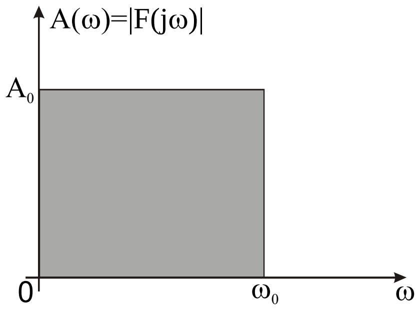
Návrh frekvenčního filtru

Typy filtrů podle tvaru idealizované frekvenční charakteristiky:

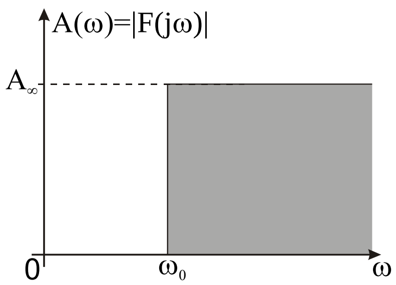
označení: *f-charakteristika:* *forma přenosu:*

DP – dolní propust
(low pass)



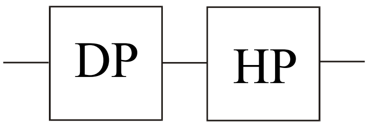
$$F(p) \approx \frac{A_0 \omega_0^{\ n}}{Q^n(p)}$$

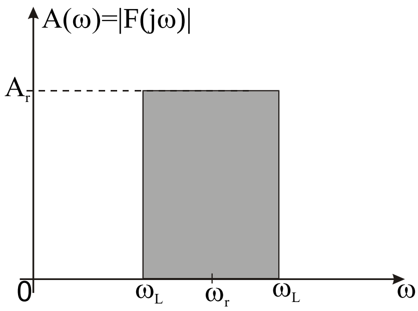
HP – horní propust
(high pass)



$$F(p) \approx \frac{A_\infty p^n}{Q^n(p)}$$

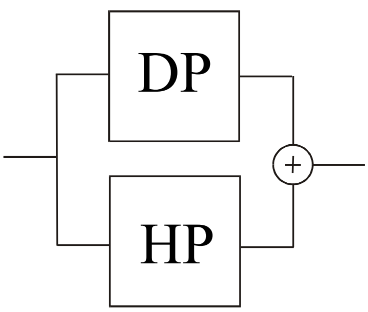
PP – pásmová propust

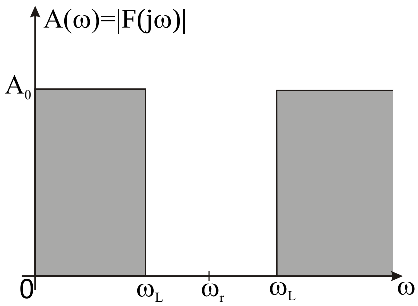




$$F(p) \approx \frac{P^m(p)}{Q^n(p)}$$

PZ – pásmová zádrž

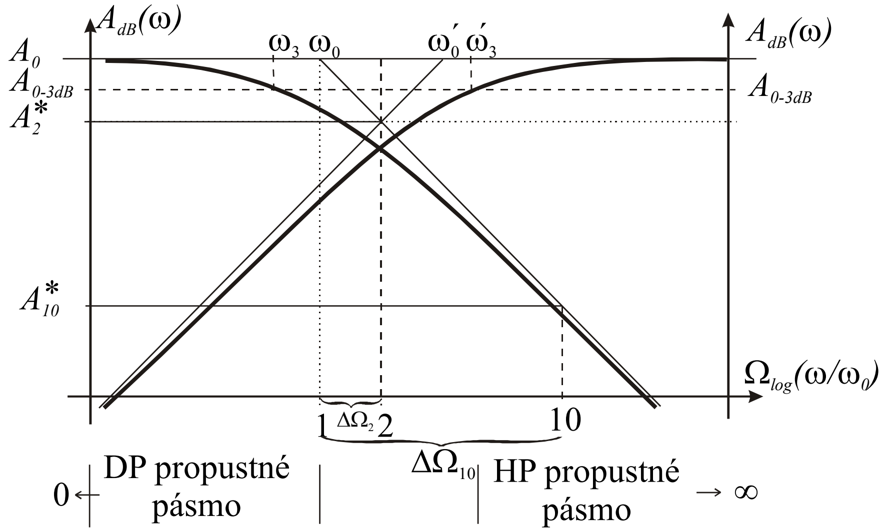




$$F(p) \approx \frac{A_\infty p^n + A_0 \omega_0^n}{Q^n(p)}$$

Frekvenční charakteristika lineárních filtrů

$$A(\omega)=\left|F(j\omega)\right|; \quad A_{dB}(\omega) = 20 \cdot \log \left|F(j\omega)\right|$$



Strmost f-charakteristiky

směrnice křivky: $$\xi = \frac{\Delta A(\omega)}{\Delta \omega}$$

strmost: $$\sum = \xi_{\log} = \frac{\Delta \log(A)}{\Delta \log(\omega)} \qquad \frac{\omega_2}{\omega_1} = 2^{\left(\frac{A_{dB}(\omega_2)-A_{dB}(\omega_1)}{\Sigma^{(2)}_{dB/oct}}\right)}$$

$$\sum\nolimits^{(2)}_{dB/oct} = \frac{20\ \log_{10}\left(\dfrac{A(\omega_2)}{A(\omega_1)}\right)}{\log_2\left(\dfrac{\omega_2}{\omega_1}\right)} = \frac{A_{dB}(\omega_2) - A_{dB}(\omega_1)}{\dfrac{1}{\log_{10}(2)} \cdot \log_{10}\left(\dfrac{\omega_2}{\omega_1}\right)}$$

asymptotická strmost:

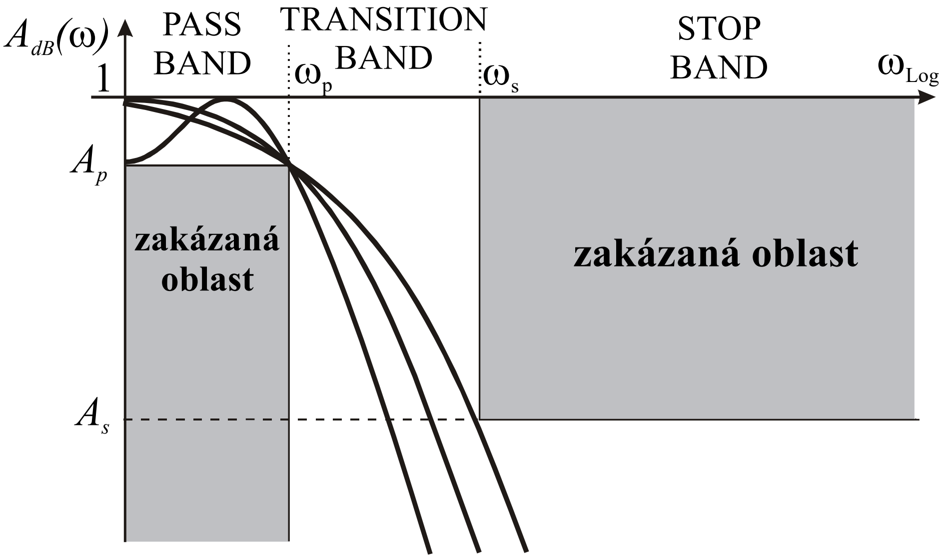
$$\sum\nolimits^{*(2)}_{dB/oct} = (A_2^* - A_0) \approx \pm 6 \cdot n \ [dB/oct]$$

$$\sum\nolimits^{*(10)}_{dB/dec} = (A_{10}^* - A_0) \approx \pm 20.n \ [dB/dec]$$

Návrh filtru

Vychází z požadavků na tvar křivky frekvenční char.

Mezní frekvenční charakteristika (DP)



Požadavky:

$A(\omega) > A_p \forall \omega \in (0; \omega_p)$ ...minimální přenos v propustném pásmu

$A(\omega) < A_s \forall \omega \in (\omega_s; \infty)$ ...maximální přenos v nepropustném pásmu

$A(\omega) \leq A_{\max}$ … maximální přenos

$A(\omega = 0) = A_0$ … statický přenos

$A(\omega = \omega_r) - A(\omega = 0) \leq A_r$ … maximální překmit

- Šířka přechodového pásma podmiňuje stanovení minimálního stupně $Q^n(p)$
- Koeficienty $Q(p)$ se pak určují podle požadavků na průběh (tvar) křivky $A(\omega),\varphi(\omega)$
- Existují tzv. normované přenosové funkce DP se specifickými vlastnostmi pro $\omega_0^*=1$, které se pak přetransformují do požadovaných souřadnic ω_0 respektive typ DP/HP
- Filtry vyšších stupňů se realizují pomocí kaskádně řazených modulů 1. a 2. Stupně

<u>Normovaná DP pro ω_0^* = 1</u>

$$F(p) = \frac{Kb_0}{p^n + b_{n-1}p^{n-1} + \ldots + b_1 p + b_0} = \begin{cases} \displaystyle\prod_{k=1}^{n/2} \frac{K_k}{p^2 + \alpha_k p + \beta_k} \\ \displaystyle\frac{K_0}{p+\beta_0} \prod_{k=1}^{n-1/2} \frac{K_k}{p^2 + \alpha_k p + \beta_k} \end{cases}$$

Transformace na konkrétní ω_0 pro stupeň N=2

<u>Obecný tvar DP(2)</u>

$$F(p) = \frac{A_0 \omega_0^{\,2}}{p^2 + \xi\omega_0 p + \omega_0^{\,2}} \qquad => \qquad \xi = \frac{\alpha_k}{\sqrt{\beta_k}}$$

$$A_0^* = \frac{K_k}{\beta_k} \qquad \omega_0^* = \sqrt{\beta_k}$$

Transformace na HP: $p \to \frac{1}{p}\,; \quad \omega_0 \to \frac{1}{\omega_0}$

<u>Obecný tvar HP(2)</u>

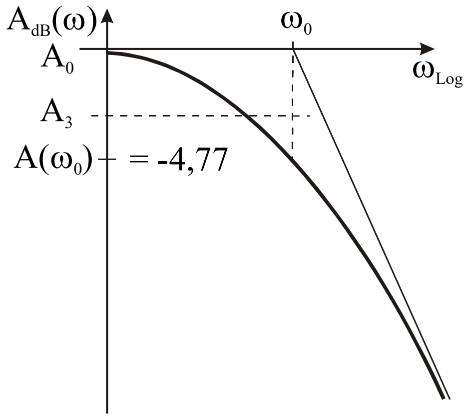
$$F(p) = \frac{A_\infty p^2}{p^2 + \xi\omega_0 p + \omega_0^{\,2}} \qquad \xi = \alpha_k$$

$$\omega_0^* = \frac{1}{\sqrt{\beta_k}}$$

Základní prototypy filtrů:

a) Besselův

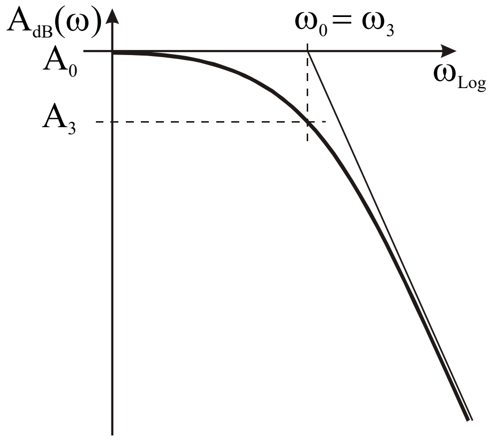
- nejméně ostrý přechod, A(ω) monotóně klesá
- lineární fázová charakteristika $\phi(\omega) = -\omega\tau_0$
- nezakmitávající impulsní charakteristika
- $\omega_3/\omega_0 = 1.27$ A(ω) = -4.77 dB
- má sklon již od ω = 0



$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\omega^2}{\omega_0^{\ 2}} + \left(\frac{\omega^2}{\omega_0^{\ 2}}\right)^2}}$$

b) Butterworthův

- monotónní, maximálně plochá charakteristika



$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{2n}}}$$

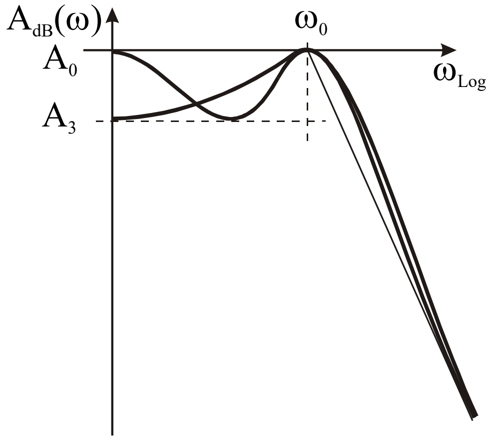
$$\beta_k = 1 \ ; \qquad \alpha_k = 2 \cdot \sin\left(\frac{2k-1}{2n}\pi\right)$$

$$R_p = A_0 - A_p \ ; \qquad R_S = A_0 - A_S$$

minimální stupeň: $$n = \frac{\log(\varepsilon)}{2\log\left(\frac{\omega_S}{\omega_p}\right)} \ ; \qquad \varepsilon = \sqrt{10^{\frac{R_p}{10}} - 1}$$

c) Čebyševův I.

- nemonotónní zvlněná charakteristika
- definované zvlnění v propustném pásmu



$$A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{1+\varepsilon^2 Q_n^{\ 2}\left(\dfrac{\omega}{\omega_0}\right)}}$$

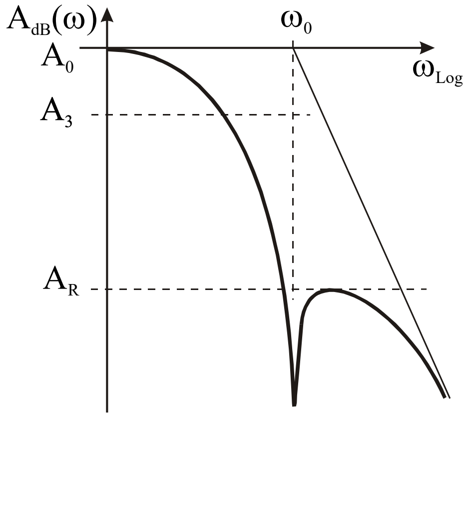
$$Q_n = \begin{cases} \cos\left(n \cdot \arccos\left(\dfrac{\omega}{\omega_0}\right)\right) & \forall\, \omega/\omega_0 < 1 \\ \cosh\left(n \cdot \arg\cosh\left(\dfrac{\omega}{\omega_0}\right)\right) & \forall\, \omega/\omega_0 > 1 \end{cases}$$

$$A_0 = \frac{1}{\sqrt{1+\varepsilon^2}} \quad ; \quad \frac{\omega_3}{\omega_0} = \cosh\left(\frac{1}{n}\arg\cosh\frac{1}{\varepsilon}\right)$$

minimální stupeň: $$n = \frac{\arg\cosh\sqrt{\left(10^{\frac{R_S}{10}}-1\right)\Big/\left(10^{\frac{R_p}{10}}-1\right)}}{\arg\cosh(\omega_S / \omega_p)}$$

d) Čebyševův II.

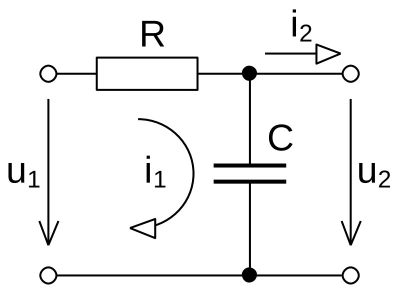
- v propustné části monotónní
- v nepropustné části definované zvlnění



Realizace frekvenčních filtrů analogovými el. obvody:

a) Návrh jednoduchých pasivní filtračních článků:

- *integrační RC článek = dolní propust*

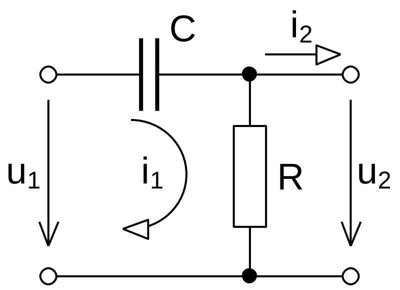


$$\left.\begin{aligned} U_1(p) &= RI_1(p) + \frac{I_1(p)}{pC} \\ U_2(p) &= \frac{I_1(p)}{pC} \end{aligned}\right\} \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{1}{1+pRC} = F(p)$$

$$F(j\omega) = \frac{1}{1+p\omega_0}$$

$$p = j\omega \ , \quad RC = 1/\omega_0 \ , \quad R = 1/C\omega_0$$

- *derivační RC článek = horní propust*



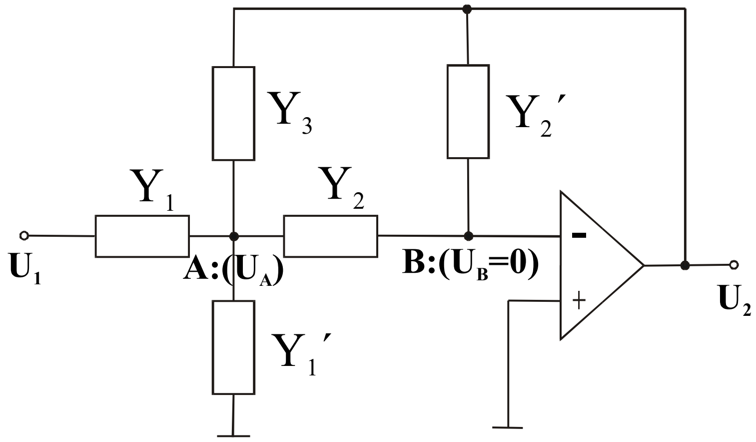
$$\left.\begin{aligned} U_1(p) &= \frac{I_1(p)}{pC} + RI_1(p) \\ U_2(p) &= RI_1(p) \end{aligned}\right\} \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{pRC}{1+pRC} = F(p)$$

$$F(j\omega) = \frac{p\omega_0}{1+p\omega_0}$$

$$p = j\omega \ , \quad RC = 1/\omega_0 \ , \quad R = 1/C\omega_0$$

b) Návrh aktivního filtru s operačním zesilovačem:

Schéma: I.



Y_i zde představuje admitanci (komplexní vodivost) obecného dvojpólu, který může být podle potřeby reprezentován buď rezistorem ($Y = 1/R$) nebo kondenzátorem ($Y = j\omega C$).

Odvození přenosu el. obvodu - metoda uzlových napětí:

$$\text{A:} \quad Y_1(U_1 - U_A) + Y_1'(0 - U_A) + Y_2(0 - U_A) + Y_3(U_2 - U_A) = 0$$

$$\text{B:} \quad Y_2(U_A - 0) + Y_2'(U_2 - 0) = 0 \quad \Rightarrow \quad U_A = -\frac{Y_2'}{Y_2} U_2$$

$$0 = Y_1 U_1 + \frac{Y_1 Y_2'}{Y_2} U_2 + \frac{Y_1' Y_2'}{Y_2} U_2 + \frac{Y_2 Y_2'}{Y_2} U_2 + Y_3 U_2 + \frac{Y_3 Y_2'}{Y_2} U_2$$

$$-Y_1 Y_2 U_1 = Y_1 Y_2' U_2 + Y_1' Y_2' U_2 + Y_2 Y_2' U_2 + Y_2 Y_3 U_2 + Y_3 Y_2' U_2$$

$$\frac{U_2}{U_1} = -\frac{Y_1 Y_2}{Y_2'(Y_1 + Y_1' + Y_2 + Y_3) + Y_2 Y_3} = -\frac{Y_1 Y_2}{Y_2' Y_1' + Y_2'(Y_1 + Y_2 + Y_3) + Y_2 Y_3}$$

Urční typů a hodnot obvodových součástek:

1) DP – dolní propust

zavedeme označení: $k_0 = A_0 K \omega_0{}^2 \approx NUM(3)$

$k_1 = K\omega_0{}^2 \approx DEN(3)$

$k_2 = \alpha\omega_0 \approx DEN(2)$

$K^* = A_0 K$ ... normovaná DP v Matlabu

přenos bude ve tvaru: $$F(p) = \frac{(\pm) A_0 K \omega_0{}^2}{p^2 + \alpha\omega_0 p + K\omega_0{}^2}$$

realizace: $$Y = \begin{cases} \dfrac{1}{R} \\ p \cdot C \end{cases}$$

porovnání koeficientů stejných mocnin p:

$$p^0 : Y_1 Y_2 = \frac{1}{R_1} \cdot \frac{1}{R_2} \quad \Rightarrow \quad Y_1 = \frac{1}{R_1}; \quad Y_2 = \frac{1}{R_2}$$

$$p^0 : Y_2 Y_3 = \frac{1}{R_2} \cdot \frac{1}{R_3} \quad \Rightarrow \quad Y_3 = \frac{1}{R_3}$$

$$p^1 : Y_2{}'(Y_1 + Y_2 + Y_3) = pC_2'\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right) \quad \Rightarrow \quad Y_2' = pC_2'$$

$$p^2 : Y_1' Y_2{}' = p^2 C_1{}' \cdot C_2{}' \quad \Rightarrow \quad Y_1' = pC_1'$$

$$F(p) = -\frac{\frac{1}{R_1}\cdot\frac{1}{R_2}}{C_2{}'C_1{}'p^2 + C_2{}'\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}\right)p + \frac{1}{R_2}\frac{1}{R_3}}$$

$$= -\frac{\frac{1}{R_1R_2C_1{}'C_2{}'}}{p^2 + \frac{R_2R_3+R_1R_3+R_1R_2}{R_1R_2R_3C_1{}'}p + \frac{1}{R_2R_3C_1{}'C_2{}'}}$$

$$-\frac{1}{R_1R_2C_1{}'C_2{}'} = -A_0K\omega_0{}^2 = -k_0$$

$$-\left(\frac{\frac{1}{R_1R_2C_1{}'C_2{}'}}{\frac{1}{R_3R_2C_1{}'C_2{}'}}\right) = -\frac{\frac{1}{R_1}}{\frac{1}{R_3}} = -\frac{R_3}{R_1} = -\frac{A_0K\omega_0{}^2}{K\omega_0{}^2} = -\frac{k_0}{k_1} \quad \Rightarrow \quad A_0 = \frac{R_3}{R_1}$$

$$\frac{R_2R_3+R_1R_3+R_1R_2}{R_1R_2R_3C_1{}'}\left(\cdot\frac{C_2{}'}{C_2{}'}\right) = C_2{}'\left(\frac{R_3}{R_1}R_2+R_3+R_2\right)\cdot\left(K\omega_0{}^2\right) = k_2$$

$$\Rightarrow \quad C_2{}'\left(A_0R_2+R_3+R_2\right)k_1 = k_2$$

Výpočet hodnot pro volitelné R_1 a R_2

$$\boxed{R_3 = \frac{k_0}{k_1} \cdot R_1}$$

$$\boxed{C_1' = \frac{1}{k_0 R_1 R_2 C_2'}}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{K\ R_3 R_2 C_1' C_2'}}$$

$$\boxed{C_2' = \frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{1}{R_3 + R_2(1 + A_0)} = \frac{k_2}{k_0 R_1 + R_2(k_1 + k_0)}}$$

Zjednodušení:

$$A_0 = 1 \quad \Rightarrow \quad C_2' = \frac{k_2}{k_0(R_1 + 2R_2)}$$

$$C_1' = \frac{1}{k_0 R_1 R_2 C_2'}$$

Pro $R_1 = R_2 = R$:

$$\boxed{C_2' = \frac{k_2}{k_1 \cdot 3R}} \qquad \boxed{C_1' = \frac{1}{k_1 R^2 C_2'} = \frac{1}{k_2 \frac{R^2}{3R}} = \frac{3}{k_2 R}}$$

2) HP – horní propust

zavedeme označení:

$$k_0 = A_\infty \approx NUM(1)$$

$$k_1 = \frac{\omega_0^{\,2}}{K} \approx DEN(3)$$

$$k_2 = \alpha\omega_0 \approx DEN(2)$$

přenos bude ve tvaru:

$$F(p) = \frac{(\pm) A_\infty p^2}{p^2 + \alpha\omega_0 p + \frac{1}{K}\omega_0^{\,2}}$$

porovnání koeficientů stejných mocnin p:

$$p^0 : Y_1' Y_2' = \frac{1}{R_1'} \cdot \frac{1}{R_2'}$$

$$p^1 : Y_2'(Y_1 + Y_2 + Y_3) = p\frac{1}{R_2'}(C_1 + C_2 + C_3)$$

$$p^2 : Y_1 Y_2 = p^2 C_1 \cdot C_2$$

$$p^2 : Y_2 Y_3 = p^2 C_2 \cdot C_3$$

$$F(p) = -\frac{C_1 C_2 p^2}{\frac{1}{R_1'}\frac{1}{R_2'} + \frac{1}{R_2'}(C_1 + C_2 + C_3)p + C_2 C_3 p^2}$$

$$= -\frac{\frac{C_1}{C_3}p^2}{p^2 + \frac{(C_1 + C_2 + C_3)}{R_2' C_2 C_3}p + \frac{1}{R_1' R_2' C_2 C_3}}$$

$$\frac{1}{R_1'R_2'C_2C_3} = \frac{\omega_0^{\ 2}}{K} = k_1 \quad \Rightarrow \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{K}{R_1'R_2'C_2C_3}}$$

$$-\frac{C_1}{C_3} = -k_0 \quad \Rightarrow \quad A_\infty = k_0$$

$$\frac{C_1+C_2+C_3}{R_2'C_2C_3}\cdot\left(\frac{R_1'}{R_1'}\right) = R_1'(C_1+C_2+C_3)\frac{\omega_0^{\ 2}}{K} = R_1'(C_1+C_2+C_3)k_1 = k_2$$

Výpočet hodnot pro volitelné C_1 a C_2

$$\boxed{C_3 = \frac{C_1}{k_0}}$$

$$\boxed{R_1'R_2'C_2C_3 = \frac{1}{k_1} \quad \Rightarrow \quad R_2' = \frac{1}{k_1C_2C_3R_1'}}$$

$$\boxed{R_1'\left(C_1+C_2+C_3\right) = \frac{k_2}{k_1} \quad \Rightarrow \quad R_1' = \frac{k_2}{k_1\left(C_1\left(1+\frac{1}{k_0}\right)+C_2\right)}}$$

Zjednodušení:

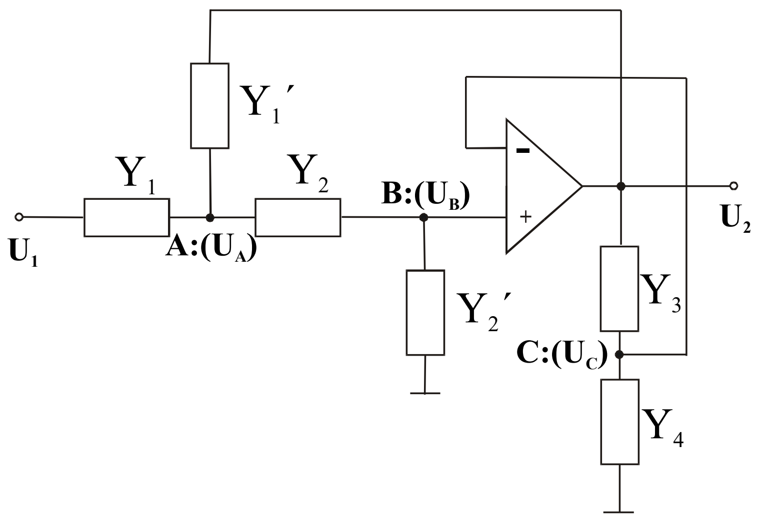
$$A_0 = 1 \quad \Rightarrow \quad R_1' = \frac{k_2}{k_1(2C_1+C_2)}$$

Pro $C_1=C_2=C$:

$$\boxed{R_1' = \frac{k_2}{k_1\cdot 3C}} \qquad \boxed{R_2' = \frac{1}{k_1C^2R_1'} = \frac{1}{k_2\,\frac{C^2}{3C}} = \frac{3}{k_2C}}$$

Návrh obvodového řešení aktivního filtru s OZ

schéma: II.



obvodové rovnice – metoda uzlových napětí

$$\sum_k i_k = \sum_k Y_k (U_k - U_0) = 0$$

A: $Y_1(U_1 - U_A) + Y_2(U_B - U_A) + Y_1'(U_2 - U_A) = 0$

B: $Y_2(U_A - U_B) + Y_2'(0 - U_B) = 0$

$U_B - U_C = 0 \quad \Rightarrow \quad U_B = U_C$

C: $Y_3(U_2 - U_C) + Y_4(0 - U_C) = 0$

řešení soustavy rovnic:

C: $Y_3 U_2 = Y_3 U_C + Y_4 U_C \quad \Rightarrow \quad U_C = \dfrac{Y_3}{Y_3 + Y_4} U_2$

B: $Y_2 U_A = Y_2 U_C + Y_2' U_C = \dfrac{Y_2 Y_3}{Y_3 + Y_4} U_2 + \dfrac{Y_2' Y_3}{Y_3 + Y_4} U_2$

$$\Rightarrow \quad U_A = \left(1 + \frac{Y_2'}{Y_2}\right) \frac{Y_3}{Y_3 + Y_4} U_2$$

A: $$Y_1U_1 - Y_1\left(1+\frac{Y_2'}{Y_2}\right)\frac{Y_3}{Y_3+Y_4}U_2 + \frac{Y_2Y_3}{Y_3+Y_4}U_2 - \frac{Y_2Y_3}{Y_3+Y_4}\left(1+\frac{Y_2'}{Y_2}\right)U_2 +$$

$$+Y_1'U_2 - Y_1'\left(1+\frac{Y_2'}{Y_2}\right)\frac{Y_3}{Y_3+Y_4}U_2 = 0$$

$$\Rightarrow Y_1U_1 = \left[\left(\frac{Y_3}{Y_3+Y_4}\right)\left(\left(1+\frac{Y_2'}{Y_2}\right)\left(Y_1+Y_2+Y_1'\right)-Y_2\right)-Y_1'\right]U_2$$

$$F_U = \frac{U_2}{U_1} = \frac{Y_1\,\dfrac{Y_3+Y_4}{Y_3}}{\left(1+\dfrac{Y_2'}{Y_2}\right)\left(Y_1+Y_2+Y_1'\right)-Y_1'\,\dfrac{Y_3+Y_4}{Y_3}-Y_2}$$

$$= \frac{Y_1\,\dfrac{Y_3+Y_4}{Y_3}}{Y_1+\dfrac{Y_1Y_2'}{Y_2}+Y_2+Y_2'+Y_1'+\dfrac{Y_1'Y_2'}{Y_2}-Y_2-Y_1'-Y_1'\,\dfrac{Y_4}{Y_3}} =$$

$$= \frac{Y_1\,\dfrac{Y_3+Y_4}{Y_3}}{\dfrac{Y_1Y_2'}{Y_2}+\dfrac{Y_1'Y_2'}{Y_2}+Y_2'-Y_1'\,\dfrac{Y_4}{Y_3}+Y_1} = \frac{Y_1Y_2\,\dfrac{Y_3+Y_4}{Y_3}}{Y_1'Y_2'+\left(Y_2'\left(Y_1+Y_2\right)-Y_1'Y_2\,\dfrac{Y_4}{Y_3}\right)+Y_1Y_2}$$

Určení typů a hodnot obvodových součástek

1) DP – dolní propust

zavedeme označení:

$$k_0 = A_0 K \omega_0{}^2 \approx NUM(3)$$
$$k_1 = K \omega_0{}^2 \approx DEN(3)$$
$$k_2 = \alpha \omega_0 \approx DEN(2)$$

přenos bude ve tvaru:

$$F(p) = \frac{(\pm) A_0 K \omega_0{}^2}{p^2 + \alpha \omega_0 p + K \omega_0{}^2}$$

realizace: Y =
$$\begin{cases} \dfrac{1}{R} \\ p \cdot C \end{cases}$$

porovnání koeficientů stejných mocnin *p*:

$$p^0 : Y_1 Y_2 \frac{Y_3 + Y_4}{Y_3} \approx A_0 K \omega_0{}^2 \quad \Rightarrow \quad Y_1 = \frac{1}{R_1}; \quad Y_2 = \frac{1}{R_2}; \quad Y_3 = \frac{1}{R_3}; \quad Y_4 = \frac{1}{R_4}$$

$$p^2 : Y_1' Y_2' \approx p^2 \quad \Rightarrow \quad Y_1' = pC_1'; \quad Y_2' = pC_2'$$

$$F(p) = \frac{\dfrac{1}{R_1 R_2} \dfrac{R_3 + R_4}{R_4}}{C_1' C_2' p^2 + \left[\left(\dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2} \right) C_2' - \dfrac{R_3}{R_2 R_4} C_1' \right] p + \dfrac{1}{R_1 R_2}} =$$

$$= \frac{\dfrac{1}{R_1 R_2 C_1' C_2'} \dfrac{R_3 + R_4}{R_4}}{p^2 + \dfrac{(R_1 + R_2) R_4 C_2' - R_1 R_3 C_1'}{R_4} \dfrac{1}{R_1 R_2 C_1' C_2'} p + \dfrac{1}{R_1 R_2 C_1' C_2'}} \Rightarrow$$

$$p^0 : \frac{R_3 + R_4}{R_4} \frac{1}{R_1 R_2 C_1' C_2'} = A_0 K \omega_0^{\ 2} = k_0$$

$$\frac{1}{R_1 R_2 C_1' C_2'} = K \omega_0^{\ 2} = k_1$$

$$\Rightarrow A_0 = \frac{k_0}{k_1} = \frac{R_3 + R_4}{R_4} = 1 + \frac{R_3}{R_4}$$

$$\Rightarrow A_0 \geq 1$$

$$\boxed{R_4 = \frac{R_3}{\dfrac{k_0}{k_1} - 1}}$$

$$p^1 : \frac{(R_1 + R_2) R_4 C_2' - R_1 R_3 C_1'}{R_4} \frac{1}{R_1 R_2 C_1' C_2'} = \alpha \omega_0 = k_2$$

$$(R_1 + R_2) C_2' - R_1 \frac{R_3}{R_4} C_1' = \frac{k_2}{k_1} \Rightarrow$$

$$\boxed{C_2' = \frac{1}{R_1 + R_2} \left(\frac{k_2}{k_1} + \frac{R_1 R_3 C_1'}{R_4} \right)}$$

$$R_1 R_2 C_1' C_2' = \frac{1}{k_1} \Rightarrow \boxed{C_1' = \frac{1}{k_1 R_1 R_2 C_2'}}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{K \cdot R_1 R_2 C_1' C_2'}}$$

Pro zvolené R_1, R_2 a R_3 lze nalézt hodnoty C_1', C_2' a R_4

Pokud $R_1 = R_2 = R$ a $A_0 = 1 \Rightarrow R_3 = 0$ a $R_4 = \infty$

pak: $\boxed{C_1{}' = \dfrac{1}{k_1 R^2 C_2{}'} = \dfrac{2}{k_2 R}; \qquad C_2{}' = \dfrac{k_2}{k_1 \cdot 2R}}$

2) <u>HP – horní propust</u>

zavedeme označení:

$$k_0 = A_\infty \approx NUM(1)$$

$$k_1 = \frac{\omega_0{}^2}{K} \approx DEN(3)$$

$$k_2 = \alpha' \omega_0 \approx DEN(2)$$

přenos bude ve tvaru:

$$F(p) = \frac{A_\infty p^2}{p^2 + \alpha' \omega_0 p + \frac{1}{K} \omega_0{}^2}$$

realizace: Y = $\dfrac{1}{R}$ / $p \cdot C$

porovnání koeficientů stejných mocnin p:

$$p^2 : Y_1 Y_2 \frac{Y_3 + Y_4}{Y_3} \approx A_\infty p^2 \quad \Rightarrow \quad Y_1 = pC_1; \;\; Y_2 = pC_2; \;\; Y_3 = \frac{1}{R_3}; \;\; Y_4 = \frac{1}{R_4}$$

$$p^0 : Y_1' Y_2' \approx \frac{1}{K} \omega_0{}^2 \quad \Rightarrow \quad Y_1' = \frac{1}{R_1'}; \quad Y_2' = \frac{1}{R_2'}$$

$$F(p)=\frac{C_1C_2p^2\cdot\dfrac{R_3+R_4}{R_4}}{C_1C_2p^2+\left[\dfrac{C_1+C_2}{R_2'}-\dfrac{C_2R_3}{R_1'R_4}\right]p+\dfrac{1}{R_1'R_2'}}=$$

$$=\frac{\dfrac{R_3+R_4}{R_4}p^2}{p^2+\dfrac{\left(C_1+C_2\right)R_1'R_4-C_2R_3R_2'}{R_4}\cdot\dfrac{1}{R_1'R_2'C_1C_2}+\dfrac{1}{R_1'R_2'C_1C_2}}$$

$$p^2:\frac{R_3+R_4}{R_3}=A_\infty=k_0 \qquad \boxed{\Rightarrow R_4=\frac{R_3}{k_0-1}}$$

$$p^1:\frac{\left(C_1+C_2\right)R_1'R_4-C_2R_3R_2'}{R_4}\frac{1}{R_1'R_2'C_1C_2}=\alpha'\omega_0=k_2$$

$$\left(C_1+C_2\right)R_1'-R_2'C_2\frac{R_3}{R_4}=\frac{k_2}{k_1}\Rightarrow\boxed{R_1'=\left(\frac{k_2}{k_1}+\frac{R_2'R_3C_2}{R_4}\right)\frac{1}{C_1+C_2}}$$

$$p^0:R_1'R_2'C_1C_2=\frac{1}{k_1}\Rightarrow\boxed{R_2'=\frac{1}{k_1R_1'C_1C_2}}$$

$$\omega_0=\sqrt{\frac{K}{R_1'R_2'C_1C_2}}$$

Pro zvolené $C_1=C_2=C$ a $A^\infty=1\Rightarrow R_3=0$ a $R_4=\infty$

pak: $\boxed{\mathrm{R}_1{}' = \dfrac{k_2}{k_1 \cdot 2C}; \qquad R_2{}' = \dfrac{1}{k_1 C^2 R_1'} = \dfrac{2}{k_2 C}}$

Obvodové řešení DP a HP je tedy symetrické: $R \leftrightarrow C$