^+|$ , osiąga maksimum  $\beta_0^+$ ,

$\beta_0^+ = \frac{1}{1 + \frac{C_2}{C_1} + \frac{R_1}{R_2}}$  - maksimum modułu transmitancji  $\beta^+$ ,

$Q^+ = \beta_0^+ \sqrt{\frac{C_2 R_1}{C_1 R_2}}$  - dobroć gałęzi  $\beta^+$ .

Najczęściej stosowana struktura selektywna.

W mostku wyróżniamy:

⇒ gałąź selektywną  $\beta^+$  ( $R_1, C_1, R_2, C_2$ ),

⇒ gałąź aperiodyczną  $\beta^-$  ( $R_a, R_b$ ).

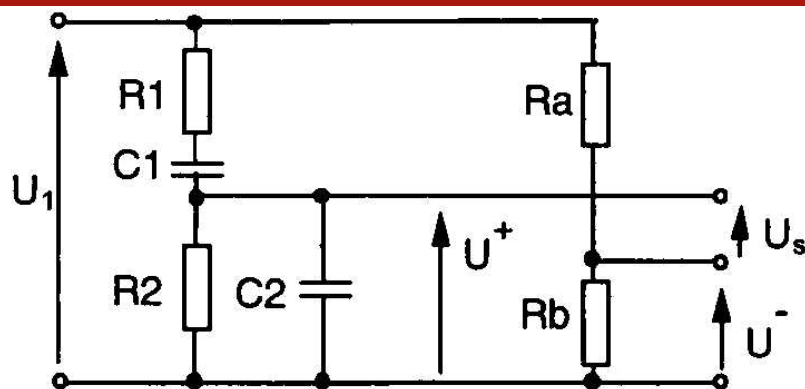
Transmitancja gałęzi selektywnej:

$$\beta^+ = \frac{U^+}{U^-} = \frac{\beta_0^+}{1 + jQ^+ \nu}$$



# Generatory RC

## *Selektywne czwórniki RC – mostek Wiena*



Transmitancja gałęzi aperiodycznej:

$$\beta^- = \frac{U^-}{U_1} = \frac{R_b}{R_a + R_b}$$

napięcie wyjściowe na przekątnej mostka:

$$U_s = U^+ - U^- = \beta^+ U_1 - \beta^- U_1 = (\beta^+ - \beta^-) U_1 = \beta U_1$$

gdzie:  $\beta = \frac{U_s}{U_1}$  - transmitancja mostka.



# Generatory RC

## *Selektywne czwórniki RC – mostek Wiena*

W praktyce najczęściej:  $C_1 = C_2 = C$        $R_1 = R_2 = R$        $R_a = 2R_b + \varepsilon$

$\varepsilon \ll 1$       współczynnik niezrównoważenia mostka dla pulsacji  $\omega_0$

co oznacza, że:  $\omega_0 = \frac{1}{CR}$        $\beta_0^+ = \frac{1}{3}$        $\beta_0 = \frac{\varepsilon}{9}$        $Q^+ = \frac{1}{3}$        $R_a = (2 + \varepsilon)R_b$

$Q = \frac{1}{\varepsilon} = \frac{1}{9|\beta_0|}$       dobroć mostka

Dla tych założeń transmitancje gałęzi określone są zależnościami:

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

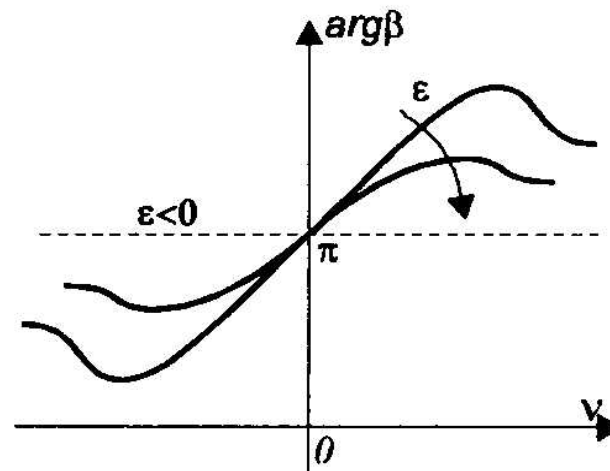
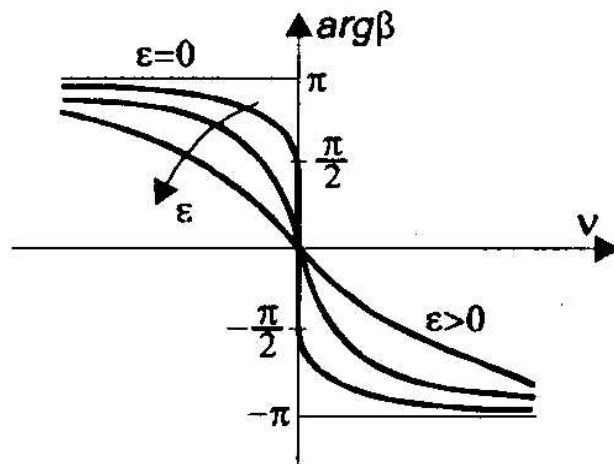
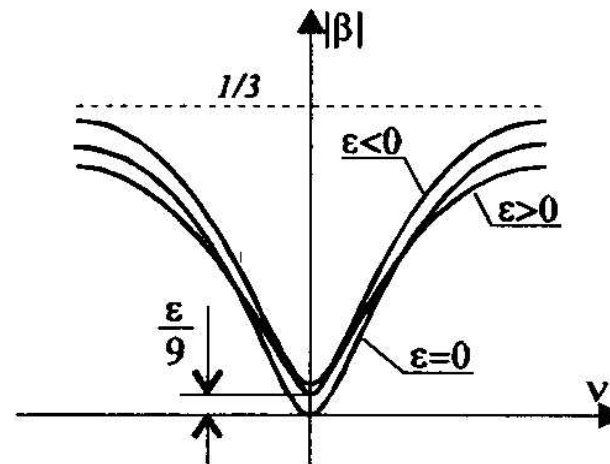
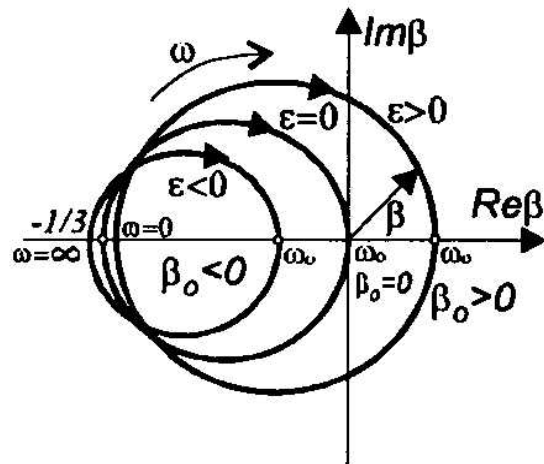
$$\beta^- = \frac{1}{3 + \varepsilon}$$

$$\beta = \frac{U_s}{U_1} = \beta^+ - \beta^- = \frac{1}{3 + j\nu} - \frac{1}{3 + \varepsilon} \approx \beta_0 \left( 1 - j \frac{\nu}{\varepsilon} \right)$$



# Generatory RC

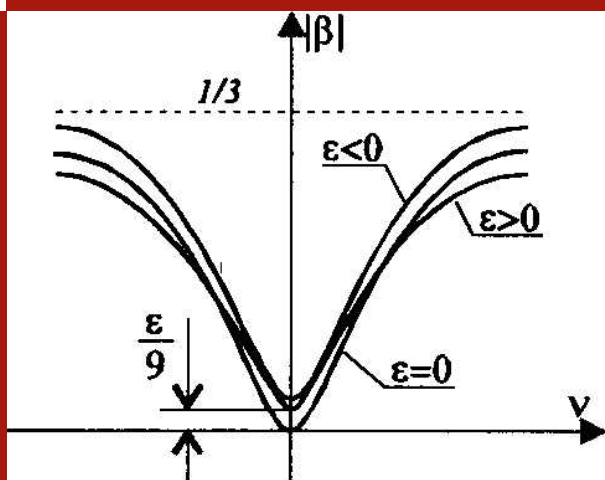
*Selektywne czwórniki RC – mostek Wiena – ch-yki transmitancji*





# Generatory RC

## *Selektywne czwórniki RC – mostek Wiena*



Selektywny zaporowy charakter, wynika z przebiegu  $|\beta^+|$   
 $|\beta^-|$  nie zależy od częstotliwości

Fazy  $\beta$  i  $\beta^+$  są zgodne (przy  $\varepsilon \geq 0$  mostek nie odwraca fazy i warunek fazy jest spełniony dla  $\omega_0$  niezależnie od stopnia nieźrównoważenia mostka). Z warunku generacji otrzymamy pulsacje drgań generatora:

$$\omega_0 = \frac{1}{CR}$$

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

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

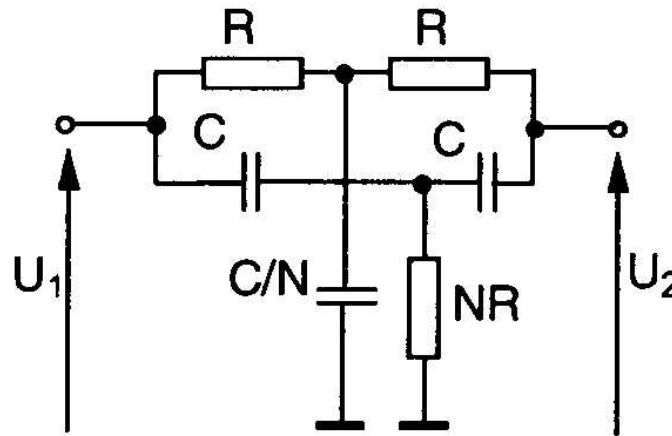
Rezystory  $R_a$   $R_b$  pracują w pętli automatycznej regulacji wzmocnienia (ARW).





# Generatory RC

## *Selektywne czwórniki RC – mostek podwójne T*



Transmitancja mostka:

$$\beta_u(\nu) = \beta^+ = \frac{U_2}{U_1} = \frac{(2N-1) + j\nu}{\left(2N + 1 + \frac{1}{N}\right) + j\nu}$$

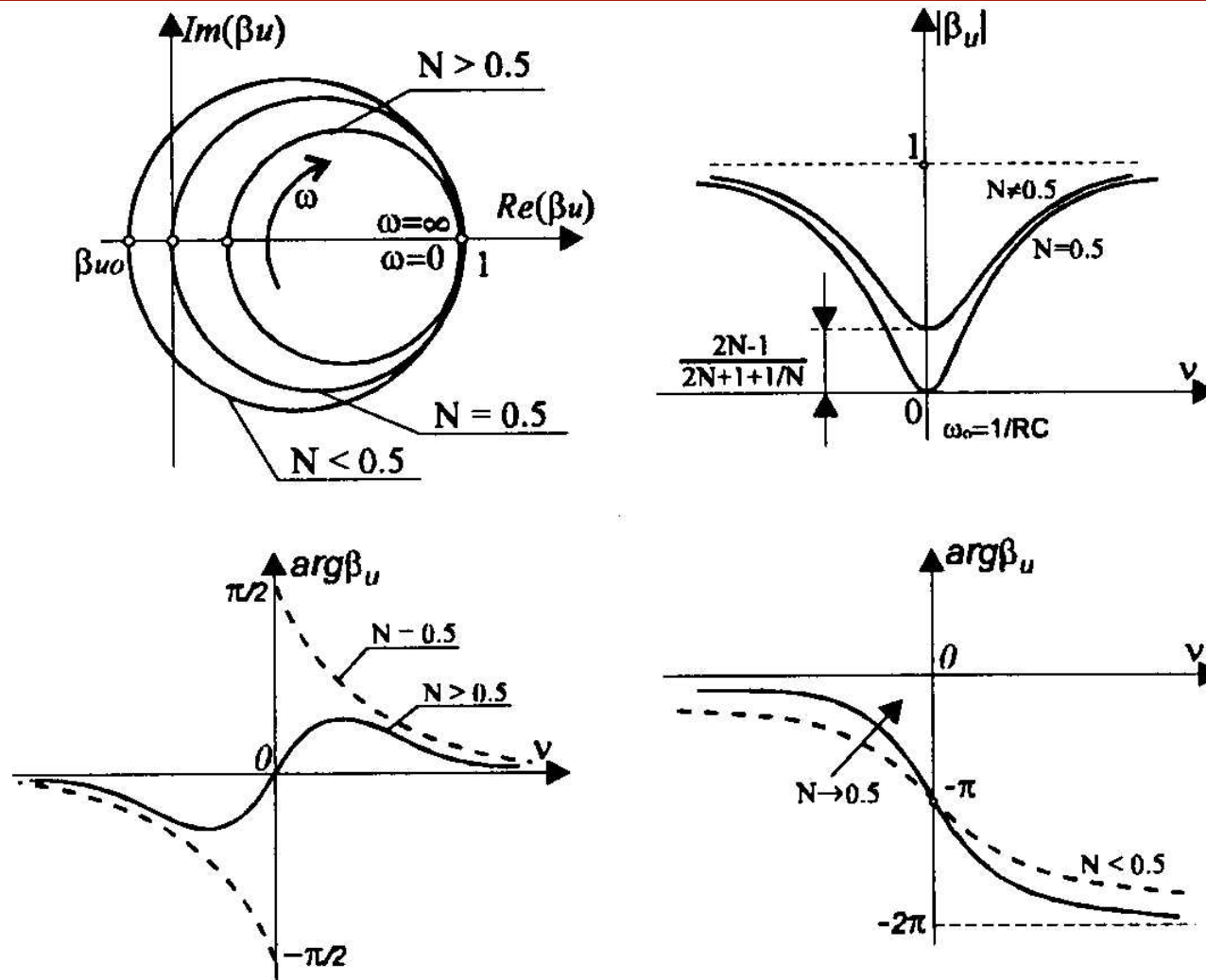
gdzie:

$$\nu = \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \qquad \omega_0 = \frac{1}{RC}$$



# Generatory RC

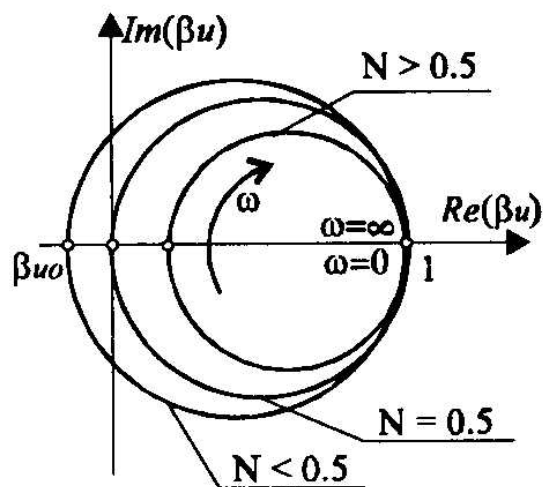
*Selektywne czwórniki RC – mostek podwójne T – ch-yki transmitancji*





# Generatory RC

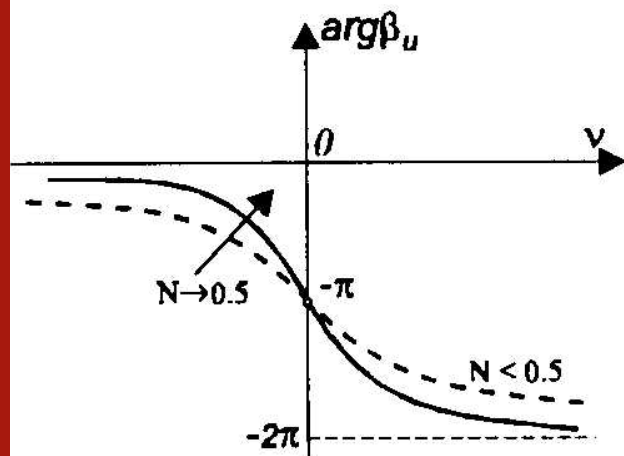
## *Selektywne czwórniki RC – mostek podwójne T – ch-yki transmitancji*



Układ przydatny tylko dla  $N < 0,5$ .

Stopień zrównoważenia mostka zależy od wartości  $N$ .

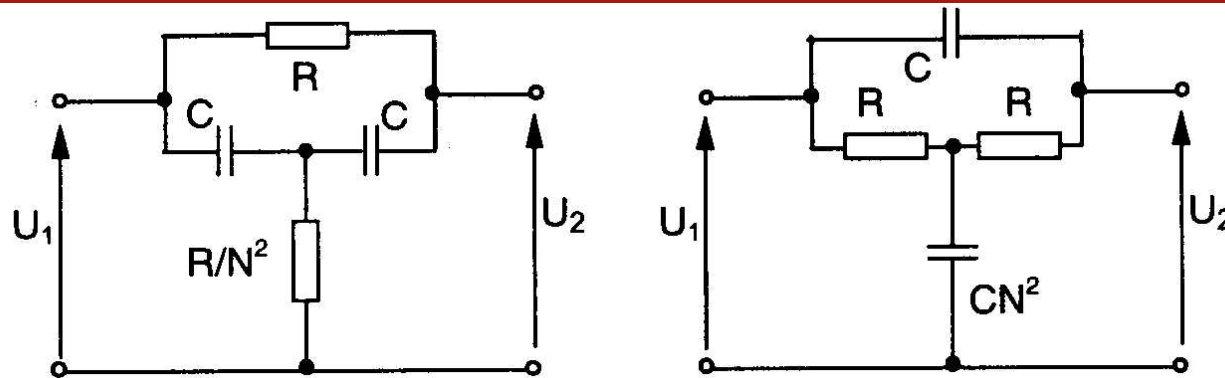
Dla  $N < 0,5$  czwórnik odwraca fazę o  $180^\circ$ , natomiast dla  $N = 0$  mostek nie odwraca fazy (mostek zerowy).



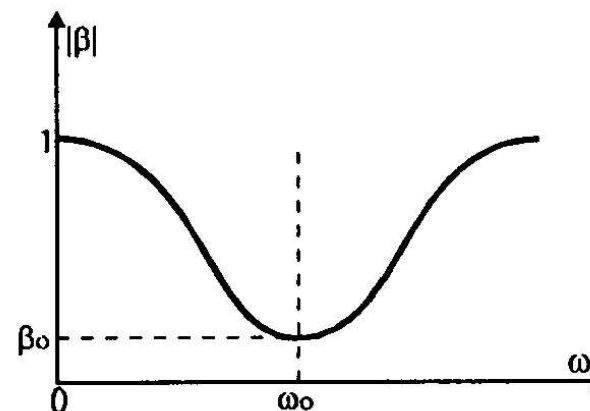
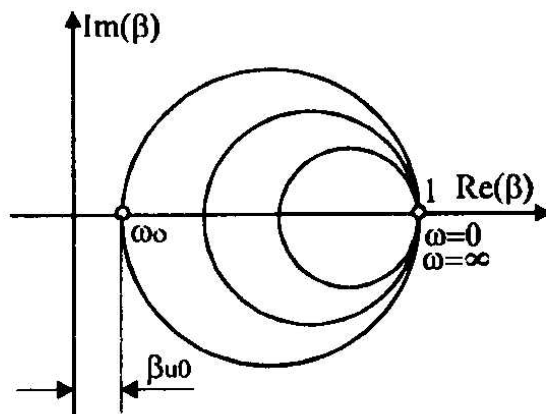


# Generatory RC

## *Selektywne czwórniki RC – mostek bocznikowane T*



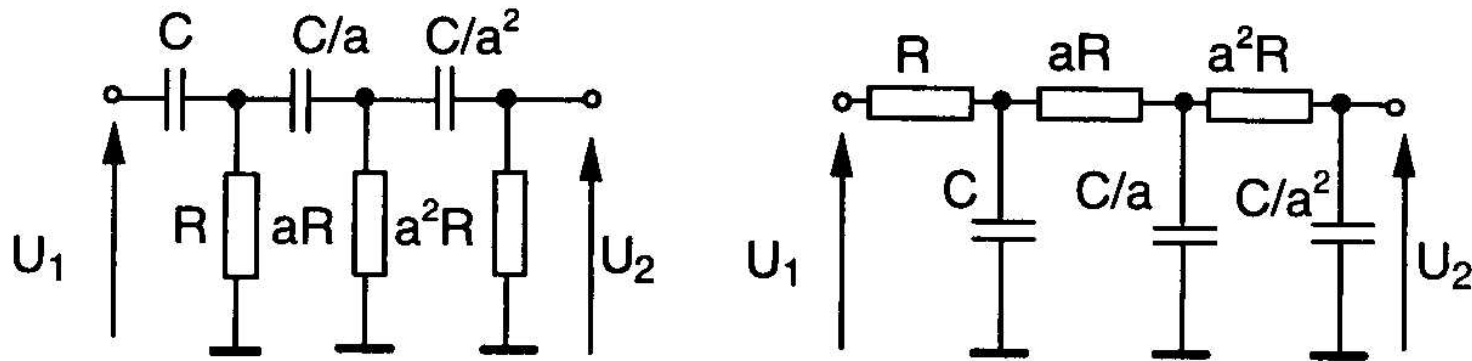
Transmitancja mostka ma analogiczny przebieg jak w układzie podwójne T. Minimum modułu transmitancji występuje dla :  $\omega_0 = \frac{N}{RC}$ . Mostek nie przesuwą fazy zatem musi współpracować ze wzmacniaczem dającym przesunięcie o  $180^\circ$ .





# Generatory RC

## Przesuwniki fazowe



Jako przesuwники fazowe stosuje się łańcuchowe układy złożone z ogniw  $\Gamma$  typu CR lub RC.

Przesuwniki CR mają charakterystykę górnoprzepustową, a przesuwniki RC dolnoprzepustową.

Struktur przesuwników nie wykazują właściwości selektywnych, jednakże przesuwają fazę co umożliwia ich stosowanie w pętli  $\beta^+$ .

Pojedynczy człon CR daje przesunięcie równe:  $\varphi = \arctg\left(\frac{1}{\omega RC}\right)$

człon RC natomiast:  $\varphi = -\arctg(\omega RC)$

Najczęściej stosuje się przesuwniki złożone z 3 lub 4 ogniw  $\Gamma$  i elementach dobranych tak by odwrócić fazę o  $180^\circ$ .



# Generatory RC

## *Struktury generatorów*

Generator RC składa się w ogólnym przypadku ze wzmacniacza o wzmocnieniu:

$$|k_u|e^{j\psi}$$

oraz czwórnika RC o transmitancji

$$|\beta|e^{j\varphi}$$

Człon RC zapewnia selektywne +SZ spełniające warunki generacji:

⇒ amplitudy

$$k_u \beta = 1$$

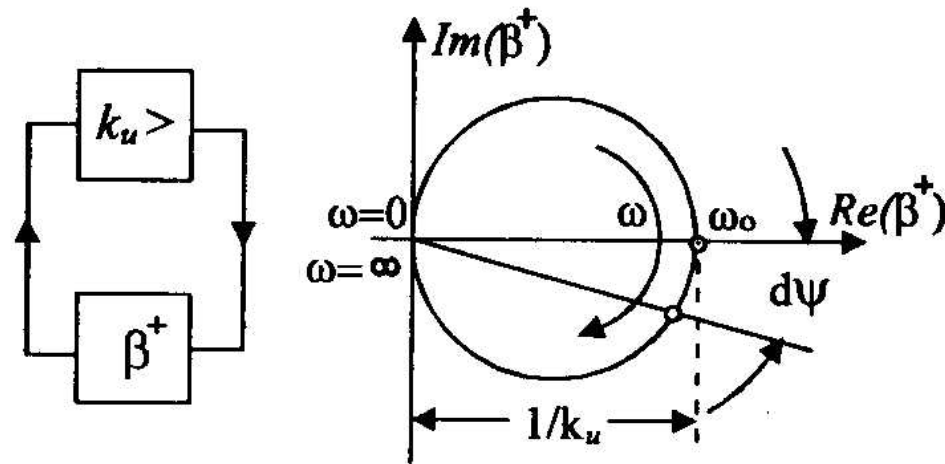
⇒ fazy

$$\psi + \varphi = 2n\pi$$



# Generatory RC

## *Struktury generatorów – z jedną pętlą SZ*



Właściwości rezonansowe gałęzi zwrotnej  $\beta^+$  w pobliżu pulsacji  $\omega_0$  określa dobroć fazowa  $Q^+$  :

$$Q^+ = \frac{\omega_0}{2} \frac{\partial \varphi}{\partial \omega} \Big|_{\omega \rightarrow \omega_0}$$

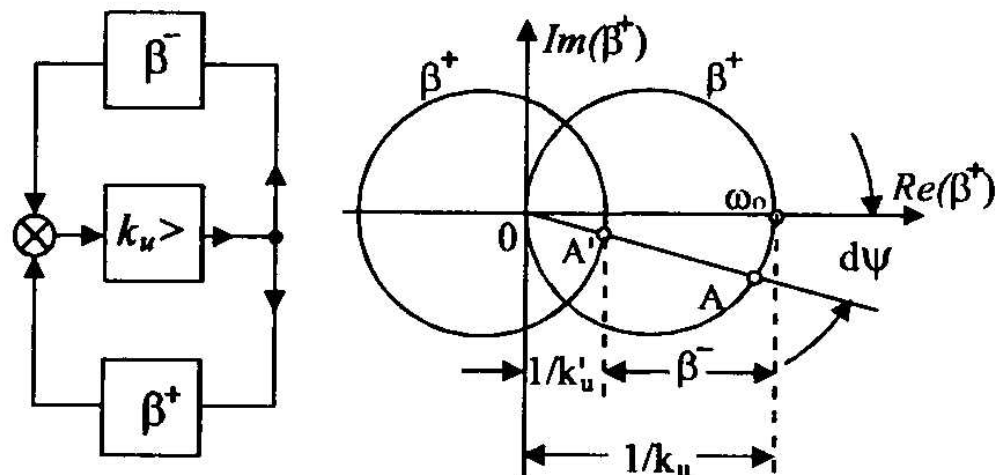
Dobroć fazowa  $Q^+$  gałęzi selektywnej decyduje o stałości drgań generatora, która jest tym lepsza, im większa  $Q^+$ . Układy z jedną pętlą SZ mają zazwyczaj małe dobroci, zwykle  $Q^+ < 1$ .

Dobroć można zwiększyć powiększając wzmocnienie wzmacniacza  $k_u$  do  $k_u'$  i wprowadzając dodatkowe –SZ.



# Generatory RC

## Struktury generatorów – z dwiema pętlami SZ



Wprowadzenie pętli  $\beta^-$  powoduje, że warunek amplitudy przyjmuje postać:

$$k_u'(\beta^+ - \beta^-) = k_u'(\beta_0 - \beta^-) = k_u' \beta = 1$$

Dla  $\omega_0$  pętla  $\beta^+$  przyjmuje wartość  $\beta_0$ . Zwiększenie wzmacnienia i wprowadzenie  $-SZ$  powoduje zwiększenie dobroci układu:

$$Q = \frac{k_u'}{k_u} Q^+$$

$-SZ$  istotnie polepsza właściwości generatora i dlatego najczęściej stosuje się generatory z dwiema pętlami SZ: zależną od częstotliwości  $\beta^+$  i niezależną (aperiodyczną)  $\beta^-$ .





# Generatory RC

## *Struktury generatorów – z dwiema pętlami SZ*

-SZ istotnie polepsza właściwości generatora (stałość częstotliwości oraz zniekształcenia nieliniowe generowanego sygnału) i dlatego najczęściej stosuje się generatory z dwiema pętlami SZ:

⇒ zależną od częstotliwości  $\beta^+$

⇒ niezależną (aperiodyczną)  $\beta^-$ .

Pętla –SZ często też wykorzystywana jest do automatycznej regulacji drgań generatora – ARW (Automatyczna Regulacja Wzmocnienia).

W ARW wykorzystuje się nieliniowe własności elementów takich jak:

⇒ żarówka,

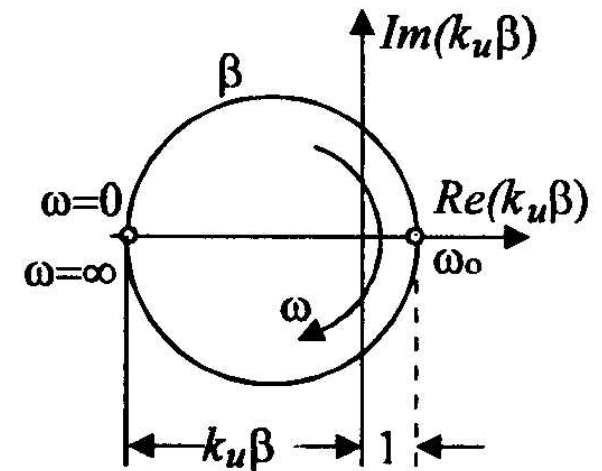
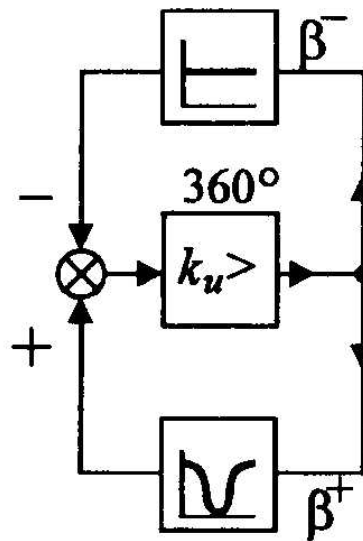
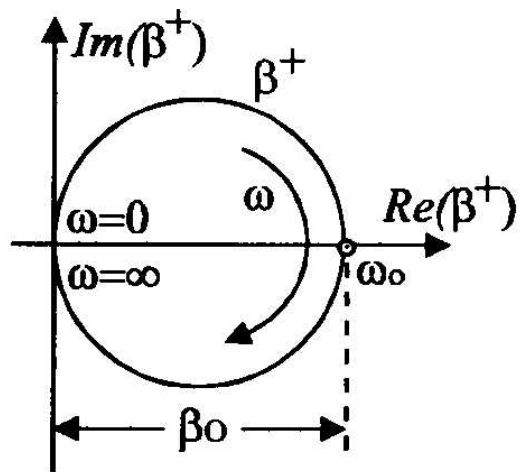
⇒ termistor,

⇒ tranzystor JFET.



# Generatory RC

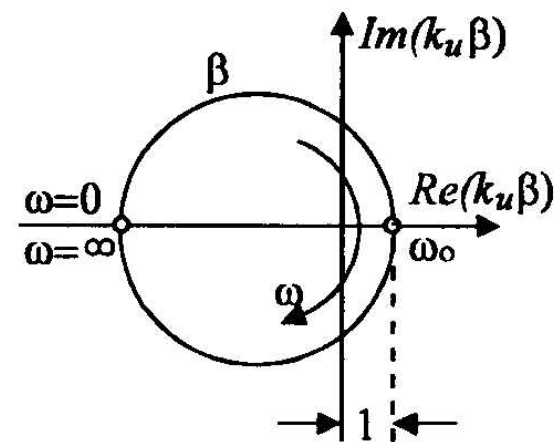
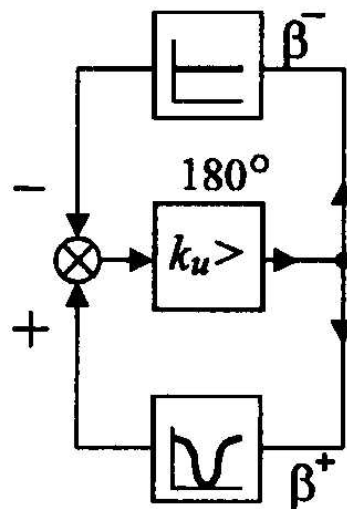
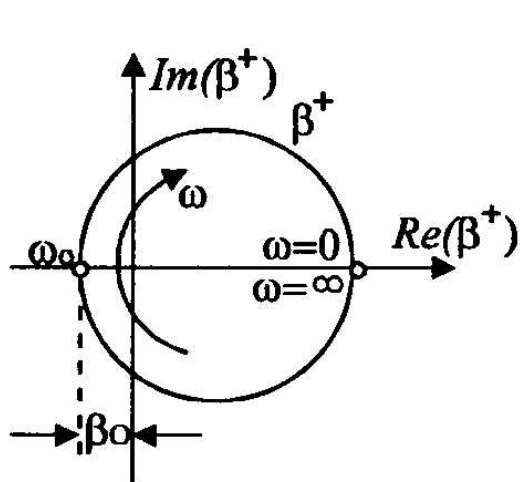
*Struktury generatorów – z dwiema pętlami SZ – mostek Wiena*





# Generatory RC

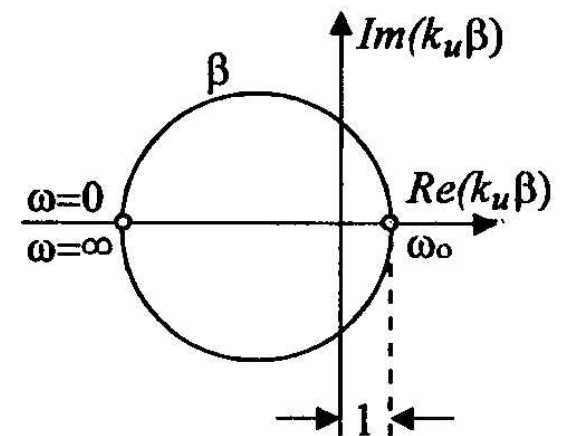
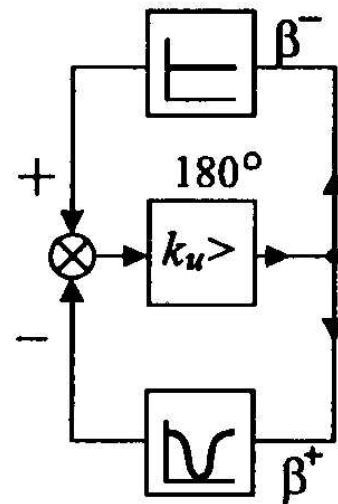
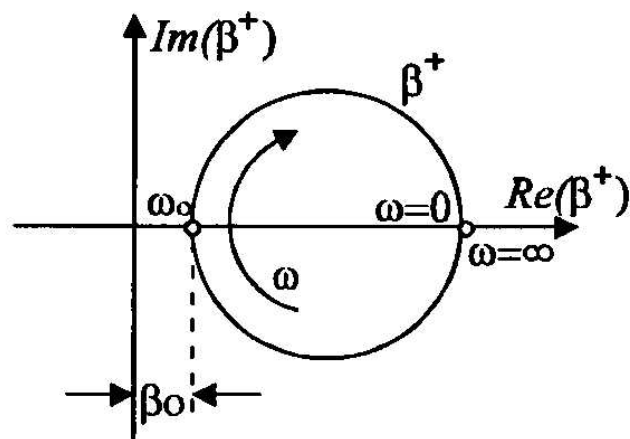
*Struktury generatorów – z dwiema pętlami SZ – mostek podwójne T*





# Generator RC

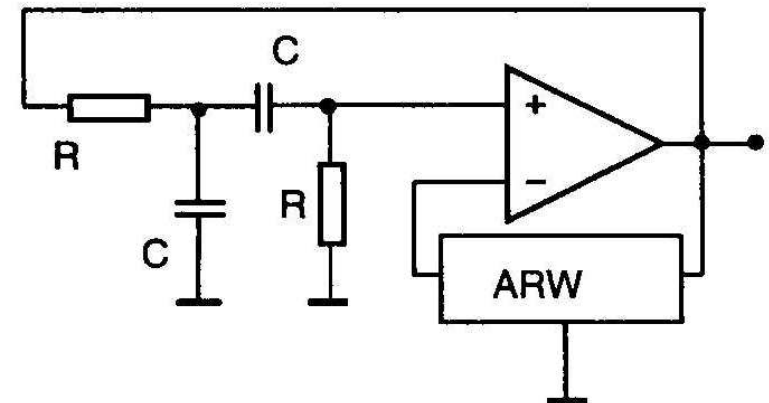
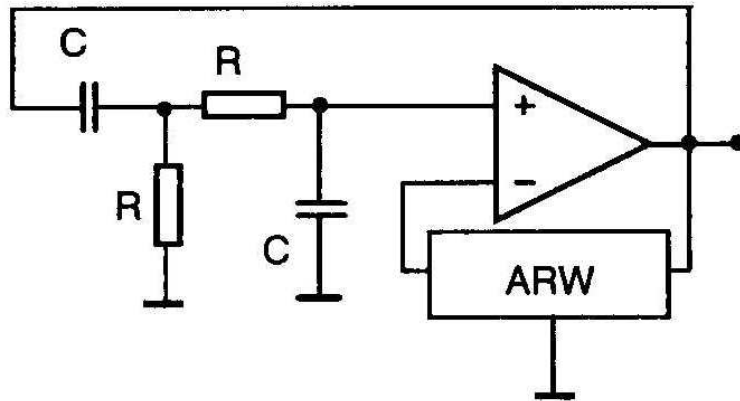
*Struktury generatorów – z dwiema pętlami SZ – mostek bocznikowane T*





# Generatory RC

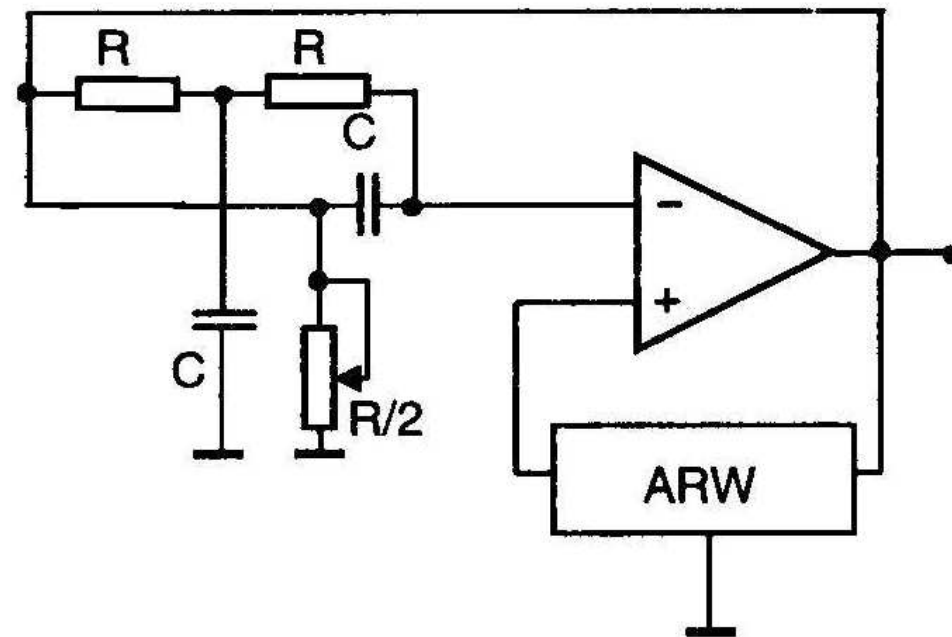
*Rozwiązania układowe – układy z mostkiem Wiena*





# Generatory RC

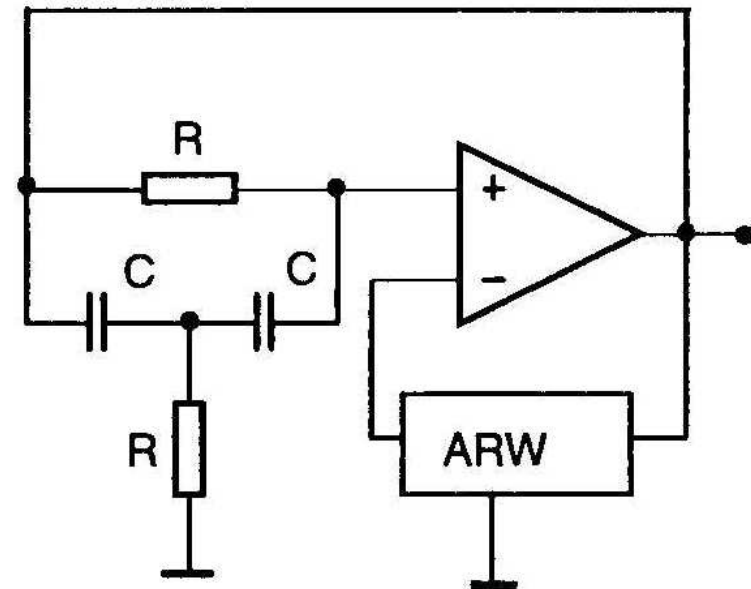
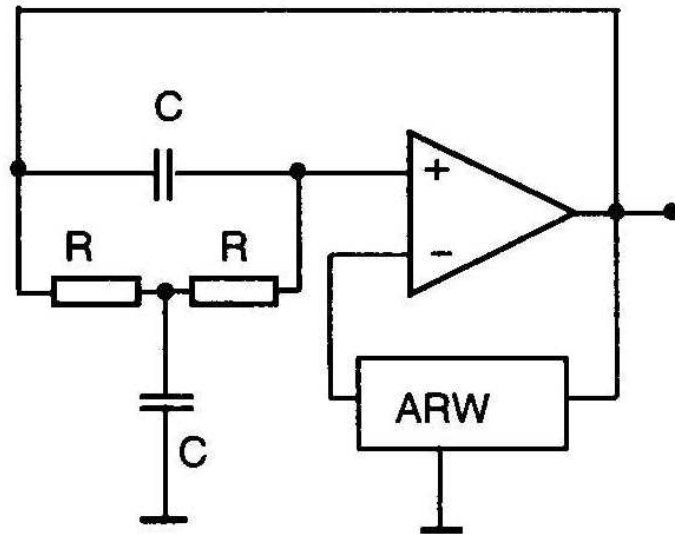
*Rozwiązania układowe – układy z mostkiem podwójne T*





# Generatory RC

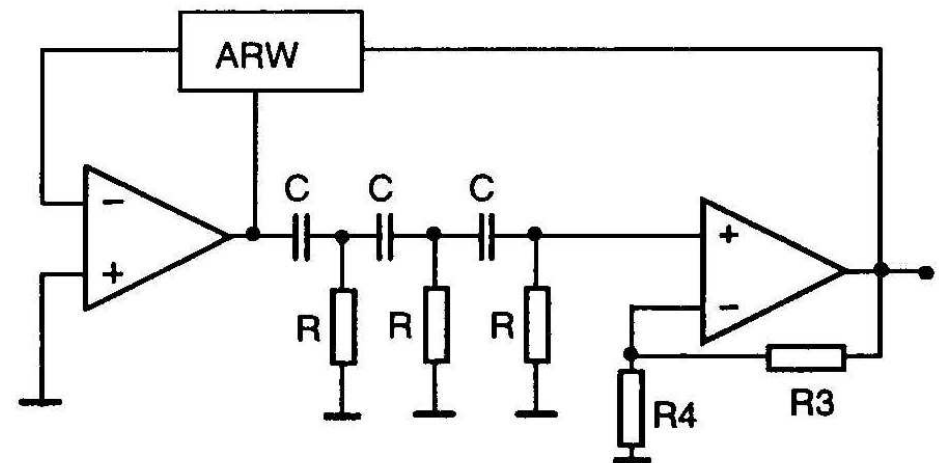
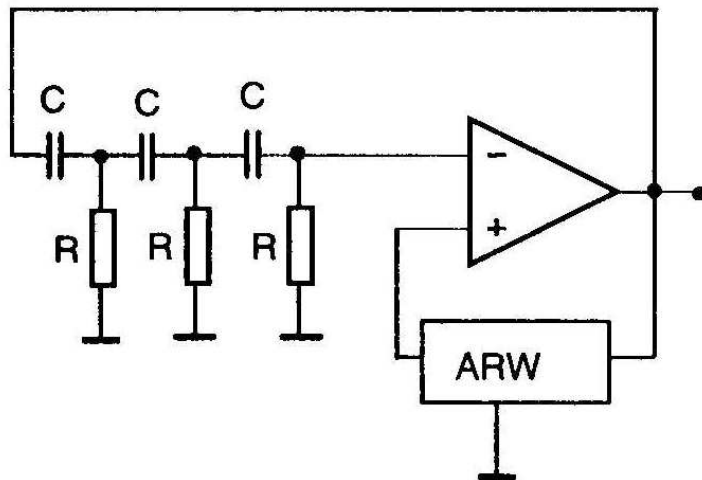
*Rozwiązania układowe – układy z mostkiem bocznikowane T*





# Generatory RC

*Rozwiązania układowe – układy z przesuwnikami CR*

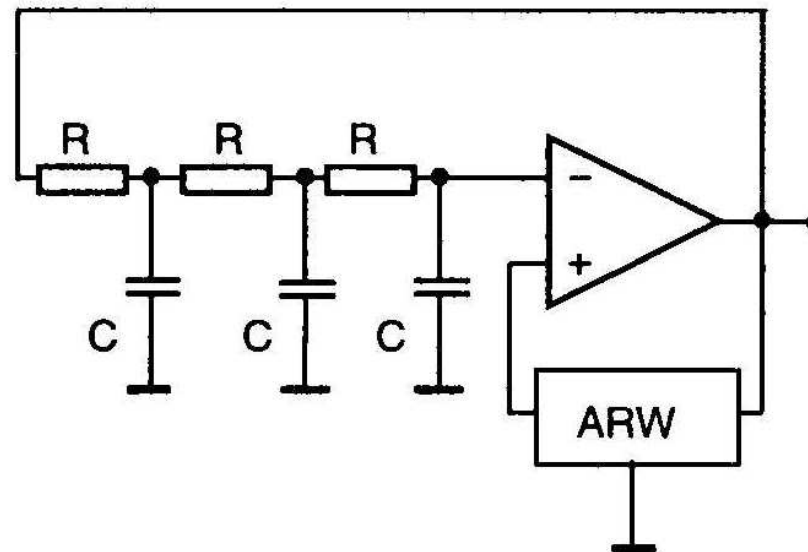






# Generatory RC

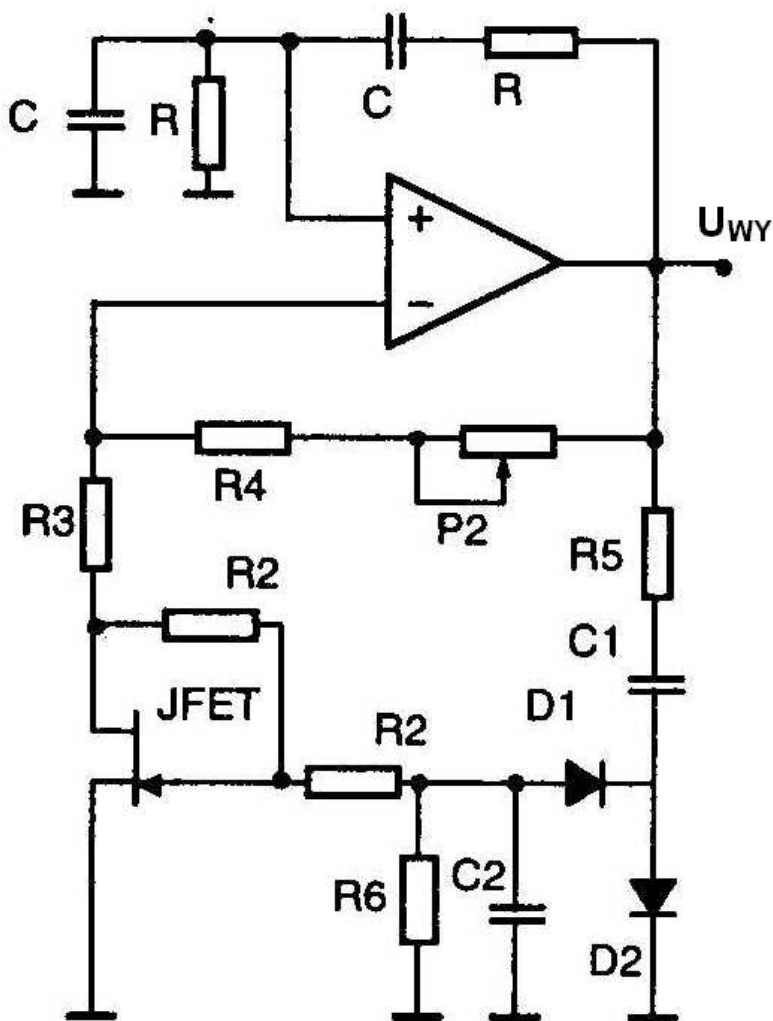
*Rozwiązania układowe – układy z przesuwnikami RC*





# Generatory RC

## *Rozwiązania układowe – 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  $\chi$ -yk wyj przy pomocy  $-SZ$  ( $R_2$ ).

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