

Fakultet elektrotehnike i računarstva
Zavod za elektroniku, mikroelektroniku,
računalne i inteligentne sustave

Elektronika 2

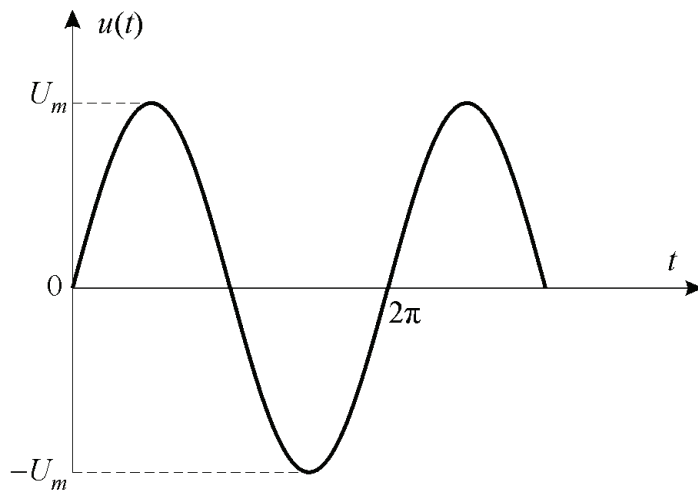
Željko Butković

7. Sinusni oscilatori

Sinusni signal

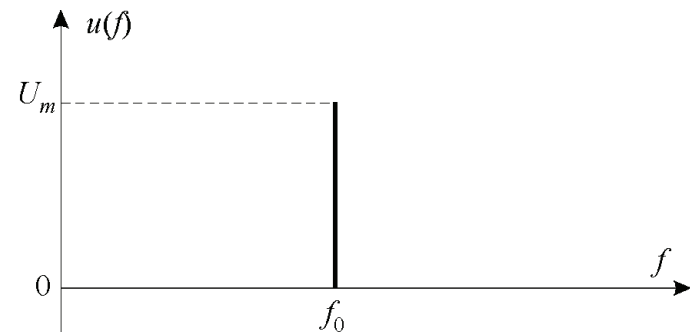
Za mjerenje, testiranje i rad elektroničkim sklopova i sustava → standardni signali određenih valnih oblika (sinusni, pravokutni, trokutasti ili pilasti)

Spektar sinusnog signala → sadrži samo jednu frekvenciju



vremenski odziv

$$u(t) = U_m \sin \omega_0 t$$



spektar

$$f_0 = \omega_0 / (2\pi)$$

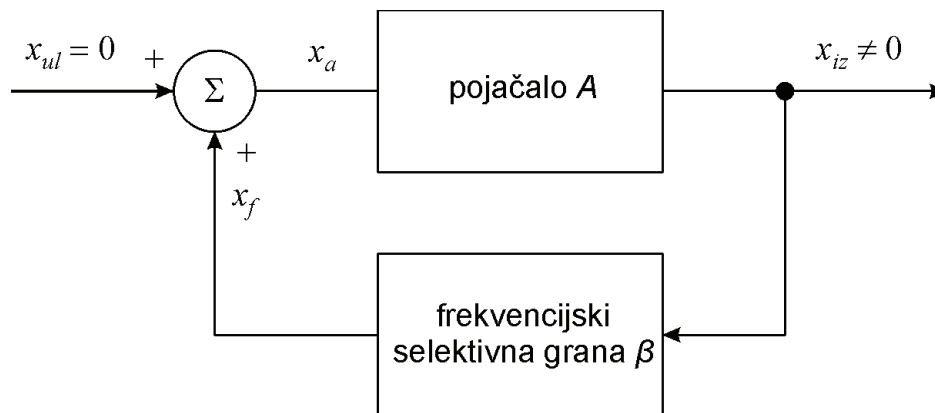
Oscilatori

Oscilatori → sklopovi koji generiraju napone periodičkih valnih oblika

Dvije grupe

- ❑ **sinusni** ili **harmonijski oscilatori** → generiraju sinusne napone → koriste pozitivnu povratnu vezu
- ❑ **relaksacijski oscilatori** → generiraju periodičke napone ostalih valnih oblika → (astabili, komparatori)

Blok shema sinusnog oscilatora



Povratni signal x_f vraća se na ulaz pojačala s pozitivnim predznakom

$$A(j\omega) = \frac{X_{iz}}{X_a}, \quad \beta(j\omega) = \frac{X_f}{X_{iz}}, \quad x_a = x_{ul} + x_f$$

$$A_f(j\omega) = \frac{X_{iz}}{X_{ul}} = \frac{A(j\omega)}{1 - \beta(j\omega)A(j\omega)} = \frac{A(j\omega)}{1 - T(j\omega)}$$

Barkhausenov kriterij osciliranja

Na frekvenciji osciliranja ω_o

$$1 - T(j\omega_o) = 0 \rightarrow A_f(j\omega_o) = \frac{X_{iz}}{X_{ul}} = \frac{A(j\omega_o)}{0} = \infty$$

Bez prisutnosti ulaznog signala, uz $x_{ul} = 0$, na izlazu oscilatora dobiva signal x_{iz} . Energiju izlaznog signala osigurava istosmjerni izvor napajanja.

Barkhausenov kriterij osciliranja $\rightarrow T(j\omega_o) = \beta(j\omega_o) A(j\omega_o) = 1$

dva uvjeta osciliranja

1. $\angle T(j\omega_o) = 0^\circ \rightarrow$ prolaskom kroz pojačalo i granu povratne veze signal se na ulaz pojačala mora vratiti s istom fazom
2. $|T(j\omega_o)| = 1 \rightarrow$ prolaskom kroz pojačalo i granu povratne veze signal se na ulaz pojačala mora vratiti s istom amplitudom

RC-oscilatori

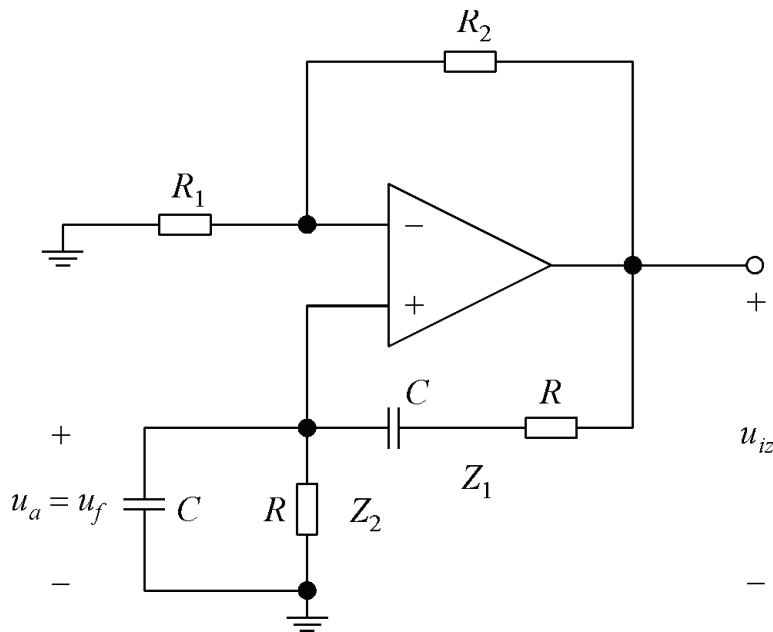
U RC-oscilatorima frekvencijski selektivna povratna veza sastoji se od otpornika i kondenzatora.

Koriste se za generiranje sinusnih napona frekvencijskog područja od 10-tak herca do nekoliko megaherca.

Primjeri:

- ☐ Oscilator s Wienovim mostom
- ☐ Oscilator s faznim pomakom

Oscilator s Wienovim mostom (1)



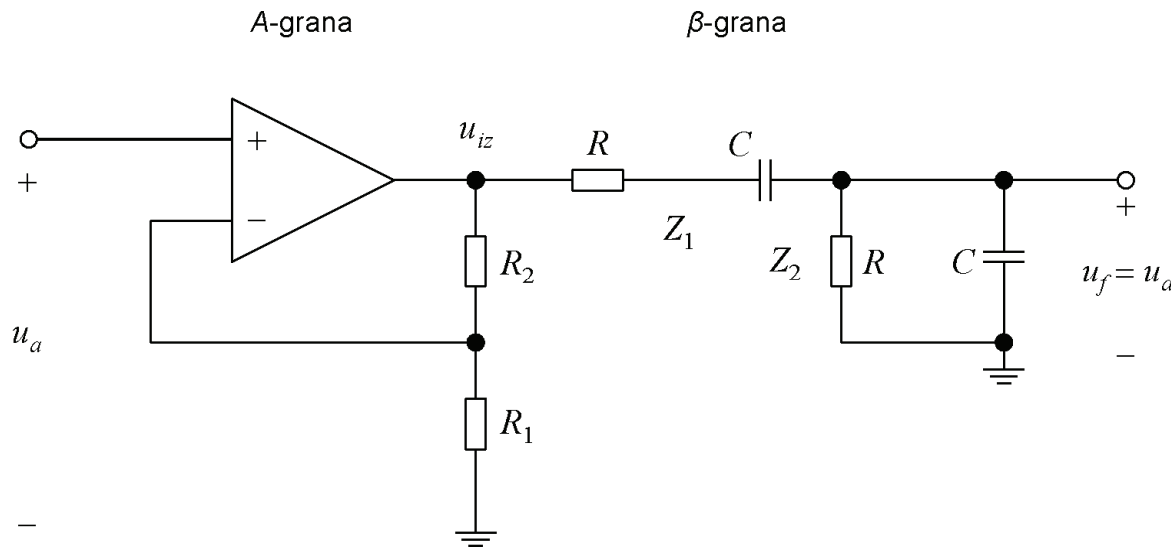
A-grana \rightarrow operacijsko pojačalo s otpornicima R_1 i R_2

β -grana \rightarrow dva spoja otpornika R i kondenzatora $C \rightarrow$ impedancije Z_1 i Z_2

Negativna povratna veza s otpornicima R_2 i $R_1 \rightarrow$ određuje pojačanje pojačala

Pozitivna povratna veza s impedancijama Z_1 i $Z_2 \rightarrow$ uzrokuje oscilacije.

Oscillator s Wienovim mostom (2)



$$A_V = \frac{U_{iz}}{U_a} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$Z_1 = R + (1/j\omega C)$$

$$Z_2 = R \parallel \frac{1}{j\omega C} = \frac{R}{1 + j\omega RC}$$

$$\beta(j\omega) = \frac{U_f}{U_{iz}} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{\frac{R}{1 + j\omega RC}}{R + \frac{1}{j\omega C} + \frac{R}{1 + j\omega RC}} = \dots = \frac{1}{3 + j\left(\omega RC - \frac{1}{\omega RC}\right)}$$

Oscilator s Wienovim mostom (3)

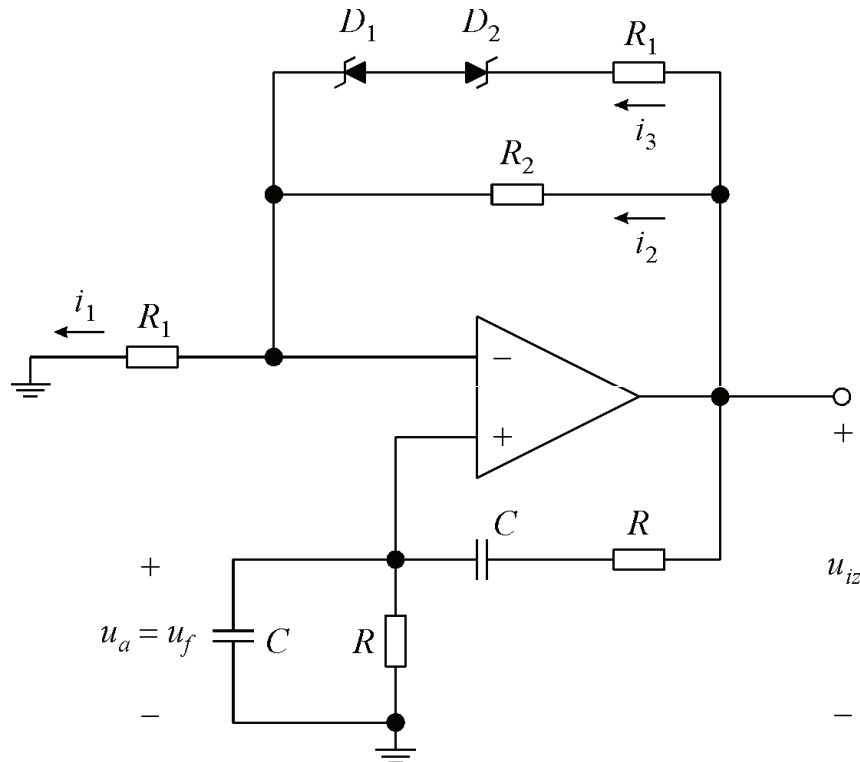
Na frekvenciji osciliranja $\omega_o \rightarrow \angle T(j\omega_o) = \angle \beta(j\omega_o) A_V = 0^\circ \rightarrow \beta(j\omega_o)$ je pozitivan realan broj \rightarrow imaginarni član $\beta(j\omega_o)$ jednak je nuli

$$\omega_o RC - \frac{1}{\omega_o RC} = 0 \rightarrow \omega_o = \frac{1}{RC} \rightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$\beta(j\omega_o) = 1/3$$

$$\text{za } |T(j\omega_o)| = 1 \rightarrow A_V = \frac{1}{\beta(j\omega_o)} = 3 \rightarrow R_2 = 2R_1$$

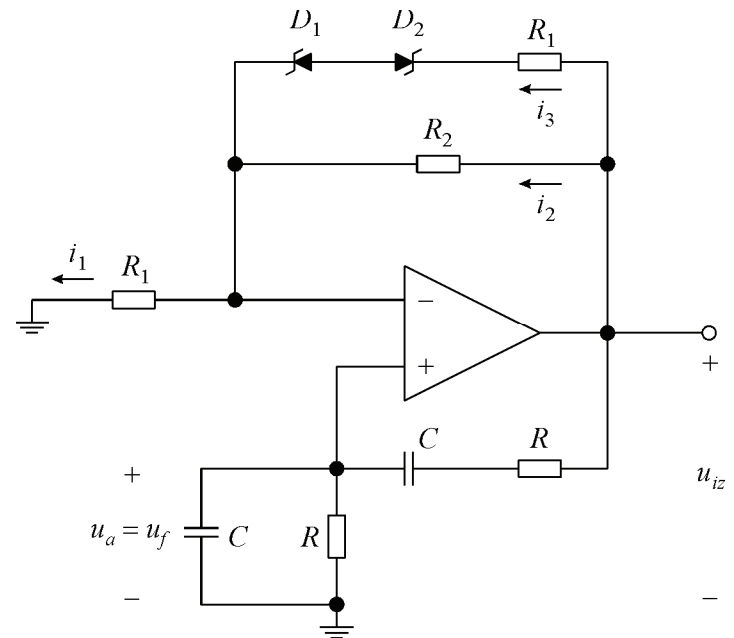
Oscilator s Wienovim mostom – stabilizacija amplitude



Primjer 7.1

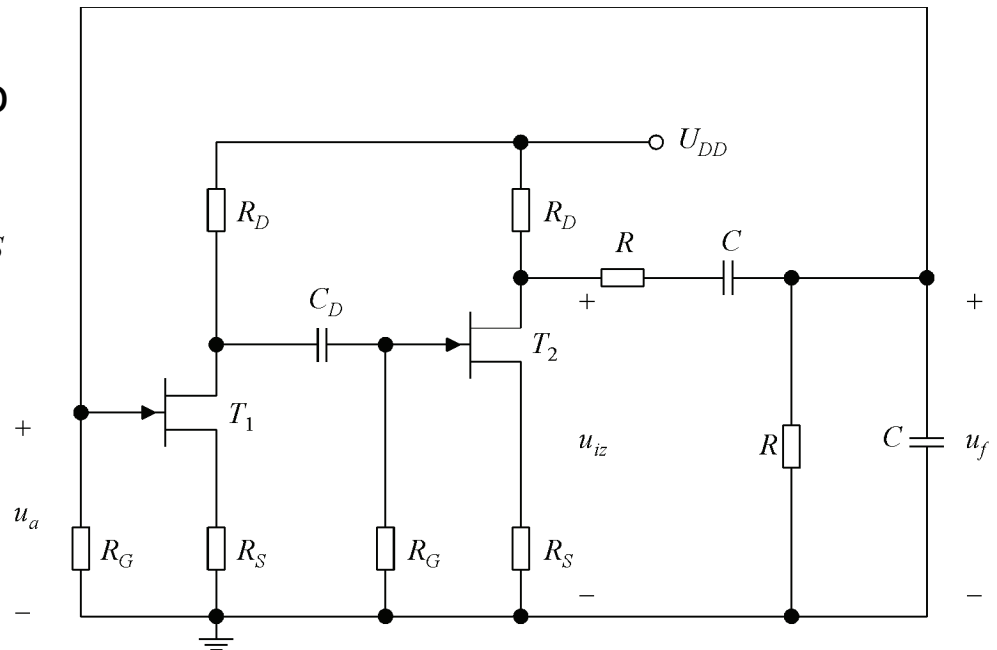
U oscilatoru s Wienovim mostom sa slike zadano je: $R = 10 \text{ k}\Omega$, $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ i $R_2 = 22 \text{ k}\Omega$. Probojni napon Zenerovih dioda $U_Z = 5 \text{ V}$, a napon koljena propusno polariziranih dioda $U_\gamma = 0,7 \text{ V}$. Operacijsko pojačalo je idealno. Odrediti

- kapacitet kondenzatora C uz koji će frekvencija osciliranja biti $f_o = 1 \text{ kHz}$,
- amplitudu izlaznog napona.

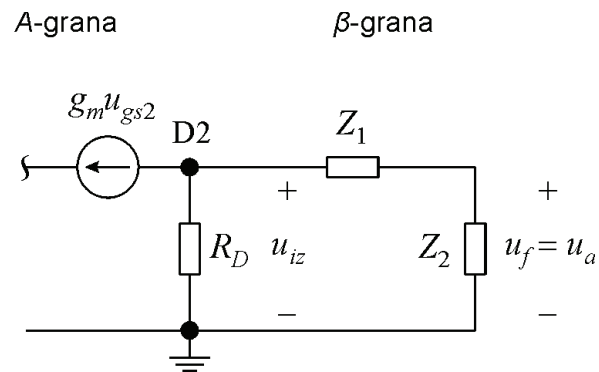
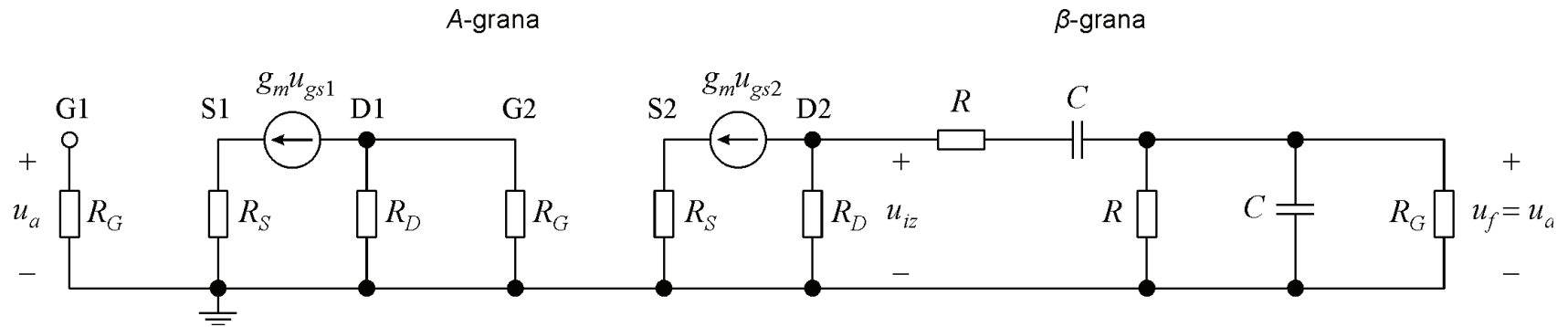


Primjer 7.2 (1)

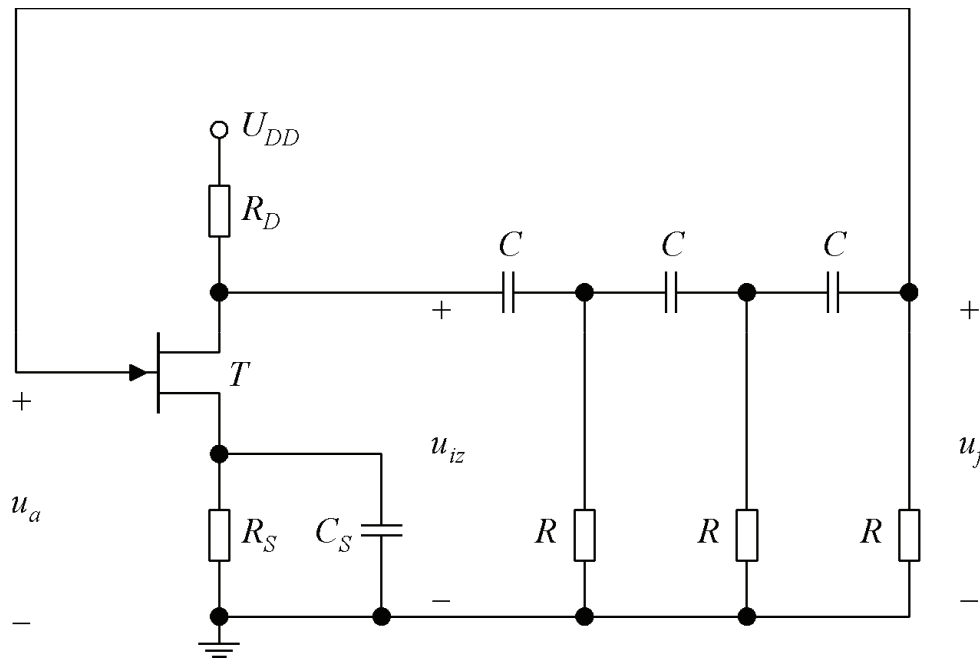
Za oscilator s Wienovim mostom sa slike zadano je: $R_G = 1 \text{ M}\Omega$, $R_D = 1 \text{ k}\Omega$, $R_S = 200 \text{ }\Omega$, $R = 1 \text{ k}\Omega$ i $C = 10 \text{ nF}$. Odrediti frekvenciju osciliranja, te minimalne strmine spojnih FET-ova $g_{m1} = g_{m2} = g_m$ potrebne za održavanje oscilacija. Na frekvenciji osciliranja impedancija kondenzatora C_D zanemarivo je mala. Zanemariti porast struja odvoda s naponom u_{DS} u području zasićenja.



Primjer 7.2 (2)



Oscillator s faznim pomakom (1)

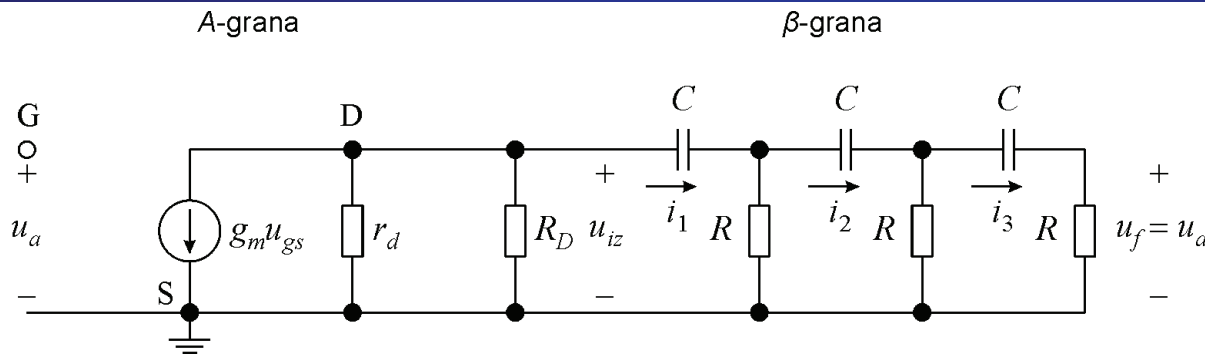


A-grana → pojačalo s
FET-om u spoju
zajedničkog uvida

β -grana → trostruka
 CR -mreža

Oscilacije → na
frekvenciji na kojoj
 CR -mreža unosi
fazni pomak od 180°

Oscilator s faznim pomakom (2)



$$A_V = \frac{U_{iz}}{U_a} = -g_m (r_d \parallel R_D)$$

$$U_f = R I_3$$

$$U_{iz} = \left(R + \frac{1}{j\omega C} \right) I_1 - R I_2$$

$$\beta(j\omega) = \frac{U_f}{U_{iz}} =$$

$$0 = -R I_1 + \left(2R + \frac{1}{j\omega C} \right) I_2 - R I_3$$

$$= \frac{1}{1 - \frac{5}{(\omega RC)^2} - j \left[\frac{6}{\omega RC} - \frac{1}{(\omega RC)^3} \right]}$$

$$0 = -R I_2 + \left(2R + \frac{1}{j\omega C} \right) I_3$$

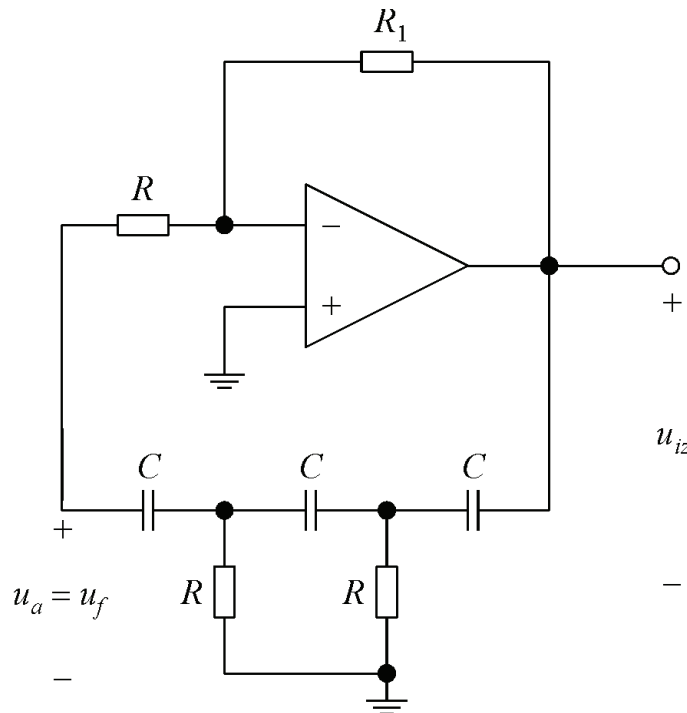
Oscilator s faznim pomakom (3)

Na frekvenciji osciliranja $\omega_o \rightarrow \angle \beta(j\omega_o) = 180^\circ \rightarrow \beta(j\omega_o)$ je negativan realan broj \rightarrow imaginarni član $\beta(j\omega_o)$ jednak je nuli

$$\frac{6}{\omega_o RC} - \frac{1}{(\omega_o RC)^3} = 0 \rightarrow \omega_o = \frac{1}{\sqrt{6} RC} \rightarrow f_o = \frac{\omega_o}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{6} RC}$$

$$\beta(j\omega_o) = \frac{1}{1 - \frac{5}{(\omega_o RC)^2}} = -\frac{1}{29} \rightarrow |A_V| \geq 29$$

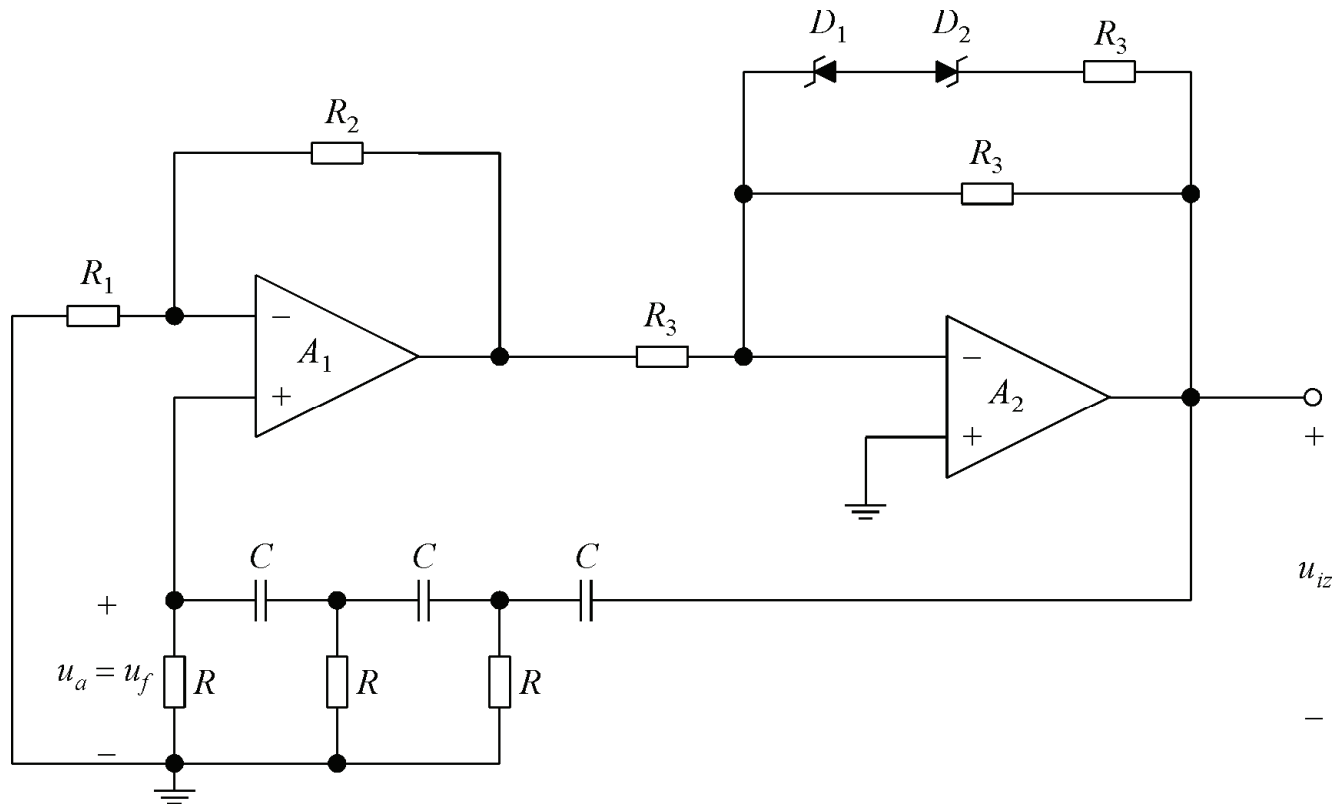
Oscilator s faznim pomakom s operacijskim pojačalom



$$A_V = \frac{U_{iz}}{U_a} = -\frac{R_1}{R}$$

$$|A_V| \geq 29 \rightarrow R_1 \geq 29 R$$

Oscilator s faznim pomakom – stabilizacija amplitude



LC-oscilatori

LC-oscilatori koriste se za generiranje sinusnih napona viših frekvencija do nekoliko stotina megaherca.

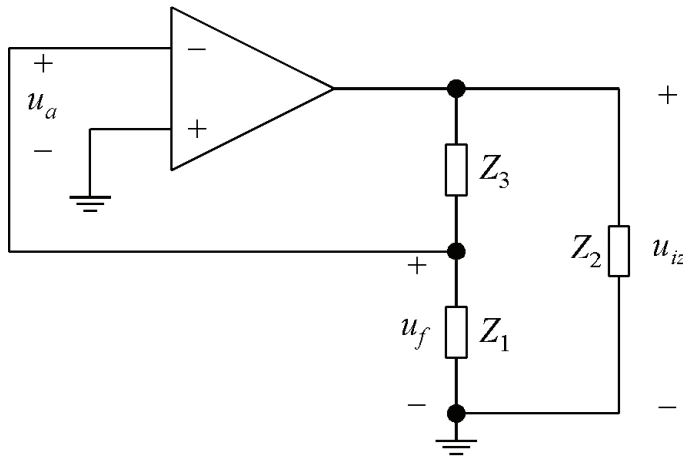
Frekvencijski selektivna povratna veza je rezonantni krug sastavljen od kondenzatora i zavojnica.

Zbog boljih visokofrekvencijskih svojstava, kao aktivne komponente za formiranje A-grane LC-oscilatora koriste se diskretni bipolarni ili unipolarni tranzistori.

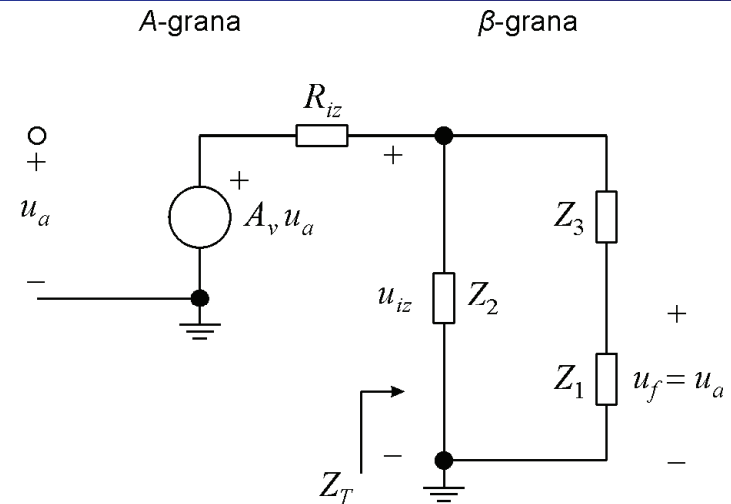
Primjeri:

- ☐ Colpittsov oscilator
- ☐ Hartleyev oscilator
- ☐ Oscilatori s kristalom

Opći oblik LC-oscilatora (1)



spoj oscilatora



nadmjesna shema

$$A_v = \frac{U_{iz}}{U_a} = -A_v \frac{Z_T}{R_{iz} + Z_T} \quad Z_T = Z_2 \parallel (Z_1 + Z_3) = \frac{Z_2(Z_1 + Z_3)}{Z_1 + Z_2 + Z_3}$$

$$A_v = -A_v \frac{Z_2(Z_1 + Z_3)}{R_{iz}(Z_1 + Z_2 + Z_3) + Z_2(Z_1 + Z_3)} \quad \beta = \frac{U_f}{U_{iz}} = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_3}$$

Opći oblik LC-oscilatora (2)

$$\beta A_v = -A_v \frac{Z_1 Z_2}{R_{iz}(Z_1 + Z_2 + Z_3) + Z_2(Z_1 + Z_3)}$$

U grani povratne veze \rightarrow kondenzatori i zavojnice $\rightarrow Z_1 = jX_1, Z_2 = jX_2, Z_3 = jX_3$
 $\rightarrow X = -1/\omega C$ ili $X = \omega L$

$$\beta A_v = A_v \frac{X_1 X_2}{j R_{iz}(X_1 + X_2 + X_3) - X_2(X_1 + X_3)}$$

Na frekvenciji osciliranja $\omega_o \rightarrow \angle \beta(\omega_o) A_v(\omega_o) =$ pojačanje $\beta(\omega_o) A_v(\omega_o)$ je pozitivan realan broj \rightarrow imaginarni član $\beta(\omega_o) A_v(\omega_o)$ jednak je nuli

$$X_1 + X_2 + X_3 = 0$$

Opći oblik LC-oscilatora (3)

$$\beta(\omega_o) A_v(\omega_o) = A_v \frac{X_1 X_2}{-X_2(X_1 + X_3)} = -A_v \frac{X_1}{X_1 + X_3}$$

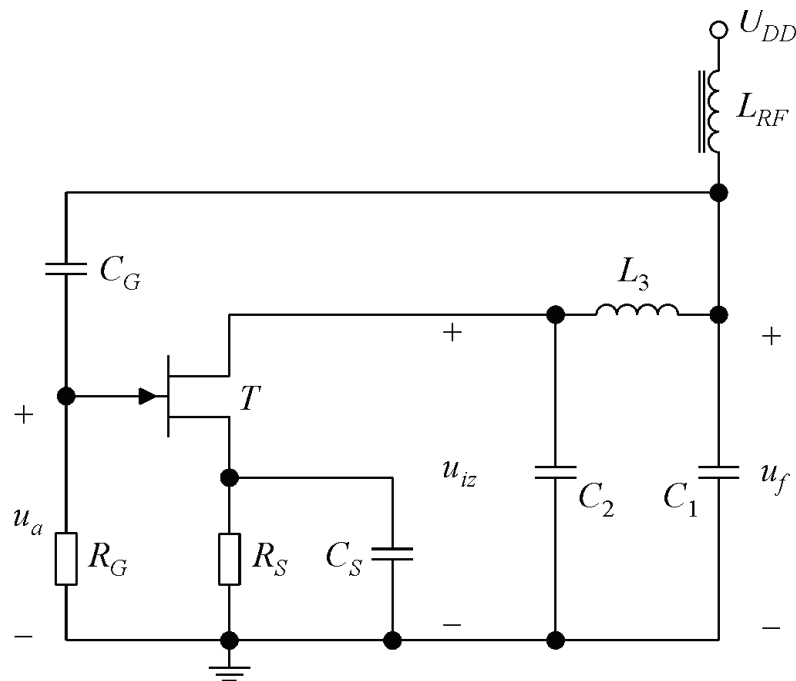
$$X_1 + X_3 = -X_2 \rightarrow \beta(\omega_o) A_v(\omega_o) = A_v \frac{X_1}{X_2}$$

X_1 i X_2 su istog predznaka, a X_3 je suprotnog predznaka

Ako su Z_1 i Z_2 kapaciteti Z_3 je induktivitet i obrnuto.

$$|\beta(\omega_o) A_v(\omega_o)| = 1 \rightarrow A_{v\min} = \frac{X_2}{X_1}$$

Colpittsov oscillator



$$X_1 = -1/\omega C_1, X_2 = -1/\omega C_2, X_3 = \omega L_3$$

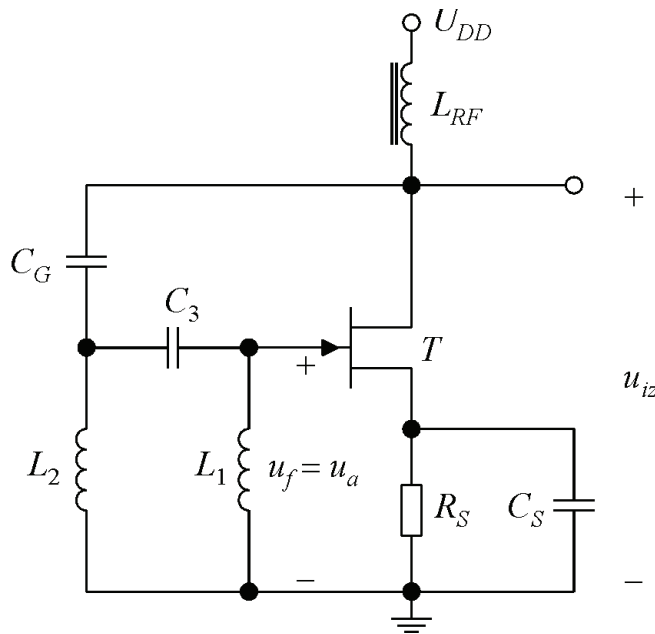
Na frekvenciji osciliranja $\omega_o \rightarrow$

$$-\frac{1}{j\omega_o C_1} - \frac{1}{j\omega_o C_2} + j\omega_o L_3 = 0$$

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_3}} \sqrt{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}}$$

$$A_v = g_m r_d \rightarrow g_m \geq \frac{C_1}{r_d C_2}$$

Hartleyev oscilator



$$X_1 = \omega L_1, X_2 = \omega L_2, X_3 = -1/\omega C_3$$

Na frekvenciji osciliranja $\omega_o \rightarrow$

$$j\omega_o L_1 + j\omega_o L_2 - \frac{1}{j\omega_o C_3} = 0$$

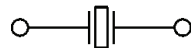
$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_3(L_1 + L_2)}}$$

$$A_v = g_m r_d \rightarrow g_m \geq \frac{L_2}{r_d L_1}$$

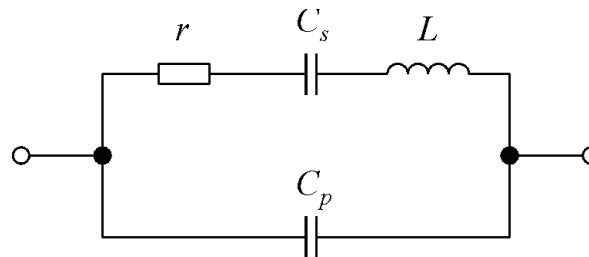
Piezoelektrični kristal (1)

Istosmjerni napon uzrokuje u piezoelektričnom kristalu naprezanja i deformacije → mehaničke vibracije → kristal oscilira na svojoj mehaničkoj rezonantnoj frekvenciji → mehaničke vibracije proizvode na krajevima kristala izmjenični napon.

Kristal se električki ponaša kao rezonantni RLC-krug vrlo malog serijskog otpora, odnosno visokog faktora dobrote.



električki
simbol



nadomjesni
sklop

Piezoelektrični kristal (2)

Zanemarenjem malog otpora r iz nadomjesne sheme.

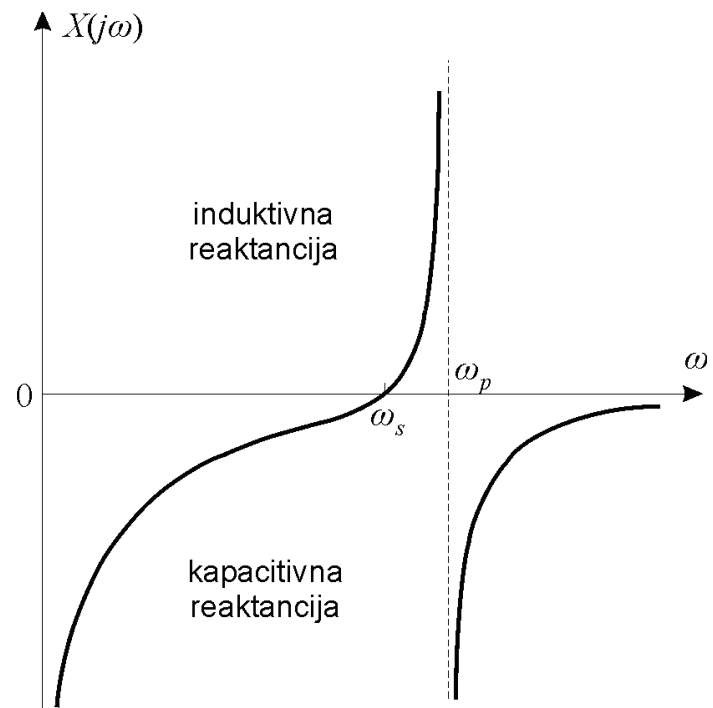
$$Z(j\omega) = \left(j\omega L + \frac{1}{j\omega C_s} \right) \parallel \frac{1}{j\omega C_p}$$

$$Z(j\omega) = \frac{-j}{\omega C_p} \frac{\omega^2 - \omega_s^2}{\omega^2 - \omega_p^2}$$

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{LC_s}} \quad \omega_p = \frac{1}{\sqrt{L \frac{C_s C_p}{C_s + C_p}}}$$

rezonantne frekvencije $\rightarrow \omega_p > \omega_s$

$C_s \ll C_p \rightarrow \omega_p$ i ω_s razlikuju se za manje od 1%.



Oscilatori s kristalom

Zamjenom zavojnice L_3 u Colpittsovom oscilatoru s kristalom →

Pierceov oscilator

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC_s} + \frac{1}{L} \frac{1}{C_p + \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}} \approx \frac{1}{\sqrt{LC_s}} = \frac{\omega_s}{2\pi}$$

**Pierceov oscilator
s CMOS invertorom**

