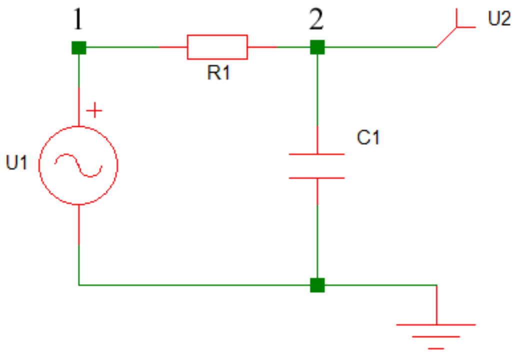
PASÍVNE PRENOSOVÉ SIETE

na výpočet napäťového prenosu použijeme metódu UP, zavedieme symboliku $\underline{i\omega = p}$

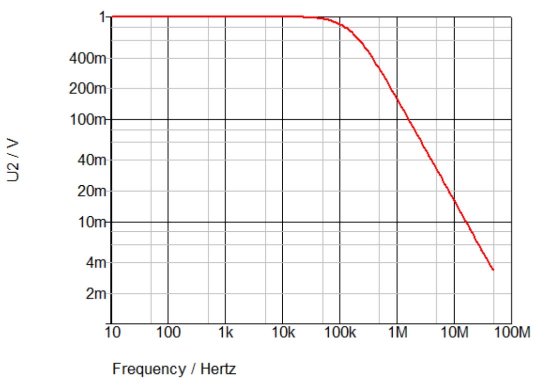
- 

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R} = Y \qquad \begin{pmatrix} Y & -Y \\ -Y & Y+pC \end{pmatrix}$$
$$i\omega C_1 = pC$$

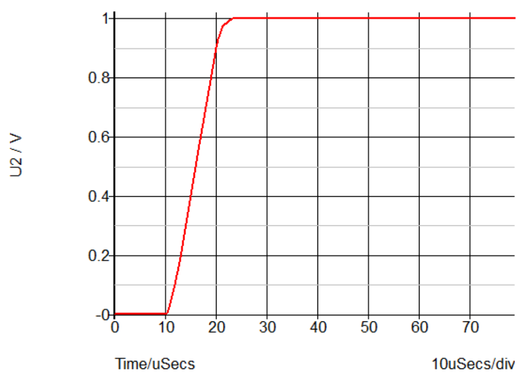
$$K_{U0}(p) = \frac{D_{12}}{D_{11}} = \ldots = \frac{1}{1+pCR}$$

$$|K_{U0}(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega CR)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+(\frac{\omega}{\omega_h})^2}}$$

$$\varphi(\omega) = -\arctan\omega CR = -\arctan\frac{\omega}{\omega_h}$$

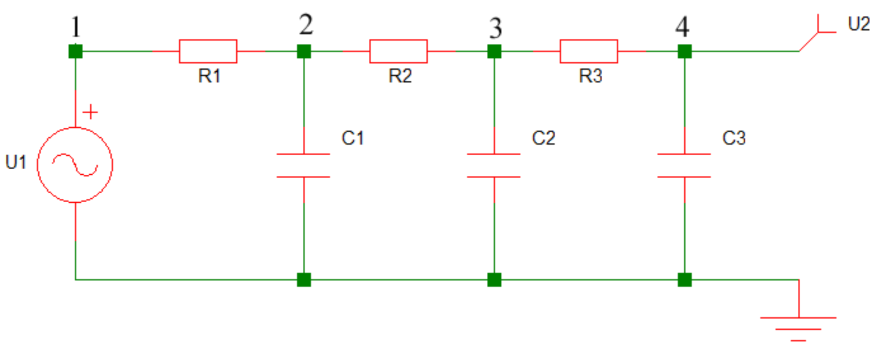


amplitúdová prenosová charakteristika



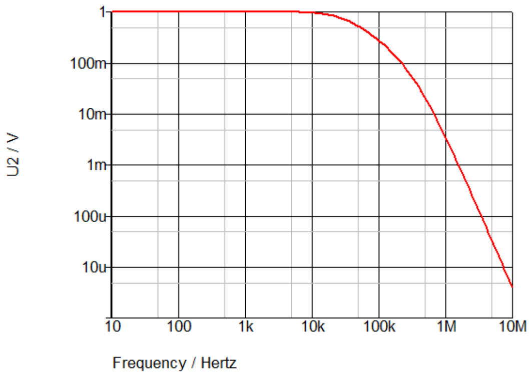
prechodová charakteristika

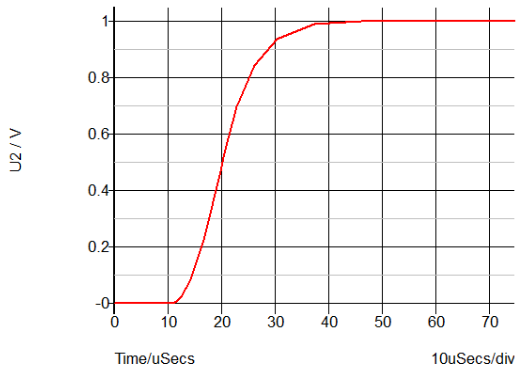
ide o *dolnofrekvenčný priepust* (DP) s *hraničným kmitočtom* $\omega_h = \frac{1}{RC}$, pri ktorom modul prenosovej charakteristiky klesne na $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$, resp. $-3dB$, a fázový posuv je $\varphi = -45°$

- 

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{R} = Y \qquad \begin{pmatrix} Y & -Y & 0 & 0 \\ -Y & 2Y+pC & -Y & 0 \\ 0 & -Y & 2Y+pC & -Y \\ 0 & 0 & -Y & Y+pC \end{pmatrix}$$
$$C_1 = C_2 = C_3 = C$$

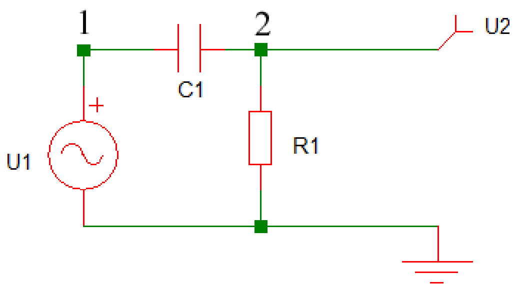
$$K_{U0}(p) = \frac{D_{14}}{D_{11}} = \ldots = \frac{1}{1+6pCR+5(pCR)^2+(pCR)^3}$$





amplitúdová prenosová charakteristika

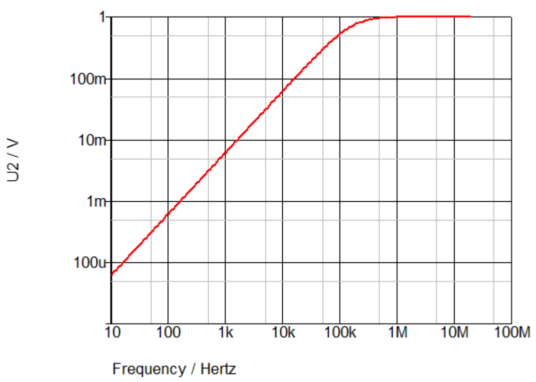
prechodová charakteristika

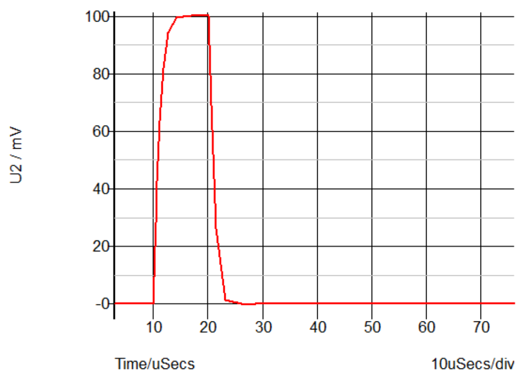
- 

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R} = Y \qquad \begin{pmatrix} pC & -pC \\ -pC & Y + pC \end{pmatrix}$$
$$i\omega C_1 = pC$$

$$K_{U0}(p) = \frac{D_{12}}{D_{11}} = \dots = \frac{1}{1+\frac{1}{pCR}}$$

$$|K_{U0}(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1+(\frac{1}{\omega CR})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+(\frac{\omega_d}{\omega})^2}}$$
$$\varphi(\omega) = \arctan\frac{1}{\omega CR} = \arctan\frac{\omega_d}{\omega}$$

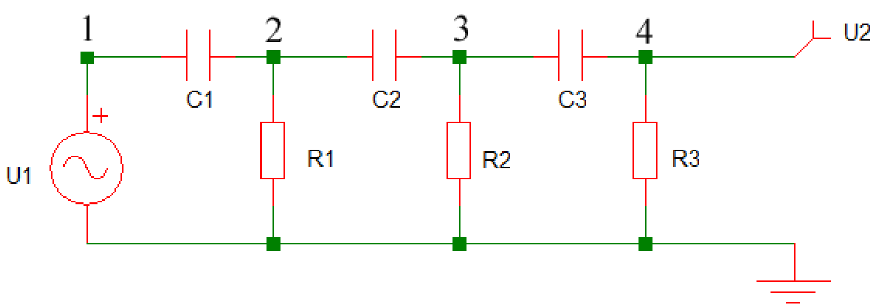




amplitúdová prenosová charakteristika

prechodová charakteristika

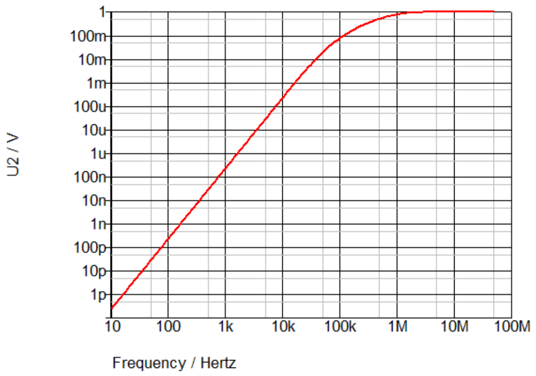
ide o *hornofrekvenčný priepust* (DP) s *hraničným kmitočtom* $\omega_d = \frac{1}{RC}$, pri ktorom modul prenosovej charakteristiky klesne na $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$, resp. $-3dB$, a fázový posuv je $\varphi = +45°$

- 

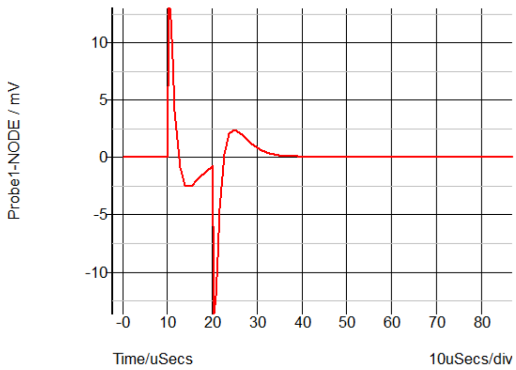
$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{R} = Y \qquad C_1 = C_2 = C_3 = C$$

$$\begin{pmatrix} pC & -pC & 0 & 0 \\ -pC & 2pC+Y & -pC & 0 \\ 0 & -pC & 2pC+Y & -pC \\ 0 & 0 & -pC & Y+pC \end{pmatrix}$$

$$K_{U0}(p) = \frac{D_{14}}{D_{11}} = ... = \frac{1}{1 + \frac{6}{pCR} + \frac{5}{(pCR)^2} + \frac{1}{(pCR)^3}}$$

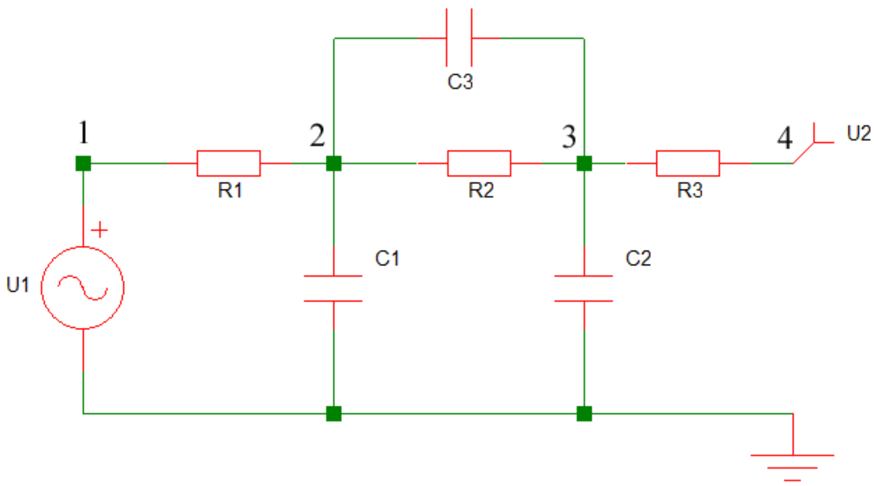


amplitúdová prenosová charakteristika



prechodová charakteristika

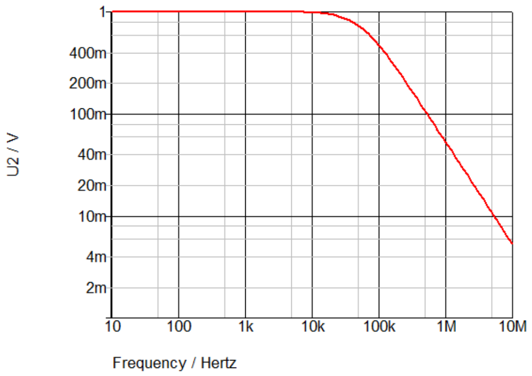
•

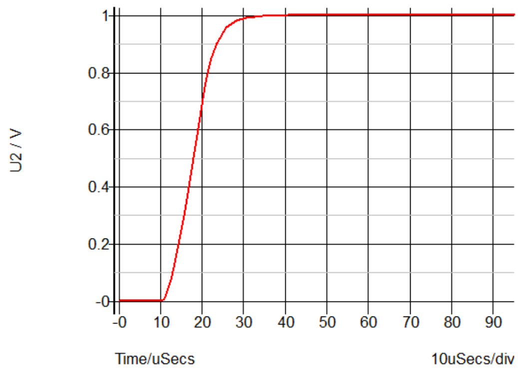


$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{R} = Y \qquad C_1 = C_2 = C_3 = C$$

$$\begin{pmatrix} Y & -Y & 0 & 0 \\ -Y & 2(Y+pC) & -(Y+pC) & 0 \\ 0 & -(Y+pC) & 2(Y+pC) & -Y \\ 0 & 0 & -Y & Y \end{pmatrix}$$

$$K_{U0}(p) = \frac{D_{14}}{D_{11}} = ... = \frac{1}{1+3pCR}$$



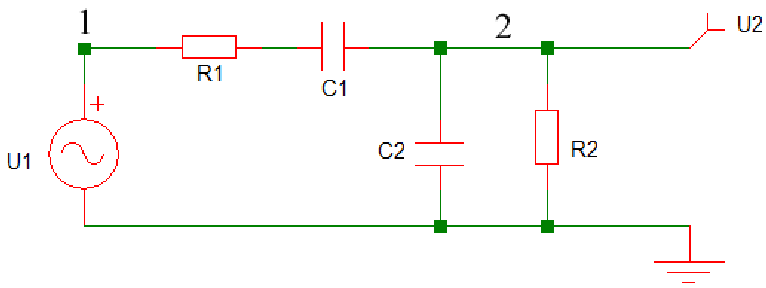


amplitúdová prenosová charakteristika

prechodová charakteristika

napriek 3 akumulačným prvkom ide o prenosový systém (DP) *1. rádu*

•



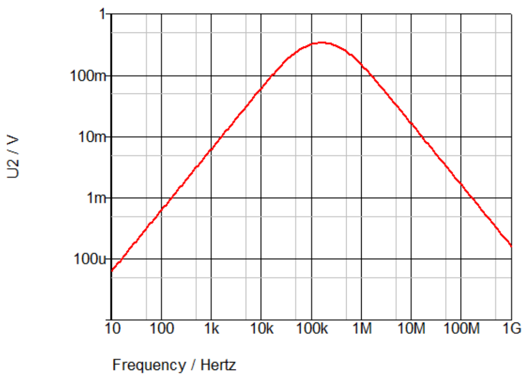
$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R} = Y \qquad C_1 = C_2 = C$$

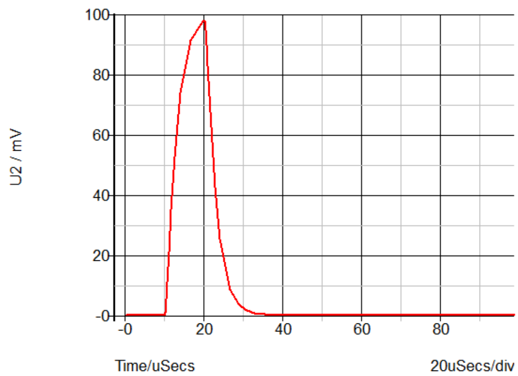
$$Y_1 = \frac{1}{R+\frac{1}{pC}} = \frac{pC}{1+pCR} \qquad Y_2 = \frac{1}{R} + pC = \frac{1+pCR}{R}$$

$$\begin{pmatrix} Y_1 & -Y_1 \\ -Y_1 & Y_1 + Y_2 \end{pmatrix}$$

$$K_{U0}(p) = \frac{D_{12}}{D_{11}} = \dots = \frac{pCR}{1 + 3pCR + (pCR)^2}$$

$$|K_{U0}(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{9 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}} \qquad \varphi = -\arctan\frac{1}{3}\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right) \qquad \omega_0 = \frac{1}{RC}$$





amplitúdová prenosová charakteristika

prechodová charakteristika

ide o *pásmový priepust* (PP) v oblasti kmitočtu ω_0, pre ktorý platí $1-(\omega CR)^2=0$ a pri ktorom modul prenosovej charakteristiky je $\frac{1}{3}$ pri nulovom fázovom posuve - tzv. *Wienov delič*

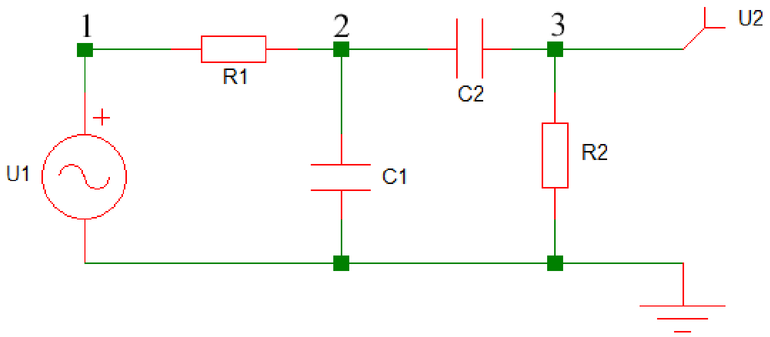
šírkou pásma priepustnosti $B(\omega)$ rozumieme interval medzi frekvenciami ω_d, ω_h, pre ktoré

$$|K_{U0}(\omega_{d,h})| = \frac{1}{\sqrt{2}}|K_{U0}|_{max} = \frac{1}{3\sqrt{2}}$$

ω_d, ω_h sú *kladnými* riešeniami rovníc $\quad \omega^2 \pm 3\omega_0\omega - \omega_0^2 = 0 \quad$ odkiaľ $\quad B(\omega) = 3\omega_0$

kvalita (selektivita) PP je definovaná vzťahom $\quad Q = \frac{\omega_0}{B(\omega)}$
pre Wienov delič $Q = 1/3$

•



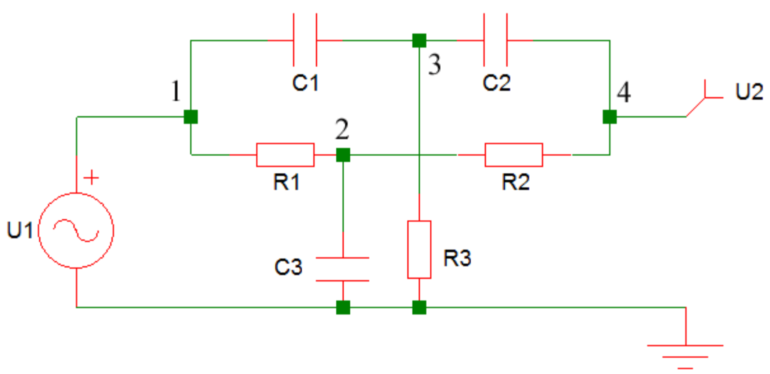
$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R} = Y$
$C_1 = C_2 = C$

$$\begin{pmatrix} Y & -Y & 0 \\ -Y & Y+2pC & -pC \\ 0 & -pC & Y+pC \end{pmatrix}$$

$$K_{U0}(p) = \frac{D_{13}}{D_{11}} = ... = \frac{pCR}{1+3pCR+(pCR)^2}$$

ide o *pásmový priepust* (PP), vytvorený o kaskádnym radením DP a HP, s identickým napäťovým prenosom ako Wienov delič

•

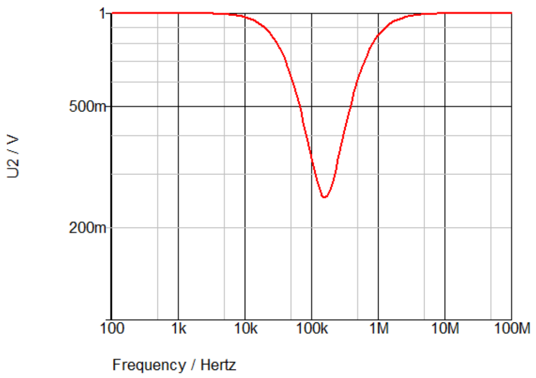


$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R} = Y$
$R_3 = \frac{R}{2}$
$C_1 = C_2 = C$
$C_3 = 2C$

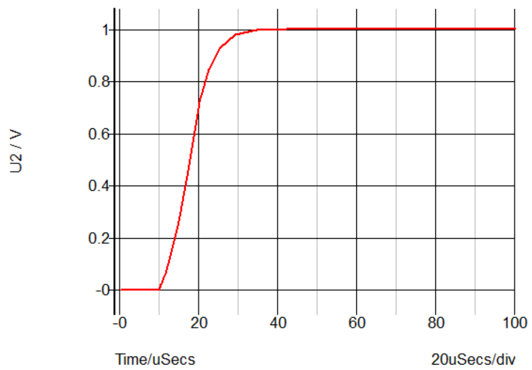
$$\begin{pmatrix} Y+pC & -Y & -pC & 0 \\ -Y & 2(Y+pC) & 0 & -pC \\ -pC & 0 & 2(Y+pC) & -pC \\ 0 & -Y & -pC & Y+pC \end{pmatrix}$$

$$K_{U0}(p) = \frac{D_{14}}{D_{11}} = ... = \frac{1 + (pCR)^2}{1 + 4pCR + (pCR)^2}$$

$$|K_{U0}(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{4\frac{\omega}{\omega_0}}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}\right)^2}} \qquad \varphi = -\arctan\frac{4\frac{\omega}{\omega_0}}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \qquad \omega_0 = \frac{1}{RC}$$



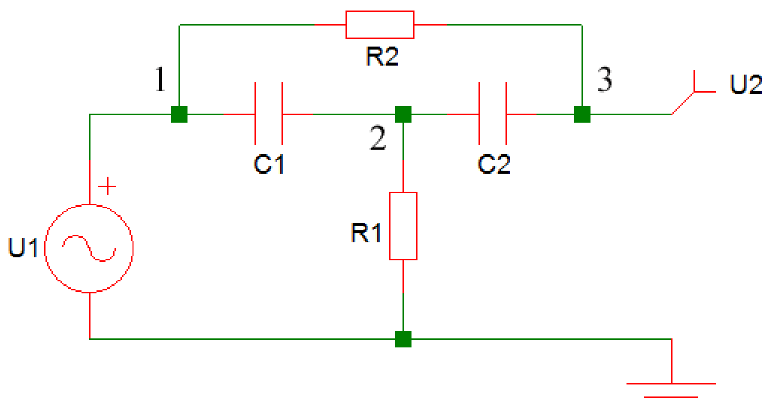
amplitúdová prenosová charakteristika



prechodová charakteristika

ide o pásmovú zádrž (PZ) - tzv. *dvojitý T-článok RC* - pri ω_0 je fázový posuv nulový a prenos napätia klesá k nule
šírka pásma zádrže (pokles na $\frac{1}{\sqrt{2}}$ maxima prenosu) je $B(\omega) = 4\omega_0$
kvalita je $Q = \frac{\omega_0}{B(\omega)} = 0,25$

•



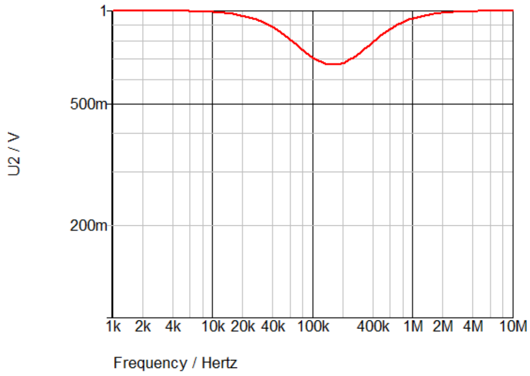
$\frac{1}{R_1} = Y_1$, $\frac{1}{R_2} = Y_2$
$C_1 = C_2 = C$

$$\begin{pmatrix} Y_2 + pC & -pC & -Y_2 \\ -pC & Y_1 + 2pC & -pC \\ -Y_2 & -pC & Y_2 + pC \end{pmatrix}$$

$$K_{U0}(p) = \frac{D_{13}}{D_{11}} = ... = \frac{Y_1Y_2 + 2pCY_2 + (pC)^2}{Y_1Y_2 + pC(Y_1 + 2Y_2) + (pC)^2}$$

$$|K_{U0}(\omega)| = \sqrt{\frac{\left(\frac{2}{k}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}{\left(k + \frac{2}{k}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}} \qquad \varphi = \arctan \frac{k\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}{2 + \frac{4}{k^2} + \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}$$

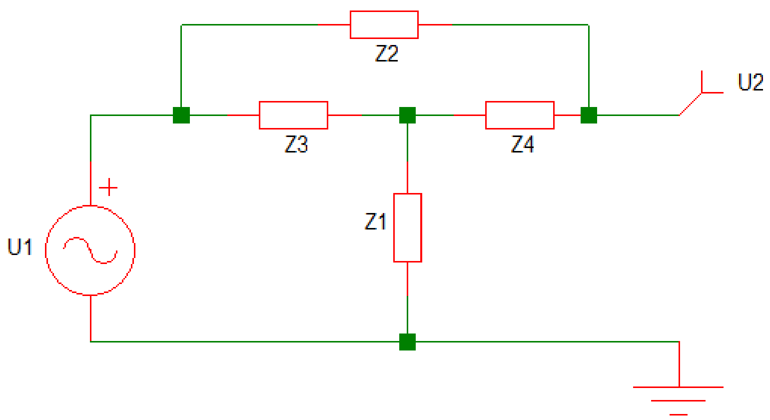
kde $\omega_0 = \frac{1}{C\sqrt{R_1 R_2}}$ a $k = \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}$ - s nárastom k klesá prenos napätia



amplitúdová prenosová charakteristika

ide o pásmovú zádrž (PZ) - tzv. *premostený T-článok RC* - oproti dvojitému T-článku je jednoduchší

je možné modifikovať premostený T-článok tak aby prenos napätia v strede pásma bol nulový?



$\frac{1}{Z_1} = Y_1$, $\frac{1}{Z_2} = Y_2$

$\frac{1}{Z_3} = \frac{1}{Z_4} = Y$

$$\begin{pmatrix} Y_2 + Y & -Y & -Y_2 \\ -Y & Y_1 + 2Y & -Y \\ -Y_2 & -Y & Y_2 + Y \end{pmatrix}$$

$$K_{U0}(p) = \frac{D_{13}}{D_{11}} = 0 \quad \Rightarrow \quad D_{13} = 0 \text{ alebo } D_{11} = \infty \text{ (čo je nemožné)}$$

$$D_{13} = 0 \quad \Rightarrow \quad Z_1 Z_2 + 2ZZ_1 + Z^2 = 0$$

ak $Z = \frac{1}{pC}$ a $Z_1 = R$, potom $\qquad Z_2 = ... = \frac{1}{\omega^2 C^2 R} + i\frac{2}{\omega C} = r + i\omega L$

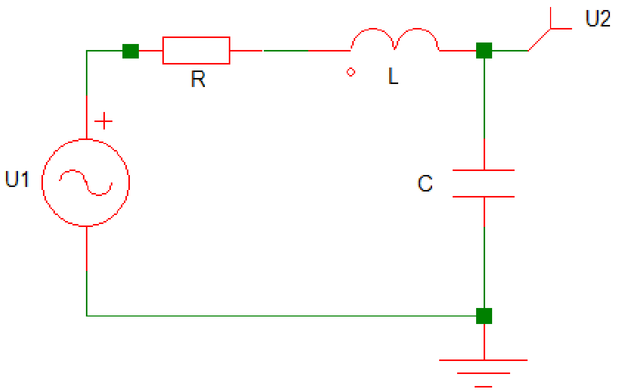
$$r = \frac{1}{\omega^2 C^2 R} \qquad L = \frac{2}{\omega^2 C}$$

Z_2 teda predstavuje *reálnu* cievku (so sériovým odporom vinutia) - *dá* sa zrealizovať ak $Z = \frac{1}{pC}$ a $Z_2 = R$, potom $\qquad Y_1 = ... = \omega^2 C^2 R + \frac{2\omega C}{i} = \frac{1}{r'} + \frac{1}{i\omega L'}$

$$r' = \frac{1}{\omega^2 R C^2} \qquad\qquad L' = \frac{1}{2\omega^2 C}$$

Z_1 teda predstavuje *ideálnu* cievku *paralelne* premostenú odporom - *nedá* sa zrealizovať

•

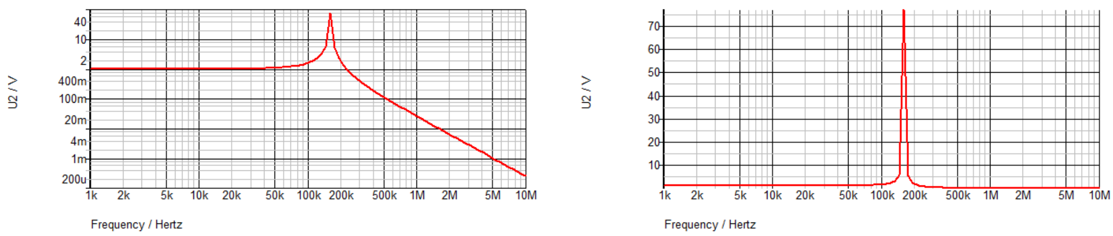


$$K_{U0}(p) = \frac{1}{1 + p^2 LC + pCR}$$

$$|K_{U0}(\omega)| = ... = \frac{Q}{\sqrt{1 + Q^2\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR}$$

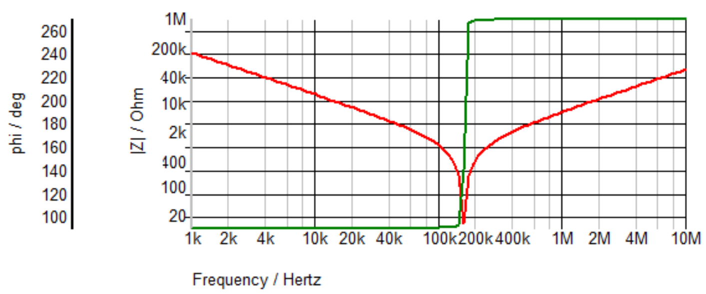
v rezonancii $\quad |K_{U0}(\omega)| = Q \quad$ - rezonančné zosilnenie napätia - *napäťová* rezonancia



amplitúdová prenosová charakteristika v log a lin škále

ide o sériový rezonančný RLC PP, šírka pásma je určená podmienkou

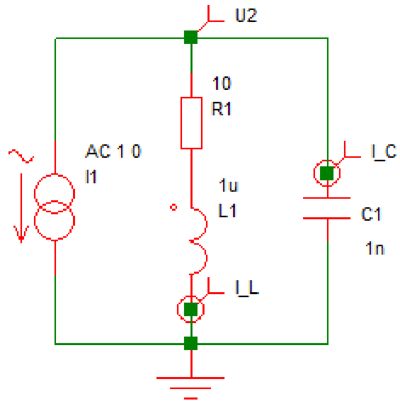
$$\tan\varphi = -\frac{\omega CR}{1 - \omega^2 LC} = \pm 1 \qquad\qquad B(\omega) = \omega_0^2 RC = \frac{R}{L} = \frac{\omega_0}{Q}$$



$$Z(p) = R + pL + \frac{1}{pC}$$

$$Z(\omega_0) = R$$

•



ide o *paralelný* rezonančný obvod

$$Z(p) = \frac{R + pL}{1 + p^2LC + pCR}$$

pre $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ je

$$Z(\omega_0) = \frac{L}{CR} - i\sqrt{\frac{L}{C}}$$

impedancia pri ω_0 *nemá rezonančný charakter* (nie je *čisto reálna*)

impedancia je *reálna* ak čitateľ aj menovateľ majú *rovnaké fázové posuvy*

$$\frac{\omega L}{R} = \frac{\omega CR}{1 - \omega^2 LC} \qquad \underline{\omega = \omega_p = \omega_0\sqrt{1 - \frac{1}{Q^2}}}$$

pre kvalitné rezonančné obvody (R malé, $Q \in \langle 50, 500\rangle$) je $\omega_p \cong \omega_0$

ak $R \ll \omega L$ a $\omega_p \cong \omega_0$

$$Z(\omega_0) = \frac{L}{RC} = Q^2R = \frac{\omega_0^2L^2}{R} = \frac{1}{\omega_0^2C^2R} = R_0$$

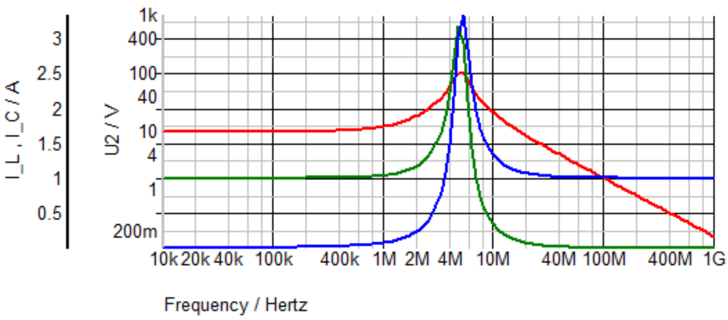
tento *rezonančný* odpor *nie je jednosmerným* odporom (dá sa namerať striedavým prúdom v rezonancii)!

frekvenčná závislosť modulu impedancie je ($R \ll \omega L$) $\qquad |Z(\omega)| = \frac{\omega L}{\sqrt{(1-\omega^2LC)^2+(\omega CR)^2}}$

pri *malom* rozladení z rezonancie $\quad \Delta\omega = \omega_0 - \omega \quad$ platí

$$\omega_0 + \omega = 2\omega + \Delta\omega \cong 2\omega \qquad 1 - \omega^2LC = \frac{2\omega\Delta\omega}{\omega_0^2} \qquad \underline{|Z(\omega)| = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\Delta\omega}{\omega_0}Q\right)^2}}}$$

pre hranice rezonančného pásma platí $\quad |Z(\omega)| = \frac{R_0}{\sqrt{2}} \quad$ a teda $\quad B(\omega) = 2\Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q}$



U_2 - červená (charakterizuje impedanciu pri amplitúde prúdu $1A$)
I_L - zelená
I_C - modrá
(značenie podľa schémy)

striedavý prúd odoberaný z generátora (U) je v rezonancii $\quad I_r = \frac{U}{R_0} = \frac{U}{Q^2R}$

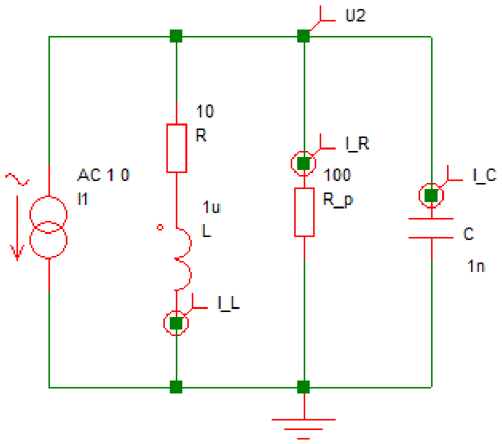
prúdy kondenzátorom a cievkou v rezonancii sú

$$I_C = i\omega_0 CU \qquad \frac{|I_C|}{I_r} = ... = \underline{Q} \qquad I_L = \frac{U}{R + i\omega L} \qquad \frac{|I_L|}{I_r} = ...\frac{Q^2}{\sqrt{1+Q^2}} \cong \underline{Q}$$

$$\left(\frac{I_C}{I_L}\right)_{rez} = ... = -1 + i\frac{1}{Q} \cong -1$$

uzavretým obvodom RLC teda v rezonancii preteká Q-krát väčší prúd než budiaci prúd z generátora - *prúdová* rezonancia

•



$$Z(p) =$$

$$= \frac{R + pL}{\left(\frac{R}{R_p} + 1\right) 1 + pLC\left(\frac{1}{CR_p} + \frac{R}{L}\right) + p^2 LC}$$

rezonancia pri rovnakom fázovom posuve čitateľa a menovateľa

$$\frac{\omega L}{R} = \frac{\omega LC\left(\frac{1}{CR_p} + \frac{R}{L}\right)}{\frac{R}{R_p} + 1 - \omega^2 LC}$$

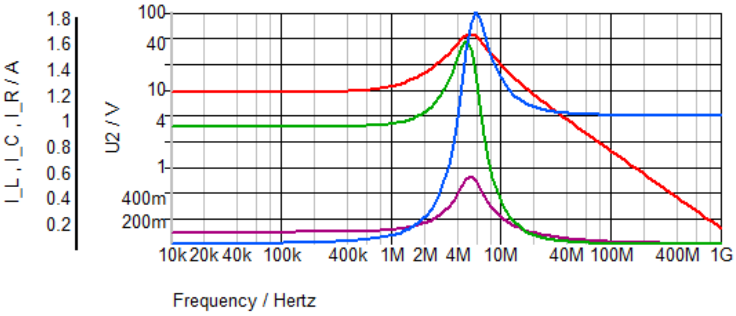
$$\omega_t = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{C}{L} R^2}$$

ak $R \ll \omega_0 L$ $(Q \gg 1)$ a $R \ll R_p$, potom $\omega_t \cong \omega_0$

$$Z(\omega_0) = \dots = \frac{R_0}{1 + \frac{R_0}{R_p}} = R_{0t} < R_0$$

kvalita *zaťaženého* PRO sa zmení z $Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \omega_0 R_0 C$ na

$$Q_t = \omega_0 R_{0t} C = \frac{Q}{1 + \frac{R_0}{R_p}} < Q$$



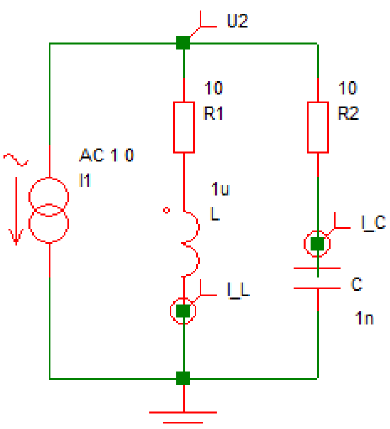
U_2 - červená (charakterizuje impedanciu)

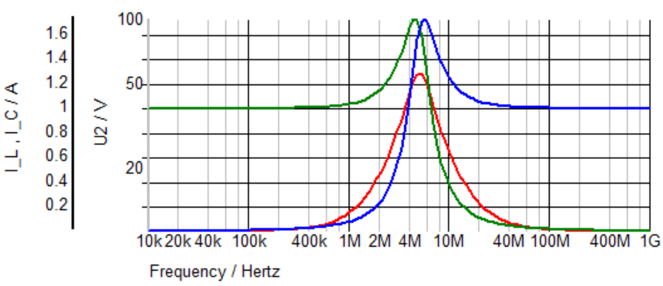
I_L - zelená

I_C - modrá

I_R - fialová

•





U_2 - červená (charakterizuje impedanciu)

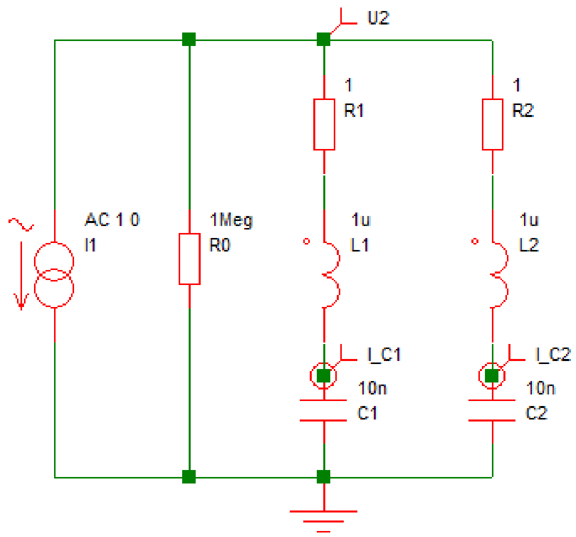
I_L - zelená $\qquad$ I_C - modrá

$$Z(p) = \dots = \frac{R_1\left(1 + p^2 LC\frac{R_2}{R_1}\right) + pC\left(R_1 R_2 + \frac{L}{C}\right)}{1 + pC(R_1 + R_2) + p^2 LC}$$

voľbou R_1 , R_2 sa dá dosiahnuť aby impedancia obvodu *nezávisela* od frekvencie (tj. nulovosť fázového posuvu) - musí platiť:
1.) $\frac{R_2}{R_1} = 1$ (aby si odpovedali *reálne* časti čitateľa a menovateľa)
2.) $R_1 + R_2 = R_2 + \frac{L}{CR_1}$ (zhoda imaginárnych častí)

$$R_1 = R_2 = \sqrt{\frac{L}{C}} \qquad\qquad Z = \sqrt{\frac{C}{L}}$$

dochádza pritom ku strate rezonančného charakteru

- 

viacnásobná rezonancia

$$Z_1(i\omega) = R_1 + iX_1(\omega)$$

$$X_1(\omega) = \omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}$$

$$Z_2(i\omega) = R_2 + iX_2(\omega)$$

$$X_2(\omega) = \omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}$$

$$Z(i\omega) = Z_1(i\omega) \parallel Z_2(i\omega)$$

$$Z(i\omega) = \ldots = \frac{(R_1R_2 - X_1X_2)(R_1+R_2) + (X_1R_2 + R_1X_2)(X_1+X_2)}{(R_1+R_2)^2 + (X_1+X_2)^2} +$$

$$+ i\frac{(X_1R_2 + R_1X_2)(R_1+R_2) - (R_1R_2 - X_1X_2)(X_1+X_2)}{(R_1+R_2)^2 + (X_1+X_2)^2}$$

v rezonancii je $\Im\{Z(i\omega)\} = 0 \quad \Rightarrow \quad X_1(R_2^2 + X_2^2) + X_2(R_1^2 + X_1^2) = 0$

nech $R_1 \ll X_1$, $R_2 \ll X_2 \quad \Rightarrow \quad X_1X_2(X_1 + X_2) = 0$

je splnené ak $\quad X_1 = 0 \quad$ alebo $\quad X_2 = 0 \quad$ alebo $\quad (X_1 + X_2) = 0$

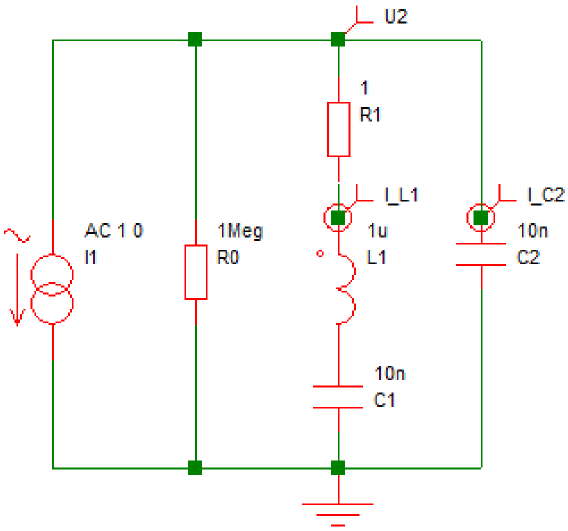
prípady $X_1 = 0$, $X_2 = 0$ odpovedajú *sériovým* rezonanciám na frekvenciách

$$\omega_{s1,2} = \frac{1}{\sqrt{L_{1,2}C_{1,2}}}$$

prípad $(X_1 + X_2) = 0$ odpovedá *paralelnej* rezonancii na frekvencii

$$\omega_p = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{C_1C_2(L_1 + L_2)}}$$

•



$$Z(p) =$$

$$= \frac{1 + pR_1C_1 + p^2L_1C_1}{p(C_1 + C_2 + p^2L_1C_1C_2) + p^2R_1C_1C_2}$$

pri $\omega = \frac{1}{\sqrt{L_1C_1}} = \omega_s$ sa minimalizuje čitateľ - *sériová* rezonancia odpovedajúca podmienke $X_1 = 0$

$$Z = ... = \frac{R_1}{1 + pC_2R_1} \to R_1$$

$$(\text{pre } R_1 \ll X_2)$$

podmienka $X_2 = 0$ je nerealizovateľná (chýba L_2)

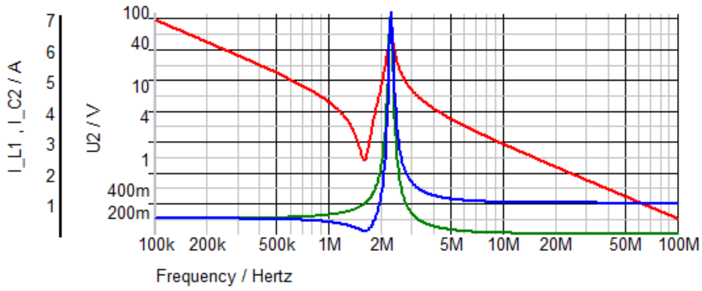
podmienke *paralelnej* rezonancie $X_1 + X_2 = 0$ odpovedá $\Im\{\text{menovateľ}\} = 0$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{L_1C_1C_2}} = \omega_s\sqrt{1 + \frac{C_1}{C_2}}$$

dvojnásobná rezonancia, ak $C_1 \ll C_2$ potom $\omega_p \cong \omega_s\left(1 + \frac{C_1}{2C_2}\right)$ - ω_p len o málo väčšie než ω_s

$$Z = ... = \frac{-X_1X_2}{R_1} = \frac{X_1^2}{R_1} = \frac{X_2^2}{R_1}$$

rezonančný odpor pri ω_p je určený reaktanciou jednotlivých úsekov *ekvivalentne*

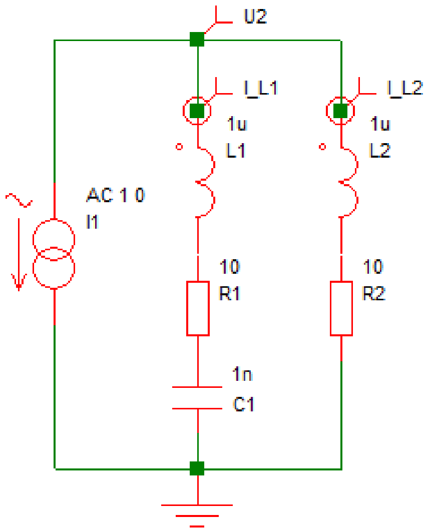


U_2 - červená (charakterizuje impedanciu)

I_{L1} - zelená

I_{C2} - modrá

•



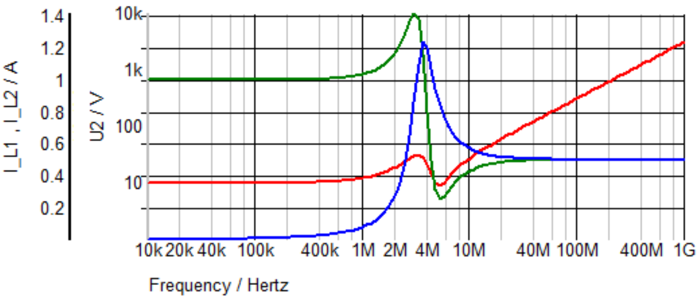
nech L_1, L_2 *nie sú* magneticky viazané

sériová rezonancia pri $\omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$, pri ktorej je

$$Z \cong R_1$$

paralelná rezonancia pri $\omega_p = \frac{1}{\sqrt{(L_1+L_2)C_1}}$ $(\omega_p < \omega_s)$, pri ktorej je

$$Z = \frac{X_1^2}{R_1 + R_2} = \frac{X_2^2}{R_1 + R_2}$$



U_2 - červená (charakterizuje impedanciu)

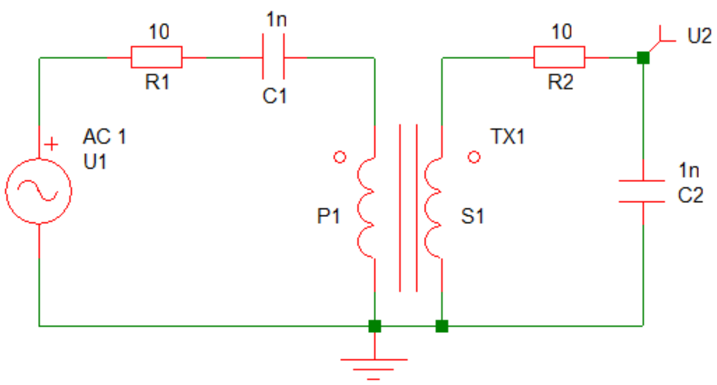
I_{L1} - zelená

I_{C2} - modrá

ak L_1, L_2 *sú* magneticky viazané, $M = k\sqrt{L_1 L_2}$, podmienke $X_1 + X_2 = 0$ odpovedá

$$\omega(L_1 + M + L_2 + M) - \frac{1}{\omega C_1} \qquad\qquad \omega_p = \frac{1}{\sqrt{(L_1 + L_2 + 2M)C_1}}$$

•



dvojokruhový pásmový priepust

$L_1 = L_2 = L$

$C_1 = C_2 = C$

$R_1 = R_2 = R$

$M = k\sqrt{L_1 L_2} = kL$

metóda OP:

$$\left[R + \left(pL + \frac{1}{pC}\right)\right] I_1 - pMI_2 = U_1$$

$$-pMI_1 + \left[R + \left(pL + \frac{1}{pC}\right)\right] I_2 = 0$$

$$U_2 = \frac{I_2}{pC} \qquad\qquad I_2 = \frac{D_2}{D} = U_1 \frac{D_{12}}{D}$$

$$K_{U0}(p) = \frac{U_2}{U_1} = ... = \frac{\frac{M}{C}}{R^2 + p^2M^2 + \left(pL - \frac{1}{pC}\right)^2 + 2R\left(pL - \frac{1}{pC}\right)}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad \varepsilon = 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \qquad d = \frac{1}{Q} = \frac{R}{\omega_0 L} \quad \text{(tlmenie)}$$

v okolí rezonancie platí

$$K_{U0}(\varepsilon) = ... = \frac{k}{d^2 + k^2 - \varepsilon^2 + 2i\varepsilon d}$$

$$|K_{U0}(\varepsilon)| = ... = \frac{k}{\sqrt{(d^2+k^2)^2 + \varepsilon^4 + 2\varepsilon^2(d^2-k^2)}}$$

pre $\omega \to 0, \infty$ je $|K_{U0}(\varepsilon)| \to 0$ - existuje *maximum* prenosu

$\frac{d(\text{menovateľ})}{d\varepsilon} = 0:$ $\quad 4\varepsilon(d^2 - k^2) + 4\varepsilon^3 = 0 \quad$ $\varepsilon_0 = 0$ alebo $\varepsilon_{1,2}^2 = k^2 - d^2$

1.) ak $k > d$, $kQ > 1$ - *nadkritická* väzba : existuje relatívne *minimum* medzi dvoma relatívnymi maximami pri

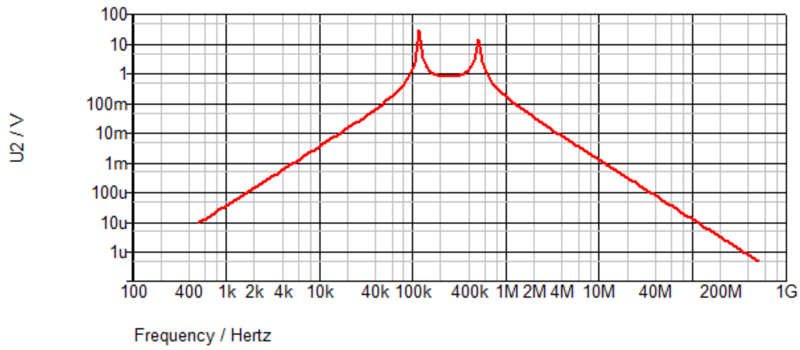
$$\omega_{1,2} = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 \pm \varepsilon_{1,2}}} = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 \pm \sqrt{k^2 - d^2}}}$$

2.) ak $k = d$, $kQ = 1$ - *kritická* väzba : sedlo vymizne, $\varepsilon_{1,2}$ splynú s ε_0

$$|K_{U0}(\varepsilon)| = \frac{k}{\sqrt{4d^4 + \varepsilon^4}}$$

3.) ak $k < d$, $kQ < 1$ - *podkritická* väzba : *jediné* maximum pri ω_0

$$|K_{U0}(\varepsilon = 0)| = \frac{k}{d^2 + k^2}$$



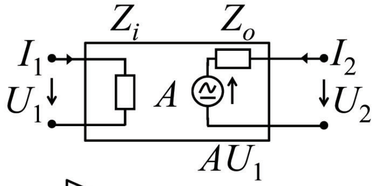
čím väčšie kQ , tým ostrejšie stúpanie a tým hlbšie sedlo (max do -3dB)

spojením s pásmovým priepustom ladeným na stred sedla vznikne takmer ideálny PP

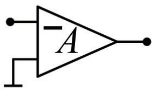
AKTÍVNE PRENOSOVÉ SIETE S OPERAČNÝMI ZOSILŇOVAČMI

operačné zosilňovače (OZ) sú zariadenia s *veľkým zosilnením* A ($\cong 10^3 - 10^9$) v širokom intervale frekvencií, *veľkým vstupným* odporom a *malým výstupným* odporom
pre svoju činnosť potrebujú OZ napájanie $\pm U_p$ s výrobcom predpísanou (maximálnou) hodnotou
výrobca spravidla doporučuje zapojenie na kompenzáciu výstupnej nuly (offsetu) a frekvenčnej charakteristiky
púzdro OZ má teda okrem signálnych vývodov (vstupy, výstup) aj vývody napájania a kompenzácie, ktoré v našich schémach budeme ignorovať
v *dovolenom* intervale amplitúd signálu (danom napájacím napätím U_p) sú OZ *lineárne*

základným signálnym vstupom OZ je tzv. *invertujúci* vstup - pre tento vstup sa OZ dá nahradiť 4-pólovou schémou



A - *invertujúce* zosilnenie
znamienko AU_1 vždy *opačné* ako U_1



schématické označenie

odpovedajúca sústava admitančných rovníc je

$$I_1 = Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2 \qquad\qquad I_2 = Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2$$

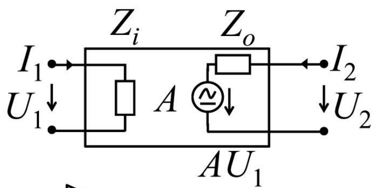
vnútornou stavbou je zaručená *nulová* spätná väzba $\qquad Y_{12} = 0$
platí teda

$$I_1 = Y_{11}U_1 = Y_iU_1 = \frac{U_1}{Z_i}$$

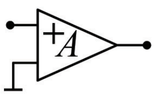
$$U_2 = I_2Z_o - AU_1 \qquad \Rightarrow \qquad I_2 = \frac{AU_1}{Z_o} + \frac{U_2}{Z_o} = AY_oU_1 + Y_oU_2$$

admitančná matica pre *invertujúci* vstup je teda $\begin{pmatrix} Y_i & 0 \\ AY_o & Y_o \end{pmatrix}$

druhým signálnym vstupom je *neinvertujúci* vstup - pre tento vstup sa OZ dá nahradiť 4-pólovou schémou



A - *neinvertujúce* zosilnenie
znamienko AU_1 vždy *rovnaké* ako U_1



schématické označenie

odpovedajúca sústava admitančných rovníc je

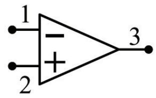
$$I_1 = Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2 \qquad\qquad I_2 = Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2$$

rovnako platí $\; Y_{12} = 0$, a teda

$$I_1 = Y_iU_1 \qquad\qquad I_2 = -AY_oU_1 + Y_oU_2$$

admitančná matica pre *neinvertujúci* vstup je teda $\begin{pmatrix} Y_i & 0 \\ -AY_o & Y_o \end{pmatrix}$

celý OZ s oboma vstupmi (s identickými impedanciami) a *spoločným* výstupom má teda admitančnú maticu

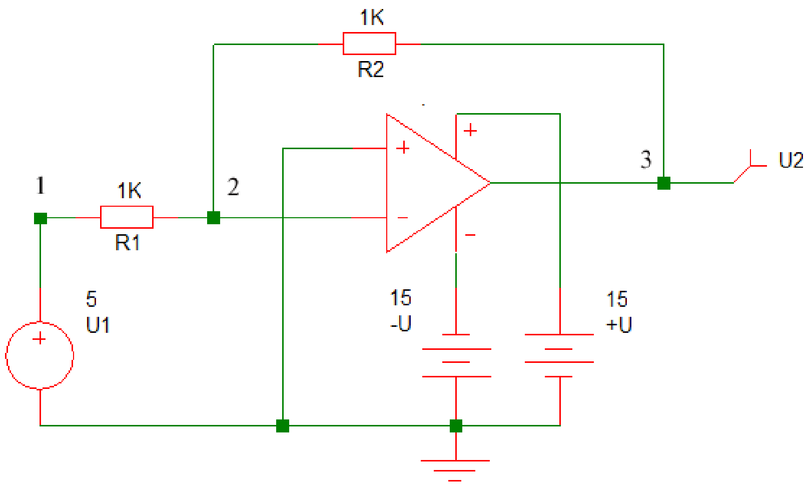


$$\begin{pmatrix} Y_i & 0 & 0 \\ 0 & Y_i & 0 \\ AY_o & -AY_o & Y_o \end{pmatrix}$$

ak je OZ súčasťou prenosovej siete, matica (UP) tejto siete je kombináciou (súčtom) matice bez OZ a matice OZ

ZOSILŇOVAČE

•
invertujúci zosilňovač



(napájanie OZ pri analýze ignorujeme)

matica UP má tvar (odpory zovšeobecníme na impedancie)

$$\begin{pmatrix} Y_1 & -Y_1 & 0 \\ -Y_1 & Y_1+Y_2+Y_i & -Y_2 \\ 0 & AY_o-Y_2 & Y_2+Y_o \end{pmatrix}$$

$$K_{U0} = \frac{D_{13}}{D_{11}} = \ldots \frac{-\frac{Y_1}{Y_2}}{\frac{Y_1+Y_i+Y_o(1+A)}{AY_o-Y_2} + \frac{Y_o(Y_1+Y_i)}{Y_2(AY_o-Y_2)}}$$

ak uvážime *veľmi* veľké A, Y_o a *veľmi* malé Y_i : $\quad Y_0(1+A) \gg Y_1+Y_i \quad , \quad AY_o \gg Y_2$
potom

$$K_{U0} \cong \frac{-\frac{Z_2}{Z_1}}{1+\frac{1}{A}+\frac{Z_2}{Z_1A}+\frac{Z_2}{Z_iA}}$$

pre $A \to \infty$ je menovateľ $\to 1$ $\qquad K_{U0} \cong -\frac{Z_2}{Z_1}$

v tejto limite sú vstupný a výstupný odpor zosilňovača naprázdno

$$Z_{in0} = \frac{D_{11}}{D} = \ldots \cong Z_1 \qquad\qquad Z_{out0} = \frac{D_{33}}{D} = \ldots \to 0$$

ak nechceme zmenou zosilnenia meniť vstupný odpor zosilňovača (R_1), meníme zosilnenie *len* zmenou R_2

v tejto (prakticky použiteľnej) limite sa matica OZ dá zjednodušiť

$$\begin{pmatrix} Y_i & 0 & 0 \\ 0 & Y_i & 0 \\ AY_o & -AY_o & Y_o \end{pmatrix} \xrightarrow[Y_i \to 0]{} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ AY_o & -AY_o & Y_o \end{pmatrix} = AY_o \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & \frac{1}{A} \end{pmatrix}$$

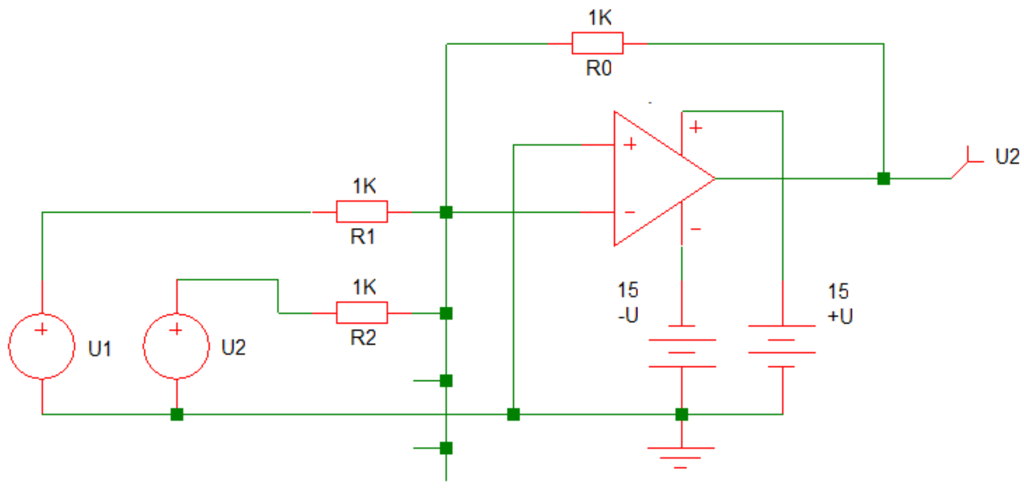
v limite $A \to \infty$ je $\frac{1}{A} \to 0$, a pri výpočte prenosových funkcií sa výraz AY_o ($\to \infty$) nachádza v čitateli aj menovateli, a teda z výpočtu vypadne - v matici UP ho teda *neuvádzame*
matica UP sa potom modifikuje tak, že v riadku odpovedajúcemu uzlu na *výstupe* OZ sú len hodnoty:

1 v stĺpci prislúchajúcom uzlu na *invertujúcom* vstupe OZ
-1 v stĺpci prislúchajúcom uzlu na *neinvertujúcom* vstupe OZ
0 v *ostatných* stĺpcoch

impedancia uzla na invertujúcom vstupe OZ je (naprázdno)

$$Z_{20} = \frac{D_{22}}{D} = \ldots \cong \frac{Z_2}{1+A} \to 0$$

tento uzol nazývame *virtuálnou nulou* - do tohto uzla možno priviesť cez odpory ďalšie napätia bez ovplyvňovania ich zdrojov

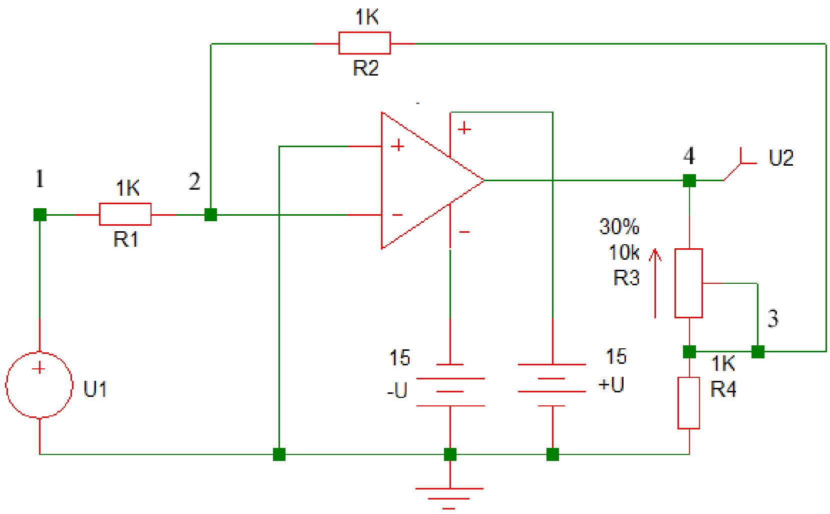


dostávame *sčítací* zosilňovač s výstupným napätím (naprázdno)

$$U_o = -\left(U_1\frac{R_0}{R_1} + U_2\frac{R_0}{R_2} + \ldots\right)$$

pozn.: výraz pre napäťové zosilnenie naprázdno sa dá získať aj z nasledujúcej úvahy:
kvôli "nekonečnému" vstupnému odporu OZ je prúd I_1 odporom R_1 rovný prúdu I_2 odporom R_2
keďže uzol 2 je virtuálna nula, platí

$$U_1 = U_{12} = I_1R_1 \qquad\qquad U_2 = U_{32} = -I_2R_2 = -I_1R_2 = -\frac{R_2}{R_1}U_1$$



$$\begin{pmatrix} Y_1 & -Y_1 & 0 & 0 \\ -Y_1 & Y_1+Y_2 & -Y_2 & 0 \\ 0 & -Y_2 & Y_2+Y_3+Y_4 & -Y_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \qquad Y_2 \ll Y_3, Y_4$$

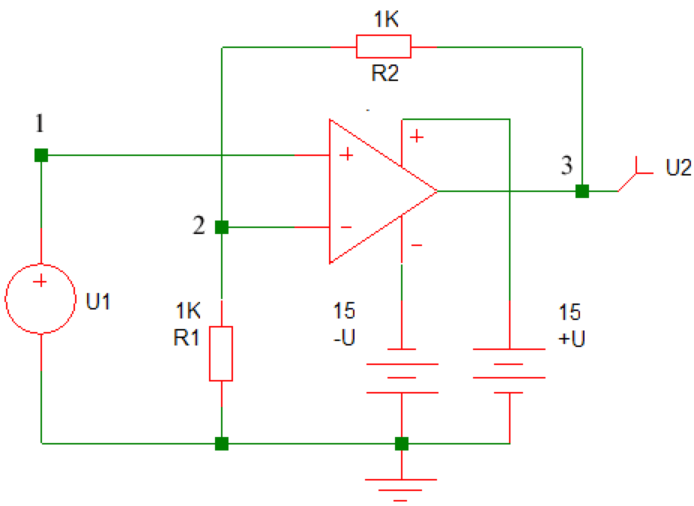
$$K_{U0} = \frac{D_{14}}{D_{11}} = ... \cong -\frac{R_2}{R_1}\left(1+\frac{R_3}{R_4}\right) \qquad R_{in0} = \frac{D_{11}}{D} = ... = R_1$$

ak vstupný odpor aj zosilnenie zosilňovača majú byť vysoké (R_1 veľké, tj. R_2 ešte väčšie v základnom zapojení), dá sa veľké zosilnenie dosiahnúť veľkým *pomerom* R_3/R_4

pozn.: z rovnosti prúdov cez R_1 a R_2 vyplýva

$$\frac{U_1}{R_1} = -\frac{U_2}{R_2}\left(\frac{R_2 \parallel R_4}{R_3 + R_2 \parallel R_4}\right)$$

- neinvertujúci zosilňovač



matica UP má (po zovšeobecnení na impedancie a vo vyššie uvedených limitách) tvar

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_1+Y_2 & -Y_2 \\ -1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

vstupný odpor zosilňovača naprázdno je

$$Z_{in0} = \frac{D_{11}}{D} = ...\infty$$

zosilňovač *nezaťažuje* zdroj signálu

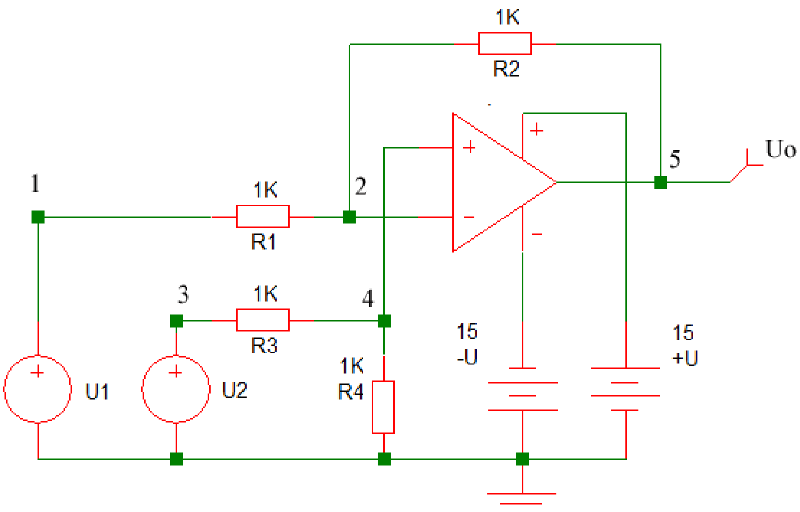
prenos napätia naprázdno je

$$K_{U0} = \frac{D_{13}}{D_{11}} = ...\frac{Y_1 + Y_2}{Y_2} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

ak $R_2 = 0$, $K_{U0} = 1$ - *napäťový sledovač* (bez fázového posuvu)

pozn.: OZ sa chová tak, aby rozdiel potenciálov medzi + a - vstupom bol *nulový* - obvod teda pracuje ako napäťový delič v opačnom smere

- diferenčný zosilňovač



matica UP má (predpokladáme pre oba vstupy OZ *rovnaké* a *veľmi veľké* zosilnenie aj vstupný odpor) tvar

$$\begin{pmatrix} Y_1 & -Y_1 & 0 & 0 & 0 \\ -Y_1 & Y_1+Y_2 & 0 & 0 & -Y_2 \\ 0 & 0 & Y_3 & -Y_3 & 0 \\ 0 & 0 & -Y_3 & Y_3+Y_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

zaujíma nás zosilnenie *rozdielu* vstupných napätí $K_{U0r} = \frac{U_o}{U_1 - U_2}$
vypočítame ho ako superpozíciu

$$K_{U0r} = \left(\frac{U_o}{U_1}\right)_{U_2=0} + \left(\frac{U_o}{U_2}\right)_{U_1=0}$$

nulovanie potenciálu 1 resp. 2 znamená vyškrtnutie príslušného riadka aj stĺpca z matice UP

$$\left(\frac{U_o}{U_1}\right)_{U_2=0} = \frac{D_{33,15}}{D_{33,11}} \qquad \left(\frac{U_o}{U_2}\right)_{U_1=0} = \frac{D_{11,35}}{D_{11,33}}$$

$$U_o = ... = \frac{(D_{33,15} - D_{11,35})(U_1 - U_2) + (D_{33,15} + D_{11,35})(U_1 + U_2)}{2D_{33,11}}$$

požadujeme pritom aby U_0 záviselo len od $(U_1 - U_2)$ a nie od $(U_1 + U_2)$, teda

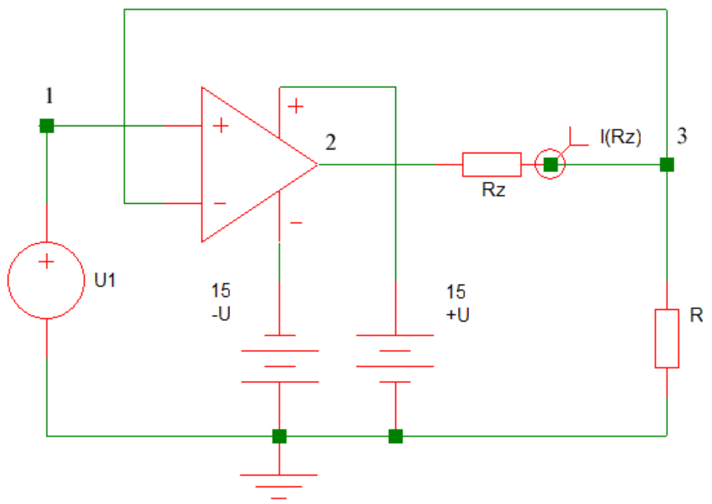
$$D_{33,15} = -D_{11,35} \qquad\qquad Y_1(Y_3 + Y_4) = Y_3(Y_1 + Y_2)$$

čo sa dá dosiahnuť vhodným dimenzovaním parametrov zosilňovača

$$R_2 = R_4 \qquad\qquad R_1 = R_3$$

PREVODNÍKY NAPÄTIA NA PRÚD

•



$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & -Y_z & Y_z + Y \end{pmatrix}$$

$$I_{R_z} = \frac{U_2 - U_3}{R_z}$$

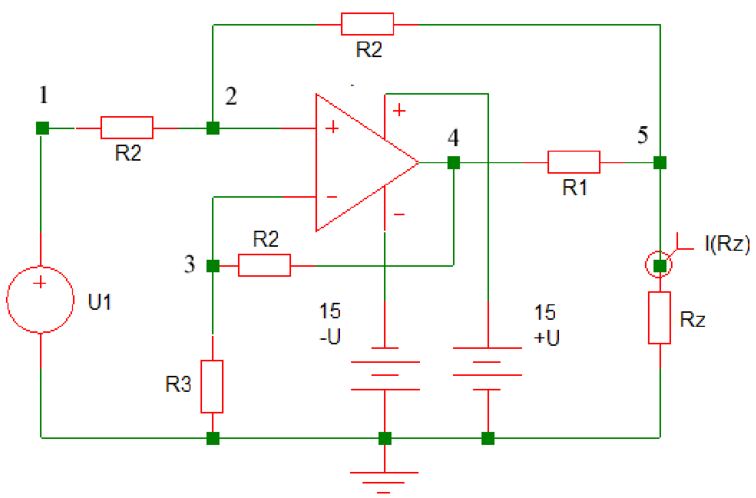
$$U_2 = U_1 \frac{D_{12}}{D_{11}}$$

$$U_3 = U_1 \frac{D_{13}}{D_{11}}$$

$$I_{R_z} = \frac{U_1}{R_z}\frac{Y}{Y_z} = \underline{\frac{U_1}{R}}$$

prúd *plávajúcou* (tj. nepripojenou žiadnym pólom k ref. uzlu) záťažou R_z nezávisí od jej hodnoty - *ideálny generátor prúdu*

•



$$\begin{pmatrix} Y_2 & -Y_2 & 0 & 0 & 0 \\ -Y_2 & 2Y_2 & 0 & 0 & -Y_2 \\ 0 & 0 & Y_2+Y_3 & -Y_2 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -Y_2 & 0 & -Y_1 & Y_1+Y_2 \end{pmatrix}$$

záťaž R_z nezaraďujeme do matice, ale počítame K_U namiesto K_{U0} !

$$K_U = \frac{D_{15}R_z}{D_{11,55} + D_{11}R_z}$$

$$I_{R_z} = \frac{U_5}{R_z} = \frac{U_1}{\frac{D_{11,55}}{D15} + \frac{D_{11}}{D_{15}}R_z}$$

ak prúd nemá závisieť od záťaže, musí platiť $D_{11} = 0$

$$Y_2(Y_1Y_2 + Y_2^2 - Y_1Y_3) = 0$$

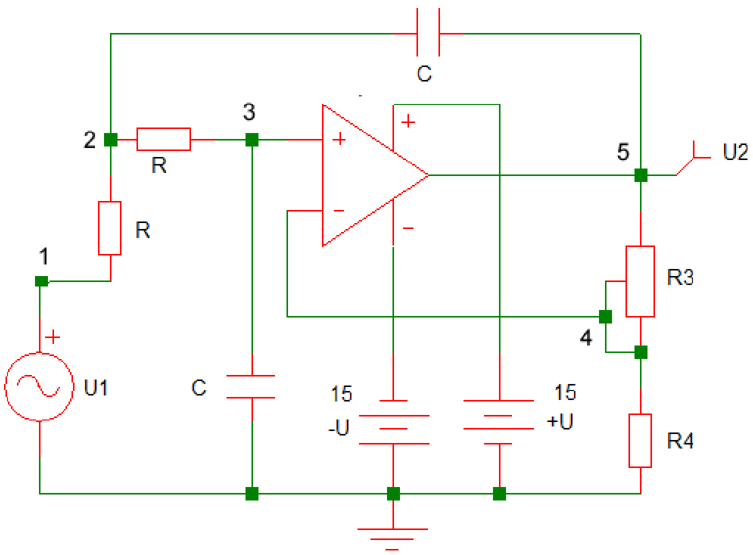
$$R_3 = \frac{R_2^2}{R_1 + R_2}$$

prúd záťažou je potom

$$I_{R_z} = \frac{U_1}{\frac{D_{11,55}}{D_{15}}} = ... = \underline{\frac{U_1}{R_1 \parallel R_2} \cong \frac{U_1}{R_1}} \qquad \text{ak} \quad R_1 \ll R_2 \quad (R_3 \cong R_2)$$

AKTÍVNE FILTRE

- dolnofrekvenčný priepust 2. rádu



pre $\omega = 0$ sú kondenzátorý prerušené, odpormi R *netečie* prúd (nekonečný vstupný odpor), na uzloch 1,2,3 a 4 je teda *rovnaký* potenciál (napätie medzi + a - vstupom OZ je *nulové*), a teda

$$K_{U0} = 1 + \frac{R_3}{R_4} = K$$

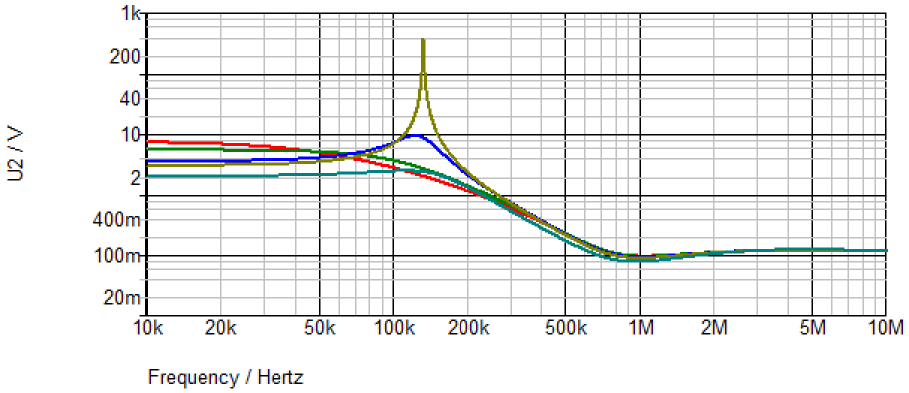
(napäťový delič v opačnom smere - neinvertujúci zosilňovač)

$$\begin{pmatrix} Y & -Y & 0 & 0 & 0 \\ -Y & 2Y+pC & -Y & 0 & -pC \\ 0 & -Y & Y+pC & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_1+Y_2 & -Y_2 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$K_{U0}(p) = \frac{D_{15}}{D_{11}} = ...$$

$$= \frac{K}{1 + pCR(3-K) + (pCR)^2}$$

$$|K_{U0}(\omega)| = \frac{K}{\sqrt{\left(1-\frac{\omega^2}{\omega_h^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_h}[3-K]\right)^2}} \qquad \omega_h = \frac{1}{RC}$$



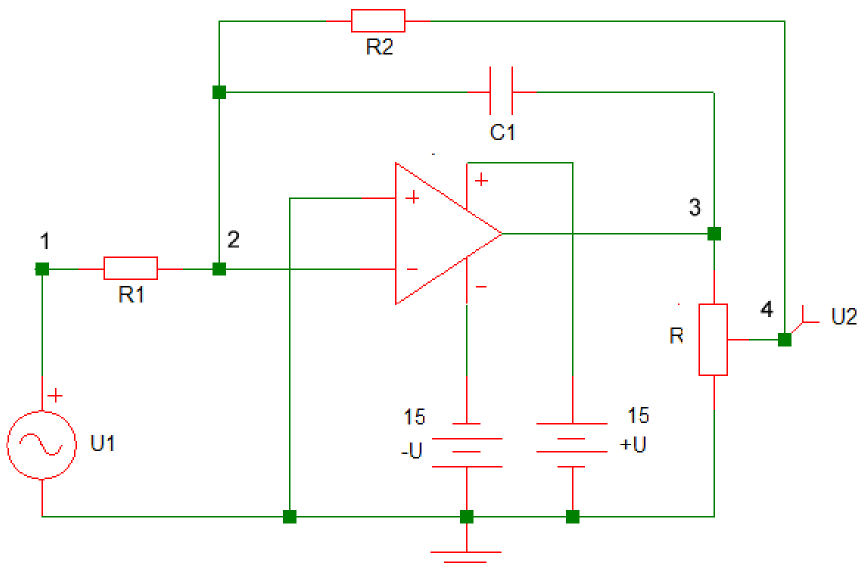
napäťový prenos pre rôzne hodnoty K

v okolí $K = 3$ má filter charakter *pásmového* priepustu

$$|K_{U0}(\omega \to \omega_h, K = 3)| \to \infty$$

voľbou K nastavujeme filter ako DP alebo PP

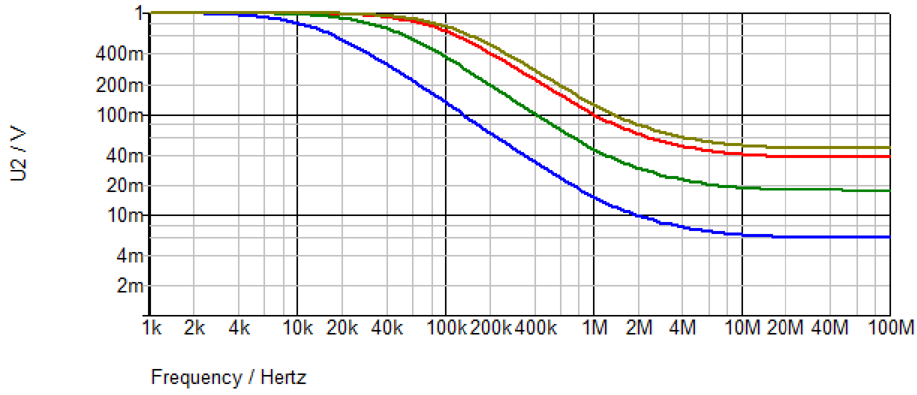
•
dolnofrekvenčný priepust 1. rádu s premennou šírkou pásma



$$\begin{pmatrix} Y_1 & -Y_1 & 0 & 0 \\ -Y_1 & Y_1+Y_2+pC & -pC & -Y_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -Y_2 & -Y_4 & Y_2+Y_2+Y_4 \end{pmatrix} \qquad \begin{array}{c} R_3 + R_4 = R \\ R_3 = kR \qquad R_4 = (1-k)R \\ R_2 \gg R \end{array}$$

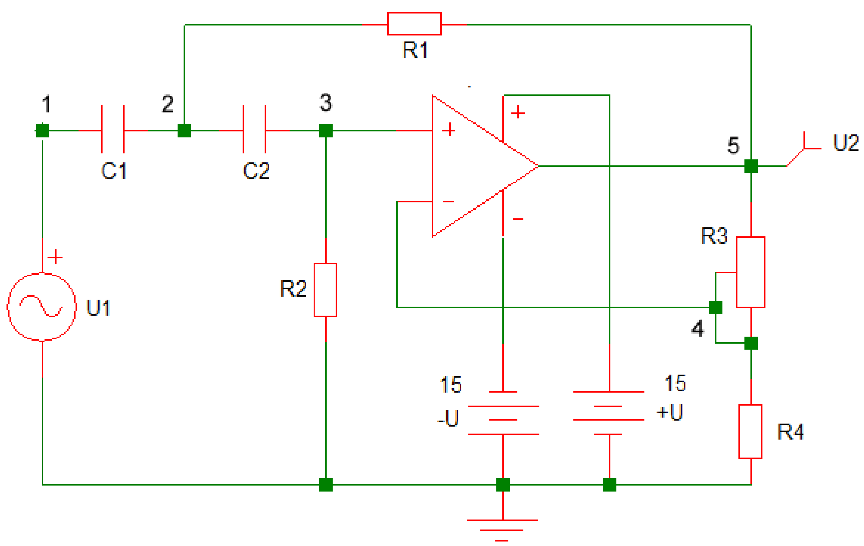
$$K_{U0}(p) = \frac{D_{14}}{D_{11}} = -\frac{R_2}{R_1}\frac{1}{1+\frac{pCR_1}{k}} \qquad |K_{U0}(\omega)| = -\frac{R_2}{R_1}\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{\omega CR_2}{k}\right)^2}}$$

$$\omega_h = \frac{k}{CR_2} \qquad \begin{cases} k = 0 & , \ \omega_h = 0 \\ k = 1 & , \ \omega_h = \frac{1}{CR_2} \end{cases} \qquad |K_{U0}(\omega = \omega_h)| = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{R_2}{R_1}$$



napäťový prenos pre rôzne hodnoty k

- hornofrekvenčný priepust



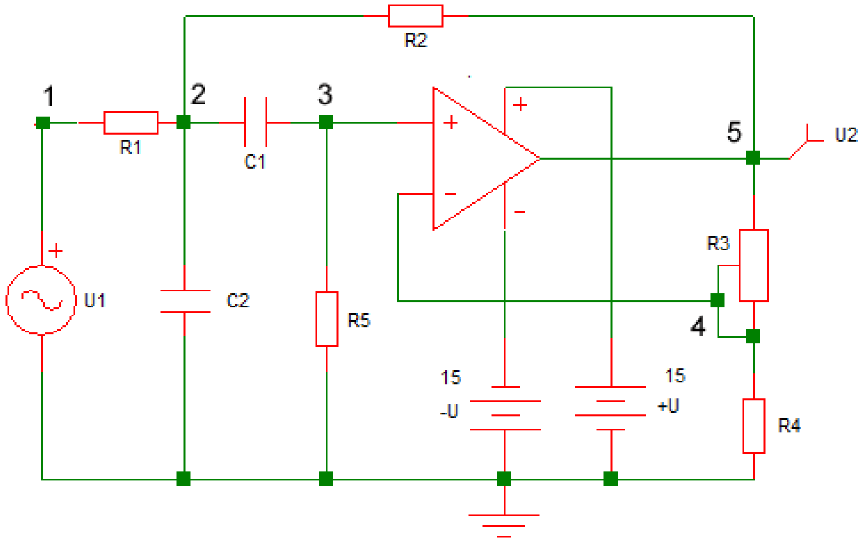
$R_1 = R_2 = R \qquad C_1 = C_2 = C \qquad R_3 = (k-1)R_4 \qquad K_{U0}(\omega \to \infty) = k$

$$\begin{pmatrix} pC & -pC & 0 & 0 & 0 \\ -pC & Y + 2pC & -pC & 0 & -Y \\ 0 & -pC & Y + pC & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_3 + Y_4 & -Y_3 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \qquad K_{U0}(p) = \frac{k}{\frac{1}{(pCR)^2} + \frac{3-k}{pCR} + 1}$$

$$|K_{U0}(\omega)| = \frac{k}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2 (3-k)^2}} \qquad \omega_0 = \frac{1}{RC}$$

pre $k = 3$ je prenos reálny, a pre $\omega \to \omega_0$ neohraničene rastie

- pásmový priepust 2. rádu - kaskáda DP a HP (Sallen - Key I.)



$$R_1 = R_2 = R_5 = R \qquad C_1 = C_2 = C \qquad R_3 = (k-1)R_4$$

$$\begin{pmatrix} Y & -Y & 0 & 0 & 0 \\ -Y & 2(Y+pC) & -pC & 0 & -Y \\ 0 & -pC & Y+pC & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_3+Y_4 & -Y_3 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$K_{U0}(p) = \left(1+\frac{R_2}{R_4}\right)\frac{pCR}{2+pCR\left(3-\frac{R_3}{R_4}\right)+(pCR)^2}$$

$$\omega_0 = \frac{\sqrt{2}}{RC} \qquad K_{U0}(\omega_0) = \frac{k}{4-k}$$

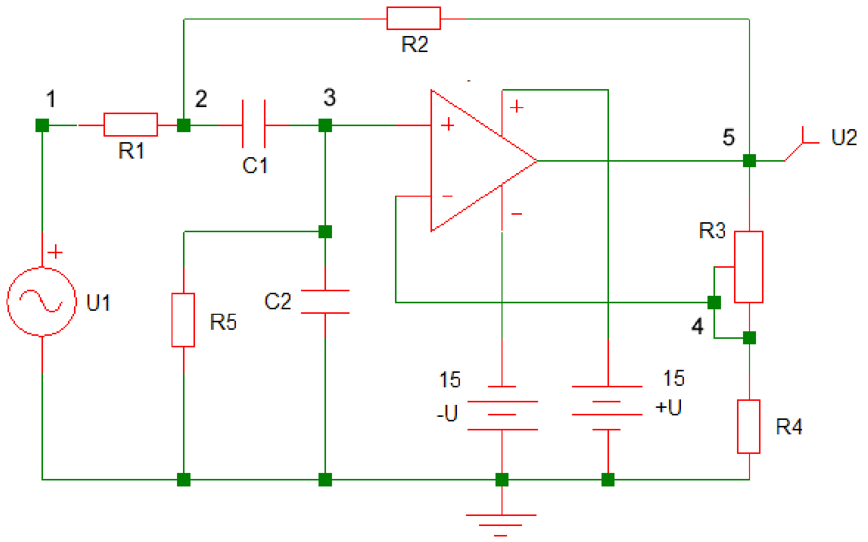
obvod sa stáva *nestabilným* pri ω_0 pre $k = 4$

$$\tan\varphi = \frac{2-(\omega RC)^2}{\omega RC(4-k)} = \pm 1 \qquad B(\omega) = \frac{4-k}{RC} = \frac{4-k}{\sqrt{2}}\omega_0 \qquad Q = \frac{\omega_0}{B(\omega)} = \frac{\sqrt{2}}{4-k}$$

pre $k = 4$ je $B(\omega) \to 0$, rezonančné zosilnenie závisí len od k (nie od ω_0 ani $B(\omega)$)

•

pásmový priepust 2. rádu s Wienovým deličom (Sallen - Key II.)



$R_1 = R_2 = R_5 = R$ $\qquad C_1 = C_2 = C$ $\qquad R_3 = (k-1)R_4$

$$\begin{pmatrix} Y & -Y & 0 & 0 & 0 \\ -Y & 2Y+pC & -pC & 0 & -Y \\ 0 & -pC & Y+2pC & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_3+Y_4 & -Y_3 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

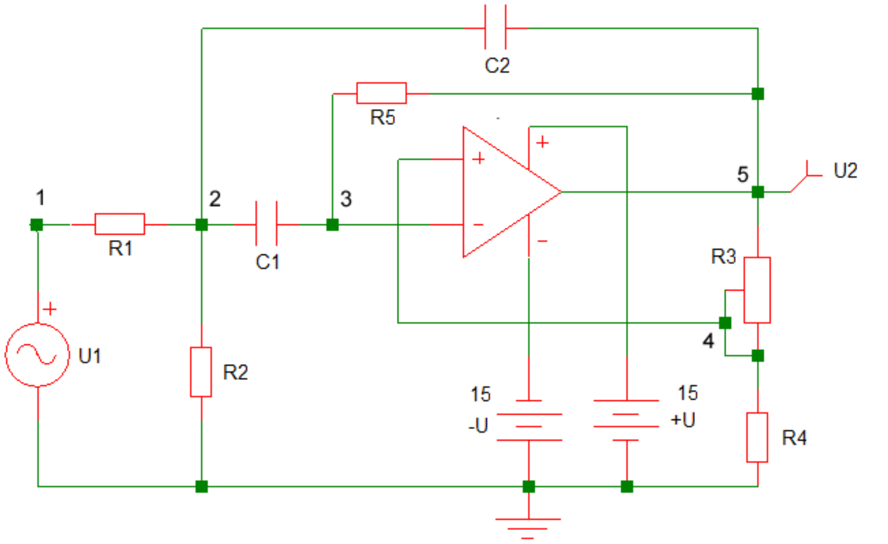
$$K_{U0}(p) = \frac{kpCR}{2 + pCR(5-k) + (pCR)^2}$$

$$\omega_0 = \frac{\sqrt{2}}{RC} \qquad K_{U0}(\omega_0) = \frac{k}{5-k}$$

obvod sa stáva *nestabilným* pri ω_0 pre $k = 5$

$$\tan\varphi = \frac{2-(\omega RC)^2}{\omega RC(5-k)} = \pm 1 \qquad B(\omega) = \frac{5-k}{RC} = \frac{5-k}{\sqrt{2}}\omega_0 \qquad Q = \frac{\omega_0}{B(\omega)} = \frac{\sqrt{2}}{5-k}$$

•
pásmový priepust s dvojitou spätnou väzbou



$$R_1 = R_2 = R_5 = R \qquad C_1 = C_2 = C \qquad R_3 = (k-1)R_4$$

$$\begin{pmatrix} Y & -Y & 0 & 0 & 0 \\ -Y & 2(Y+pC) & -pC & 0 & -pC \\ 0 & -pC & Y+pC & 0 & -Y \\ 0 & 0 & 0 & Y_3+Y_4 & -Y_3 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$K_{U0}(p) = \frac{-\frac{k}{k-1}pCR}{2 + 2pCR\frac{k-2}{k-1} + (pCR)^2}$$

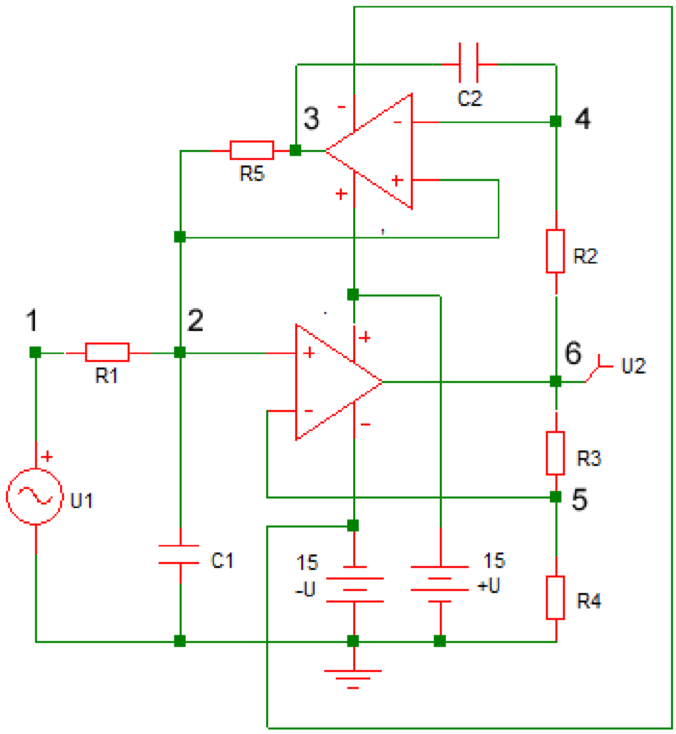
$$\omega_0 = \frac{\sqrt{2}}{RC} \qquad K_{U0}(\omega_0) = -\frac{k}{2(k-2)}$$

rezonancia pri $k = 2$
obvod je *stabilný* len pre $k < 2$

$$\tan\varphi = \frac{1-(\omega RC)^2(k-1)}{\sqrt{2}\omega RC(k-2)} = \pm 1 \qquad B(\omega) = \sqrt{2}\frac{k-2}{k-1}\omega_0 \qquad Q = \frac{\omega_0}{B(\omega)} = \sqrt{2}\frac{k-1}{k-2}$$

pri $k = 1$ zaniká selektívny charakter
pri $k = 2$ je systém nestabilný

•



$$R_5 = R_2 = R \qquad R_4 = R_3 \qquad C_1 = C_2 = C$$

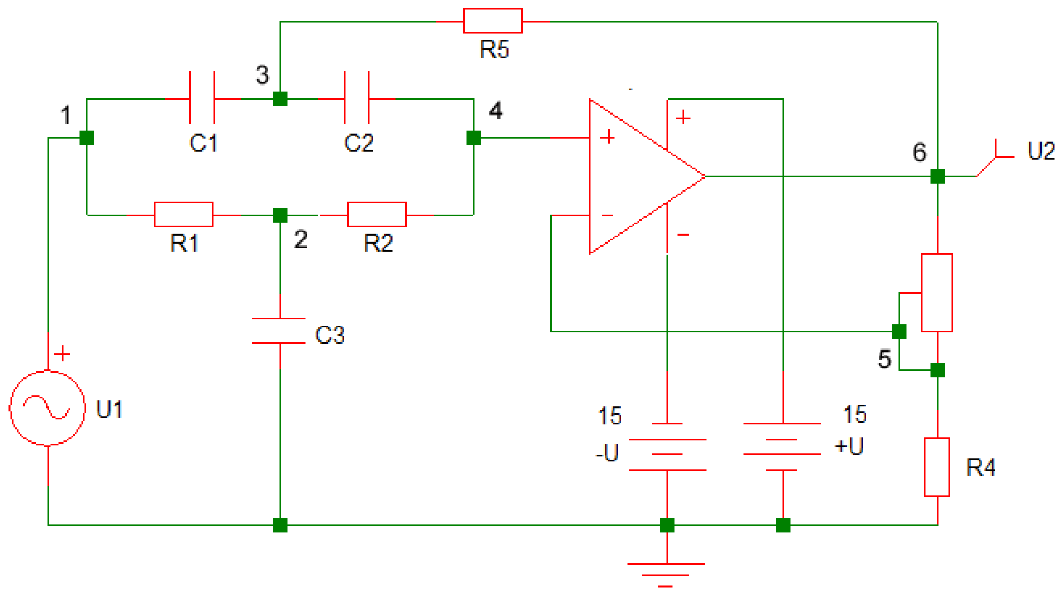
$$\begin{pmatrix} Y_1 & -Y_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -Y_1 & Y_1 + Y + pC & -Y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -pC & Y_1 + pC & 0 & -Y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2Y_3 & -Y_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$K_{U0}(p) = \frac{2pCY_0}{Y^2 + pCY_1 + (pC)^2}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} \qquad K_{U0}(\omega_0) = 2$$

$$\tan\varphi = \frac{Y^2 - (\omega C)^2}{\omega C Y_1} = \pm 1 \qquad B(\omega) = \frac{1}{R_1 C} \qquad Q = \frac{R_1}{R}$$

- pásmová zádrž



$R_1 = R_2 = R \qquad R_5 = \dfrac{R}{2} \qquad R_3 = (k-1)R_4 \qquad C_1 = C_2 = C \qquad C_3 = 2C$

$$\begin{pmatrix} Y+pC & -Y & -pC & 0 & 0 & 0 \\ -Y & 2(Y+pC) & 0 & -Y & 0 & 0 \\ -pC & 0 & 2(Y+pC) & -pC & 0 & -2Y \\ 0 & -Y & -pC & Y+pC & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Y_3+Y_4 & -Y_3 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$K_{U0}(p) = k\frac{1+(pCR)^2}{1+2(2-k)pCR+(pCR)^2}$$

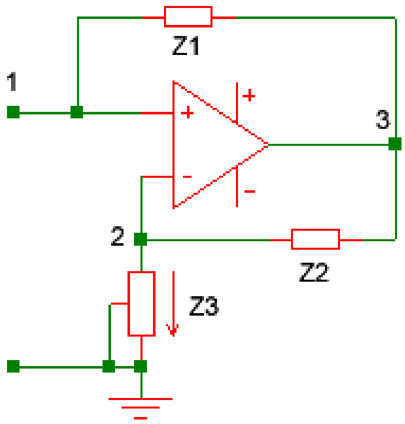
$$\omega_0 = \frac{1}{RC} \qquad K_{U0}(\omega_0) = 0$$

$$\tan\varphi = \frac{2\omega CR(2-k)}{1-(\omega CR)^2} = \pm 1 \qquad B(\omega) = 2\omega_0(2-k) \qquad Q = \frac{1}{2(2-k)}$$

pre $k = 2$ oscilácie

SYNTETICKÉ DVOJPÓLY

- záporná impedancia - NIC (Negative Impedance Converter)



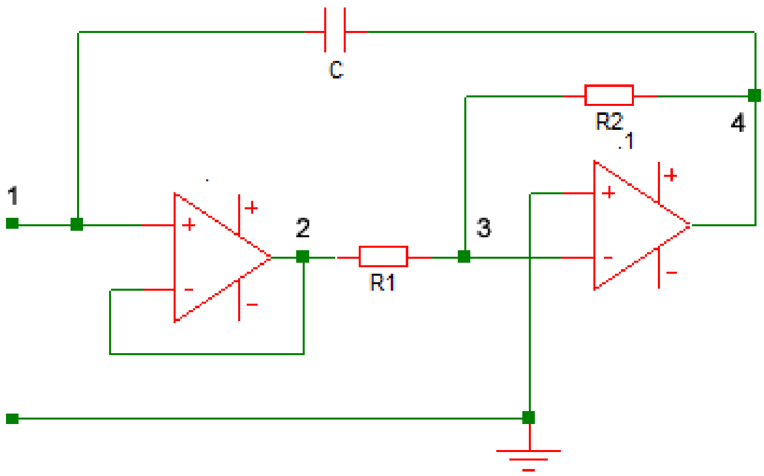
$$\begin{pmatrix} Y_1 & 0 & -Y_1 \\ 0 & Y_2+Y_3 & -Y_2 \\ -1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$Z_{in0} = \frac{D_{11}}{D} = \frac{Y_2}{-Y_1(Y_2+Y_3)-Y_2} = ... = \frac{-Z_1Z_3}{Z_2}$$

regulovaním $Z_3 = R_3$ možno dosiahnuť ľubovoľný záporný odpor

paralelným pripojením NICu k prúdovému zdroju (s vnútorným odporom R_i) a nastavením $R_{NIC} = -R_i$ sa dá získať *ideálny* prúdový zdroj (nezávislý na záťaži)

- syntetická kapacita



(kaskáda napäťového sledovača a invertujúceho zosilňovača s kapacitnou spätnou väzbou)

potenciály na uzloch 1, 2, 4 sú U_1, U_1, $-\frac{R_2}{R_1}U_1$

prúd kondenzátorom je teda

$$pCU_1\left(1-\left(-\frac{R_2}{R_1}\right)\right) =$$

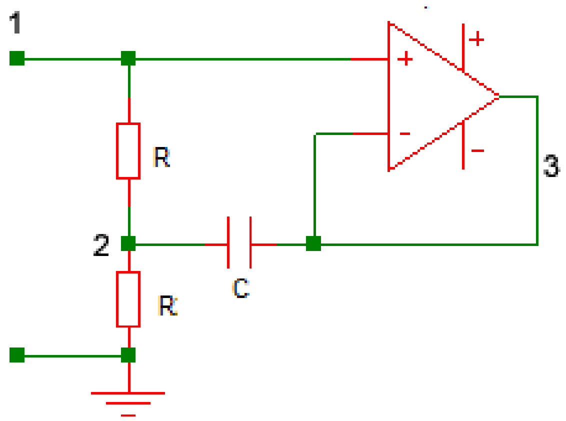
$$= pC_{ekv}U_1$$

$$\begin{pmatrix} pC & 0 & 0 & -pC \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -Y_1 & Y_1+Y_2 & -Y_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$Y_{in0} = \frac{D}{D_{11}} = \frac{pC(Y_1+Y_2)}{Y_2} = ... = pC\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)$$

regulovaním $\frac{R_2}{R_1}$ možno dosiahnuť veľkú hodnotu $C_{ekv} = C\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)$ pri malej hodnote C

- syntetická indukčnosť



$$\begin{pmatrix} Y & -Y & 0 \\ -Y & 2Y+pC & -pC \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$Z_{in0} = \frac{D_{11}}{D} = \frac{2Y+pC}{Y^2} =$$
$$... = 2R + pCR^2 = 2R + pL_{ekv}$$

mierne zložitejším zapojením (napr. pripojením ďalšieho RC-člena medzi výstup OZ a referenčný uzol) sa dá zostaviť aj *ideálna* indukčnosť (pri istej frekvencii určenej hodnotami R a C)

HARMONICKÉ GENERÁTORY

harmonické generátory (HG) sú zariadenia na konverziu energie jednosmerného napájania na striedavý prúd zvolenej frekvencie - režim *samobudenia* kmitov *konštantnej* amplitúdy

základnými atribútmi harmonického generátora sú:

- dostatočné *zosilnenie* vstupného signálu - predpokladáme ľubovoľne malý náhodný signál na vstupe (fluktuácia), zosilnenie musí pokryť dissipáciu energie v systéme

- *selektivita* systému - schopnosť vybrať zo spektra (náhodného) vstupného signálu určenú frekvenciu

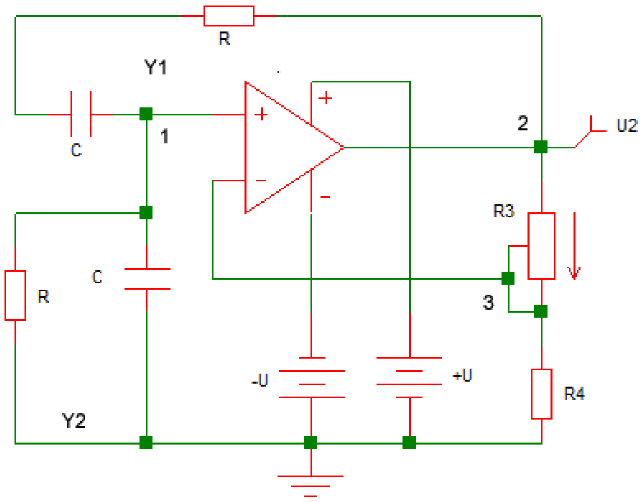
- *kladná spätná väzba* - časť výstupného signálu je privádzaná späť na vstup so správnou fázou

pre dané ω je harmonický generátor *autonómnym* systémom (nemá vonkajšie ani vnútorné budenie *daného časového priebehu*), pomocou metódy UP je opísateľný sústavou *homogénnych* rovníc

$$\begin{gathered} g_{11}\varphi_1 - g_{12}\varphi_2 - ... - g_{1s}\varphi_s = 0 \\ ... \\ -g_{s1}\varphi_1 - g_{s2}\varphi_2 - ... + g_{ss}\varphi_s = 0 \end{gathered} \qquad \varphi_k = \frac{D_k}{D}$$

keďže však $D_k = 0$ (nulové pravé strany), jedinou možnosťou pre $\varphi_k \neq 0$ (systém *generuje* napätie) je $D = 0$ (reálna aj imaginárna časť)

- generátor s Wienovým deličom



$$Y_1 = \frac{1}{R+\frac{1}{pC}} = \frac{pC}{1+pCR}$$

$$Y_2 = \frac{1}{RC} + pC = \frac{1+pCR}{R}$$

$$\begin{pmatrix} Y_1+Y_2 & 0 & -Y_1 \\ 0 & Y_3+Y_4 & -Y_3 \\ -1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$D=0:$ $$\frac{Y_3+Y_4}{Y_3} = \frac{Y_1+Y_2}{Y_1} \qquad \frac{R_3}{R_4} = \frac{Y_2}{Y_1} = 2 + i(\omega RC - \frac{1}{\omega RC})$$

$$\omega = \frac{1}{RC} \qquad \frac{R_3}{R_4} = 2$$ - hraničná podmienka

výstupný uzol generátora (výstup OZ) má nulovú výstupnú impedanciu

selektívnym prvkom je Wienov delič - pásmový priepust - v *kladnej* spätnej väzbe

činiteľ *kladnej* spätnej väzby: $\beta_+ = \frac{U_+}{U_2} = \frac{\frac{1}{Y_2}}{\frac{1}{Y_1}+\frac{1}{Y_2}}$

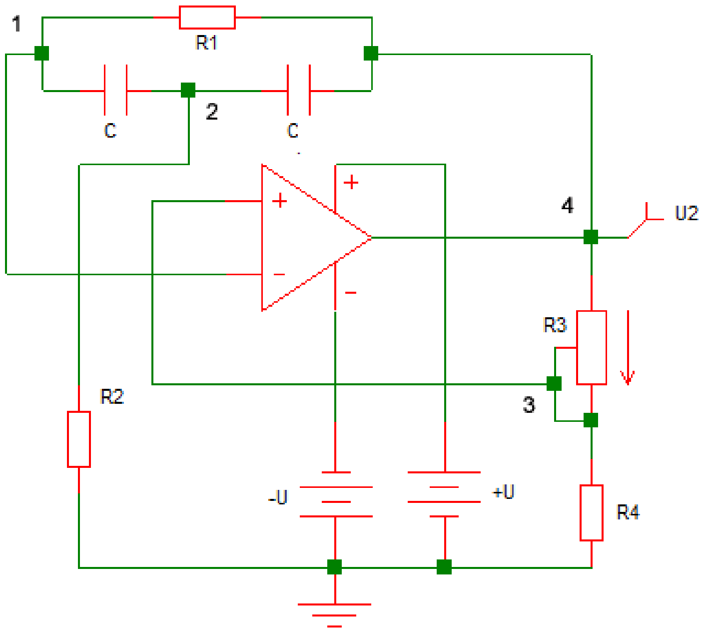
činiteľ *zápornej* spätnej väzby: $\beta_- = \frac{U_-}{U_2} = \frac{R_4}{R_3+R_4}$

podmienka samobudenia: $\beta_+ > \beta_-$ $\omega = RC$ $\frac{R_3}{R_4} > 2$

po *prekročení* podmienky samobudenia má amplitúda oscilácií tendenciu neobmedzene rásť - napätie na výstupe OZ teda osciluje medzi nasýtenými stavmi (napätie napájania) - časový priebeh je *neharmonický*
na dosiahnutie *harmonického* výstupného napätia je potrebné udržiavať generátor *na prahu* samobudenia - realizuje sa to nahradením niektorého z "pevných"rezistorov v spätnej väzbe rezistorom *s premennou* hodnotou odporu v závislosti od amplitúdy výstupného napútia (termistor, dióda, atď.)

-

generátor s premosteným T-článkom RC



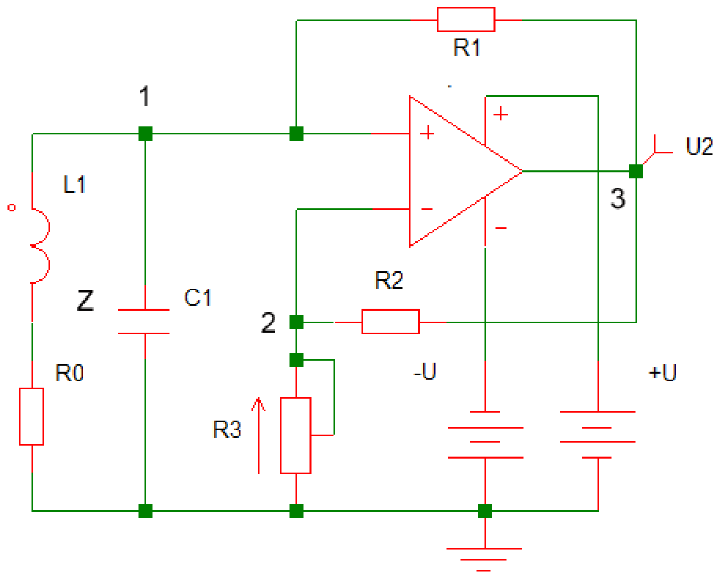
$$\begin{pmatrix} Y1 + pC & -pC & 0 & -Y_1 \\ -pC & Y_2 + pC & 0 & -pC \\ 0 & 0 & Y_3 + Y_4 & -Y_3 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

$D = 0:$ $\omega = \dfrac{1}{C\sqrt{R_1 R_2}}$ $\dfrac{R_3}{R_4} = \dfrac{R_1}{2R_2}$ - hraničná podmienka

selektívnym prvkom je pásmová *zádrž* (T-článok) zapojená v *zápornej* spätnej väzbe

samobudenie nastane ak $\beta_+ > \beta_-$ teda $\frac{R_3}{R_4} < \frac{R_1}{2R_2}$

- RLC generátor



$$Y = \frac{1}{Z} =$$

$$= \frac{1}{R_0 + pL} + pC$$

$$\begin{pmatrix} Y + Y_1 + Y_4 & 0 & -Y_1 \\ 0 & Y_2 + Y_3 & -Y_2 \\ -1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$D = 0:$ $$\omega^2 = \frac{1}{LC}\left(1 - \frac{CR_0^2}{L}\right) = \omega_0^2\left(1 - \frac{1}{Q^2}\right) \qquad \frac{R_1R_3}{R_2} = R_0(1+Q^2)$$

samobudenie pri $\beta_+ > \beta_-$ - obe spätné väzby sú napäťové deliče, platí teda

$$\ldots \qquad \frac{R_2}{R_3} > \frac{R_1}{Z_{rez}} \cong \frac{R_1}{Q^2 R_0}$$