

Električni krugovi

Aktivni električni filtri

Filtri s aktivnim elementima – aktivni filtri

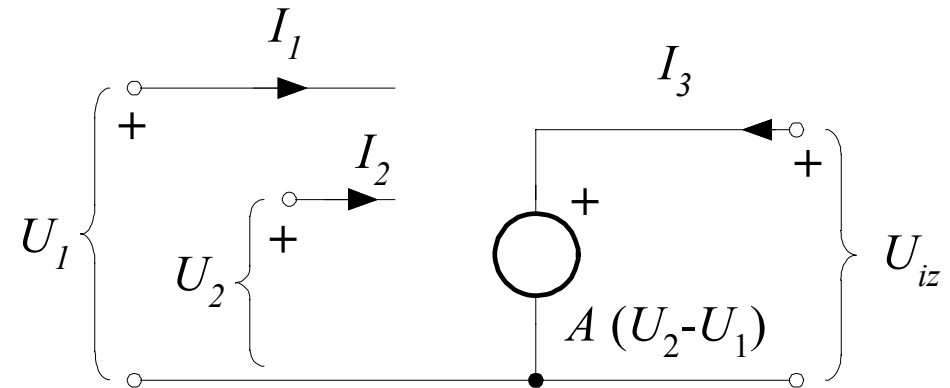
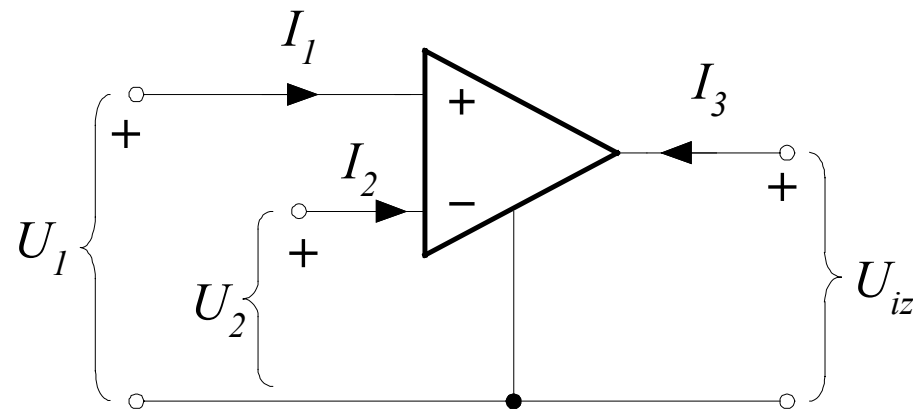
- Filtri s pasivnim R, L i C elementima imaju nedostatke:
 - karakteristike filtra ovise o opterećenju
 - nesavršenosti induktiviteta → u realizaciji:
 - → uvijek imaju gubitke
 - → velike dimenzije na niskim frekvencijama
- Moguće rješenje → Aktivni RC filtri



Najčešće s operacijskim pojačalima

- Prednosti aktivnih filtara pred pasivnim RLC filtrima:
 - ne sadrže induktivitete i njihove nedostatke
 - moguće neovisno djelovanje pojedinih stupnjeva filtra
 - jednostavniji postupci podešavanja karakteristika
 - pogodni za realizacije na niskim frekvencijama
 - proračun jednostavniji nego za pasivne filtre
- Nedostaci:
 - nesavršenosti operacijskih pojačala
 - poteškoće na visokim frekvencijama
 - potreba za izvorom napajanja
 - potrošnja energije

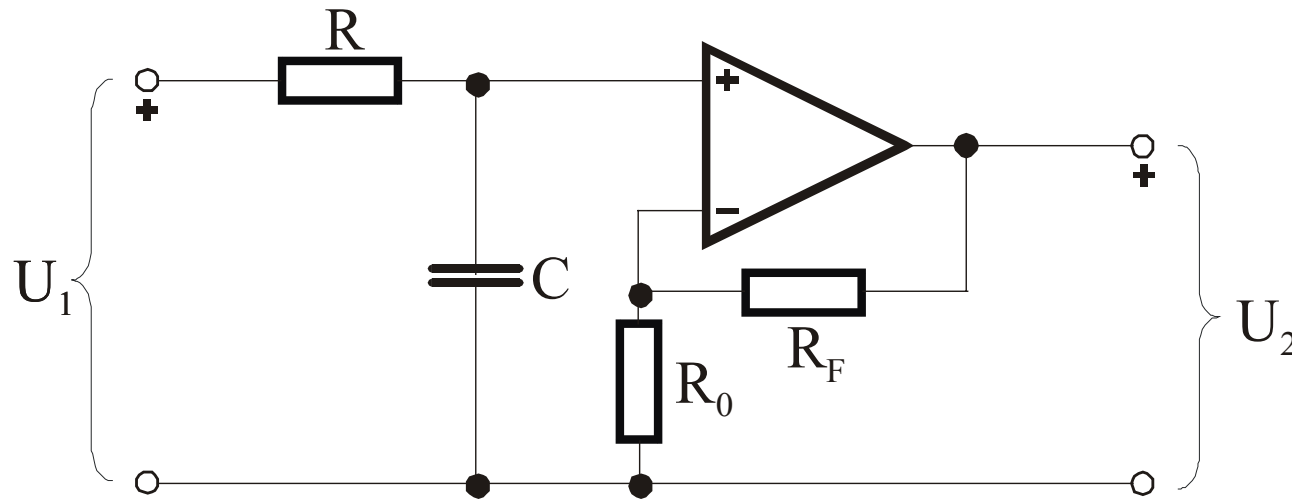
- Posebna pogodnost → operacijsko pojačalo na izlazu
- Operacijsko pojačalo tada ima dvojaku ulogu:
 - omogućava realizaciju kompleksnih polova
 - služi kao odjelni stupanj prema ostatku mreže



- Izlaz op. pojačala je naponski ovisni naponski izvor.
- Izlazni napon , a time i djelovanje filtra ne ovisi o onome što je priključeno na izlaz

Aktivni filtri 1. reda

- NP filter 1. reda s operacijskim pojačalom



$$H(s) = \left(1 + \frac{R_F}{R_0} \right) \cdot \frac{1/RC}{s + 1/RC}$$

- Opća prijenosna funkcija NP filtra 1. reda

$$H_{NP}(s) = \frac{k \cdot \omega_g}{s + \omega_g}$$

$$k = 1 + \frac{R_F}{R_0}$$

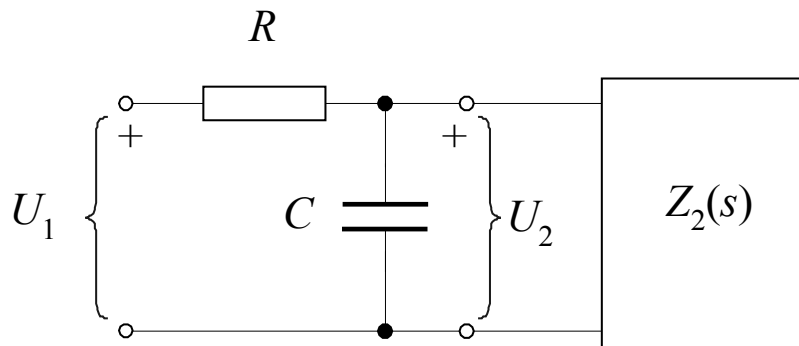
- Pojačanje pojačala = pojačanju filtra

- Očito je da je $k > 1$

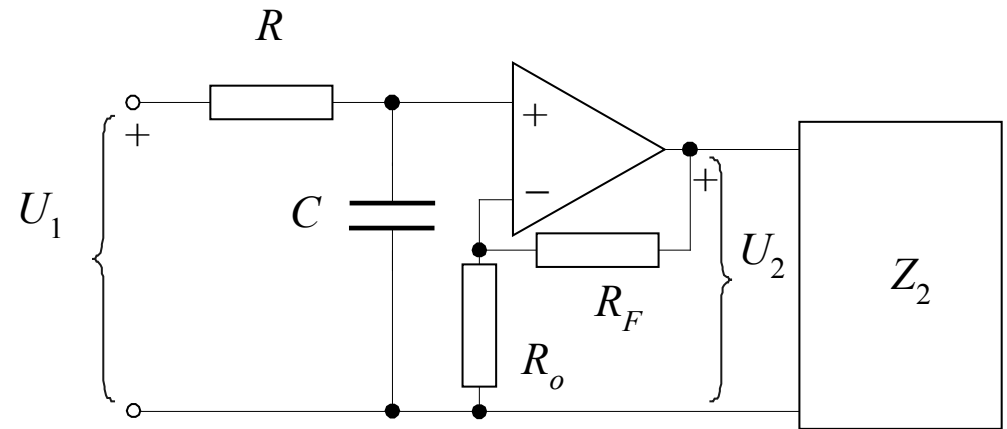
$$\omega_g = \frac{1}{RC}$$

- RC konstanta pasivne mreže

- Operacijsko pojačalo → vrlo niski izlazni otpor (idealno jednak nuli),
- Impedancija dvopola priključenog na njegov izlaz ne utječe na oblik prijenosne funkcije



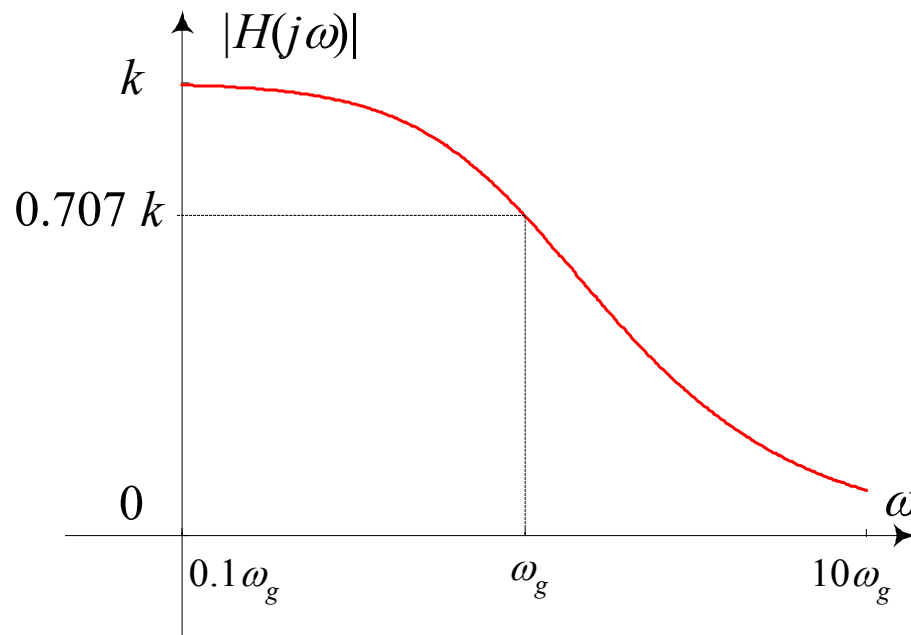
$$H(s) = \frac{1/RC}{s + 1/RC + 1/CZ_2}$$



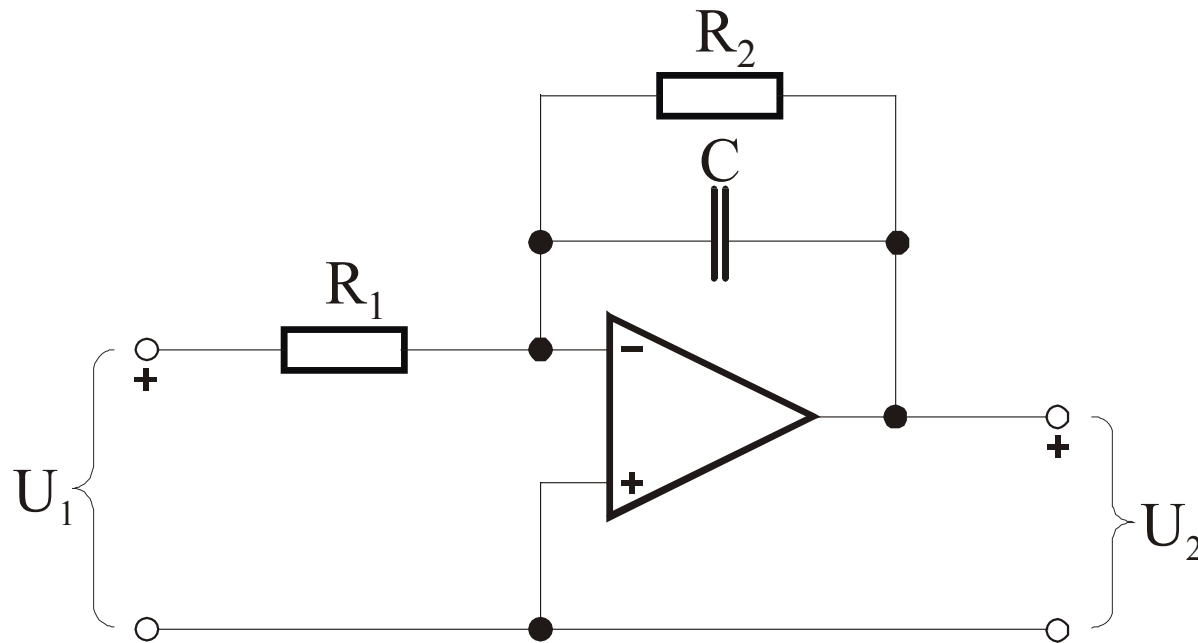
$$H(s) = \left(1 + \frac{R_F}{R_0}\right) \cdot \frac{1/RC}{s + 1/RC}$$

■ Frekvencijska karakteristika

$$|H(j\omega)| = \left(1 + \frac{R_F}{R_0}\right) \frac{1/RC}{\sqrt{\omega^2 + (1/RC)^2}}$$



- Filtar na slici koristi pojačalo s pozitivnim pojačanjem
 - → **neinvertirajuće pojačalo**
- Moguće je realizirati filter s invertirajućim pojačalom
- Pojačalo tada ima negativno pojačanje



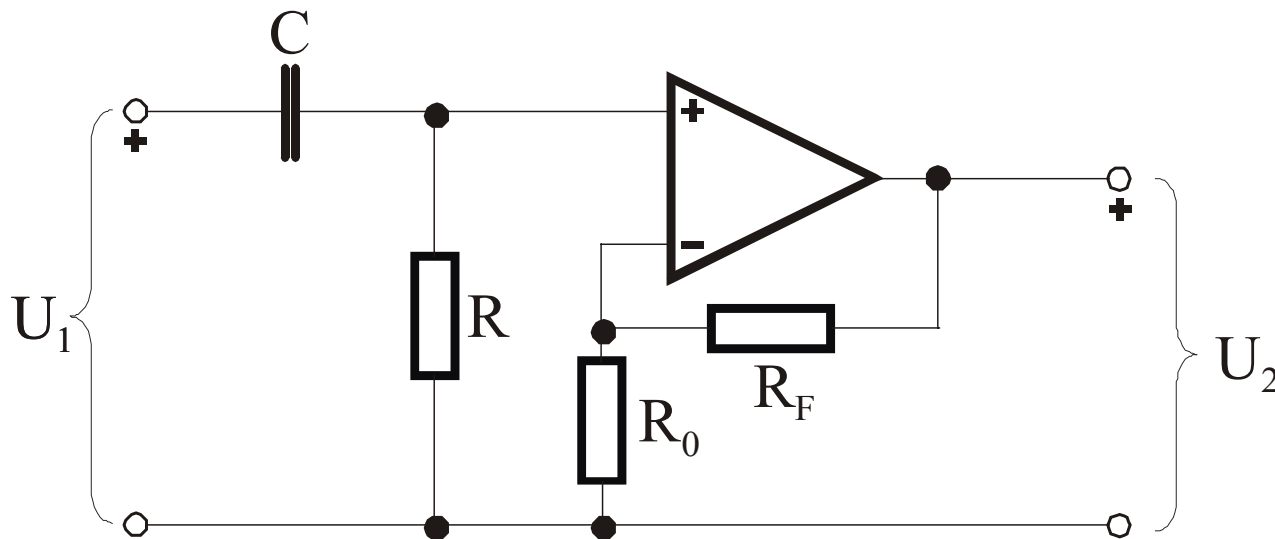
$$H(s) = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1/R_2 C}{s + 1/R_2 C}$$

$$k = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$\omega_g = \frac{1}{R_2 C}$$

VP filter 1. reda s operacijskim pojačalom

- Neinvertirajući spoj operacijskog pojačala



$$H(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \left(1 + \frac{R_F}{R_0} \right) \cdot \frac{s}{s + 1/RC}$$

- Opći oblik prijenosne funkcije 1. stupnja VP filtra:

$$H_{VP}(s) = k \cdot \frac{s}{s + \omega_g}$$

- Odatle slijedi

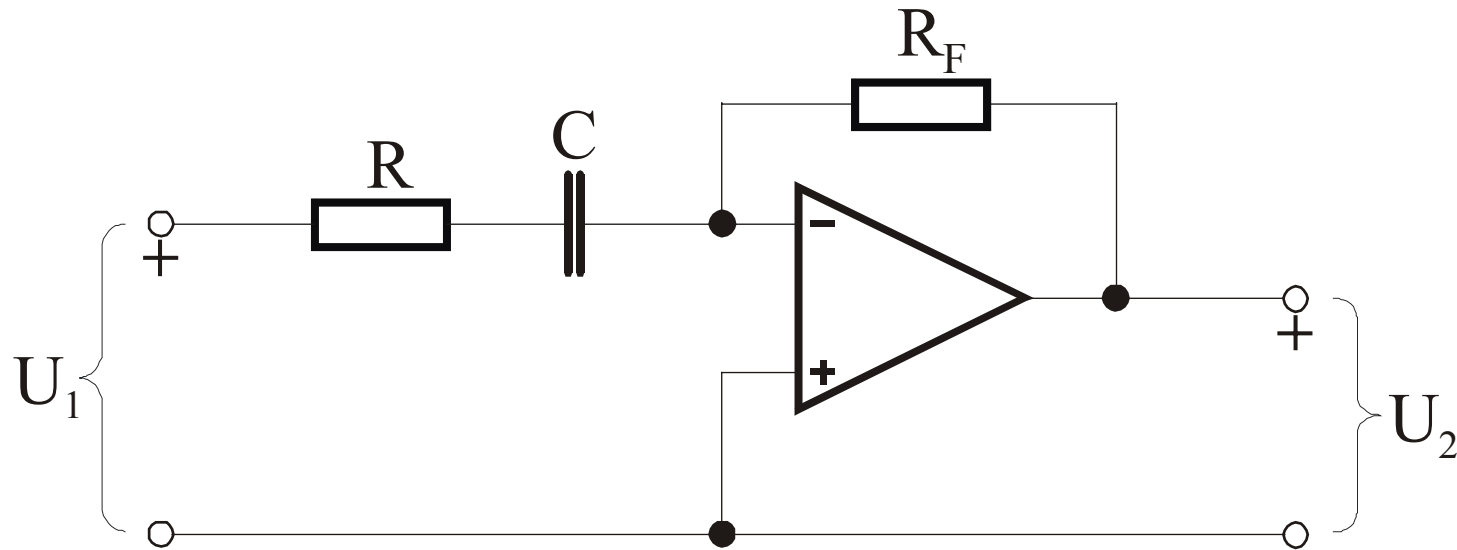
$$k = 1 + \frac{R_F}{R_0} > 1$$



pojačanje u području propuštanja,
tj. za $s \rightarrow \infty$ (ili VF pojačanje)

$$\omega_g = \frac{1}{RC}$$

VP filter s negativnim pojačanjem



Prijenosna funkcija

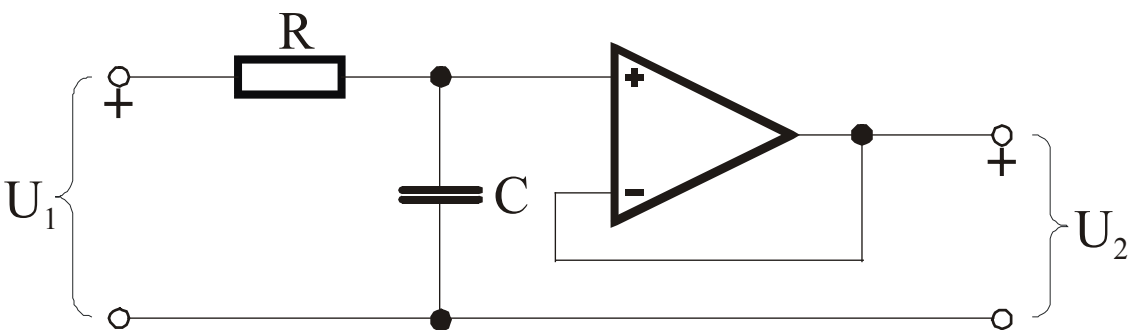
$$H(s) = -\frac{R_F}{R} \cdot \frac{s}{s + \frac{1}{RC}}$$

$$k = -\frac{R_F}{R}$$

$$\omega_g = \frac{1}{RC}$$

- Ponekad je dovoljno filter 1. reda realizirati kao pasivni RC-filter s jediničnim pojačalom na izlazu

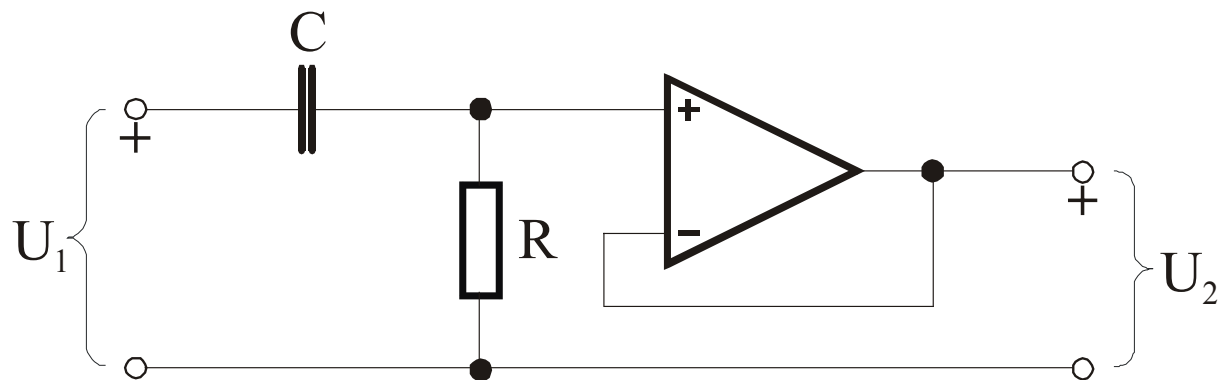
NP filter 1. reda



$$H(s) = \frac{1}{RC} \cdot \frac{1}{s + \frac{1}{RC}}$$

$$\omega_g = \frac{1}{RC} \quad k = 1$$

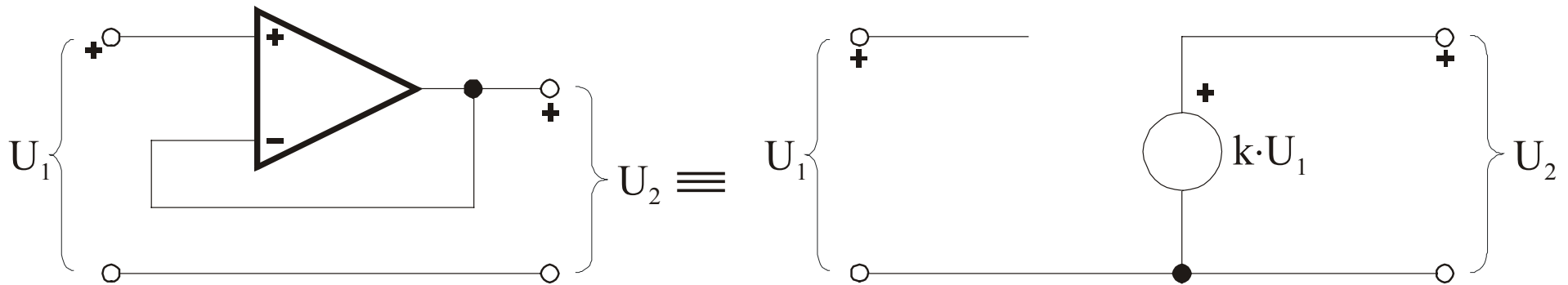
VP filter 1. reda



$$H(s) = \frac{s}{s + \frac{1}{RC}}$$

$$\omega_g = \frac{1}{RC} \quad k = 1$$

- Jedinično pojačalo ili naponsko slijedilo osigurava neovisnost prijenosne funkcije $H(s)$ o priključenoj impedanciji



$$U_2 = k \cdot U_1$$

$$k = 1 \Rightarrow U_2 = U_1$$

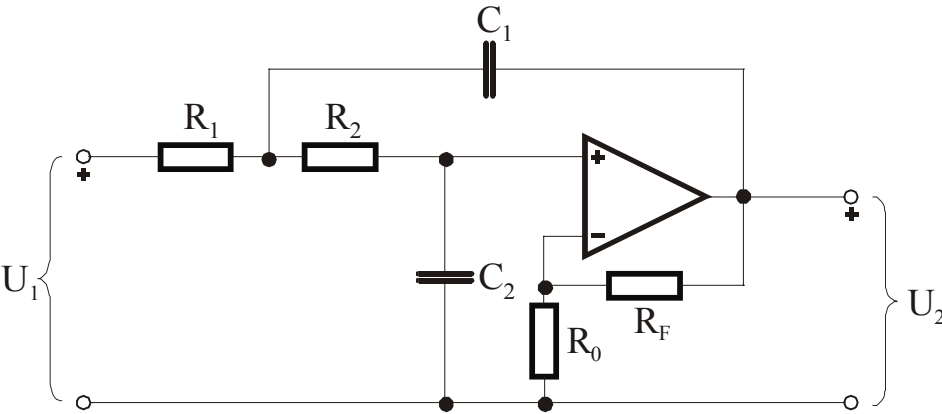
NP filtar 2. reda

- Opća NP prijenosnu funkciju 2. reda

$$H_{NP}(s) = k \cdot \frac{\omega_p^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p}s + \omega_p^2}$$

Moguće ostvariti mrežom s jednim operacijskim pojačalom

Prijenosna funkcija



$$H(s) = \frac{\left(1 + \frac{G_0}{G_F}\right) \frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}}{s^2 + s \left[\frac{G_1 + G_2}{C_1} - \frac{G_2}{C_2} \cdot \frac{G_0}{G_F} \right] + \frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}}$$

- Usporedbom s općom NP prijenosnom funkcijom

$$\omega_p = \sqrt{G_1 G_2 / C_1 C_2}$$

$$k = 1 + G_0 / G_F$$

$$Q_p = \frac{\sqrt{C_1 G_1 / C_2 G_2}}{1 + \frac{G_1}{G_2} + (1 - k) \cdot \frac{C_1}{C_2}}$$

$$H_{NP}(s) = k \cdot \frac{\omega_p^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} s + \omega_p^2}$$

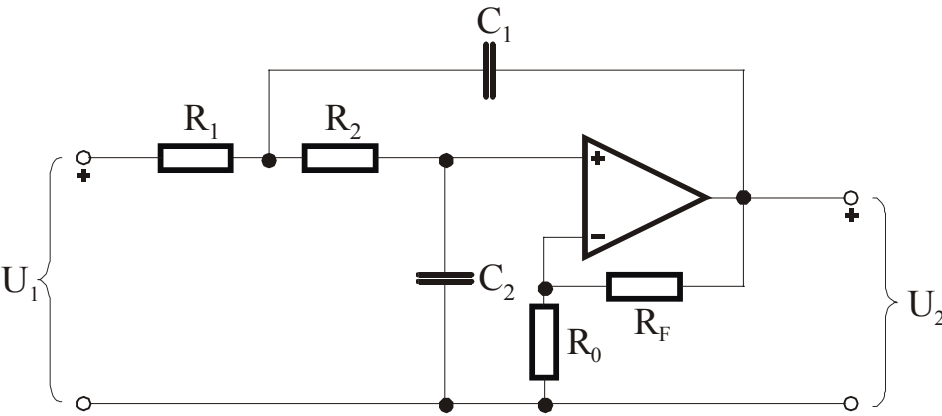
Primjer: Realizirati NP prijenosnu funkciju

$$H(s) = \frac{2}{s^2 + s + 1} = \frac{k\omega_p^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p}s + \omega_p^2}$$

- Normirana prijenosna funkcija \rightarrow rezultira s normiranim vrijednostima elemenata.
- Iz $H(s)$ \rightarrow parametri prijenosne funkcije:

$$k = 2 \quad \omega_p = 1 \quad Q_p = 1$$

\rightarrow 3 uvjeta koje treba ispuniti.

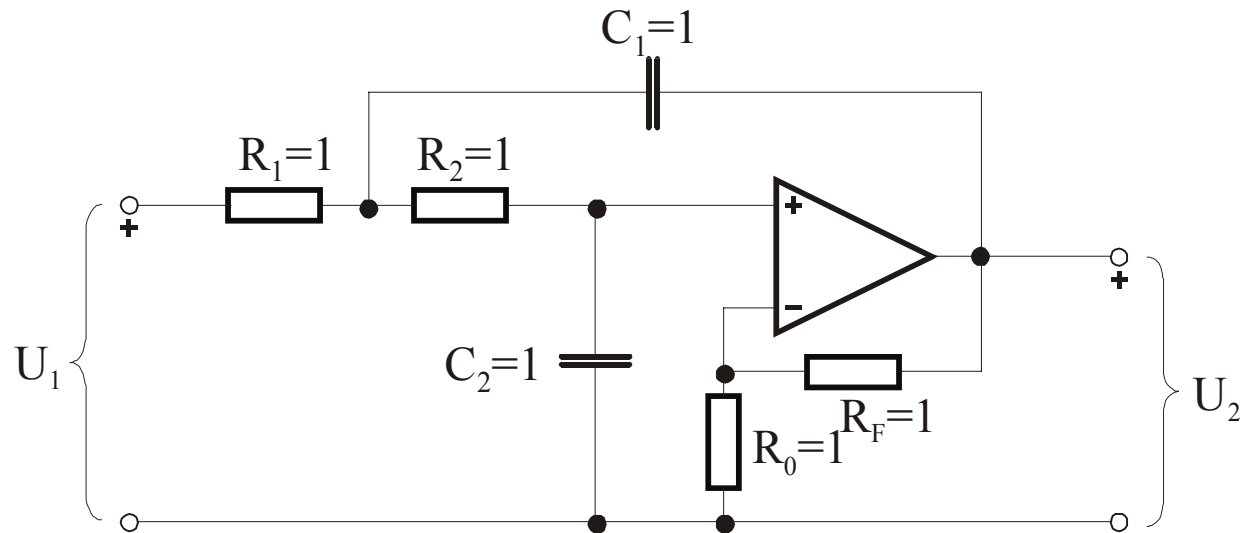


$$H(s) = \frac{\left(1 + \frac{G_0}{G_F}\right) \frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}}{s^2 + s \left[\frac{G_1 + G_2}{C_1} - \frac{G_2}{C_2} \cdot \frac{G_0}{G_F} \right] + \frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}}$$

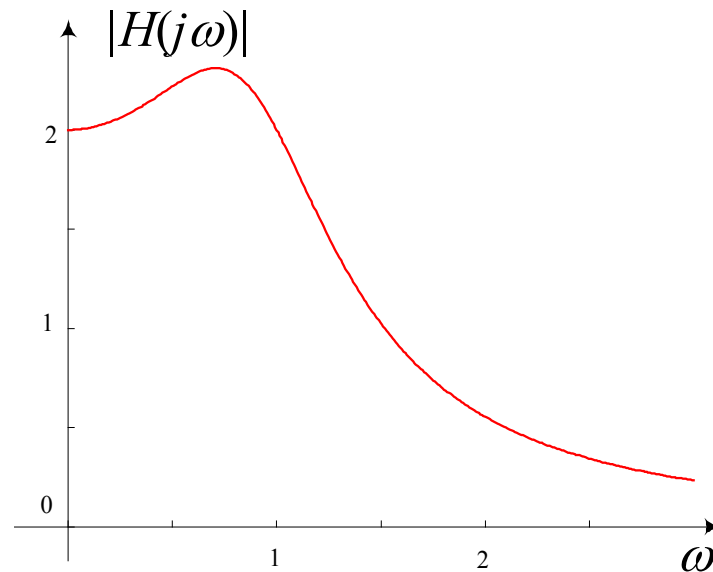
■ Filtar ima 6 elemenata → tri elementa → proizvoljno

Pretpostavka $C_1 = C_2 = C = 1$ $R_0 = 1$

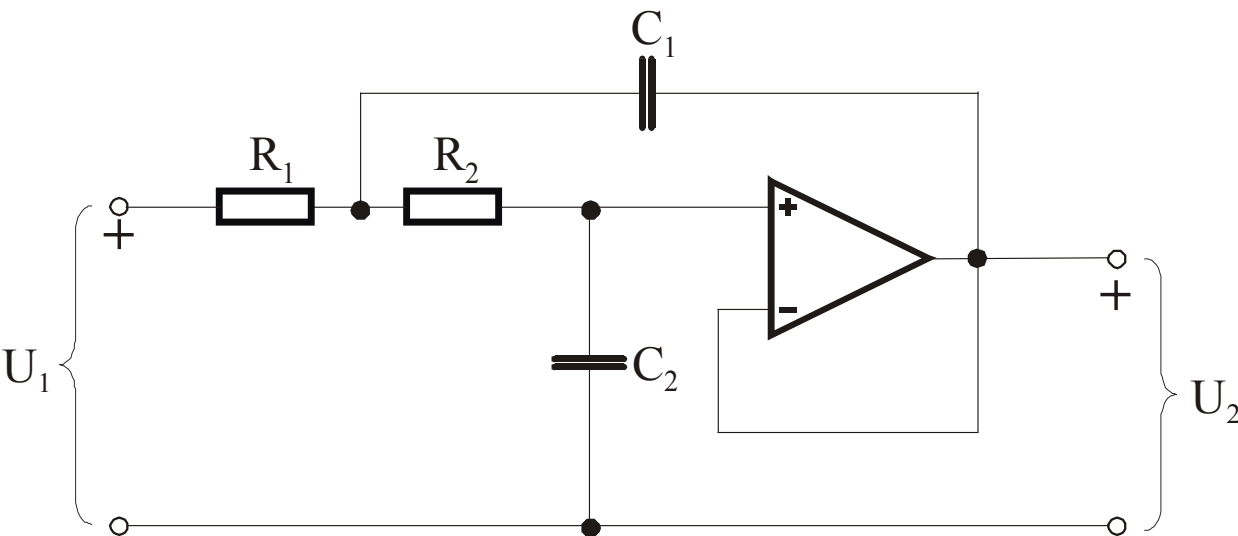
Aktivni filtri



Frekvencijska karakteristika



- Moguće je upotrijebiti jedinično pojačalo



$$H(s) = \frac{\frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}}{s^2 + s \frac{G_1 + G_2}{C_1} + \frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}}$$

$$\left. \begin{aligned} \omega_p &= \sqrt{\frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}} \\ Q_p &= \frac{\sqrt{\frac{C_1 G_1}{C_2 G_2}}}{1 + \frac{G_1}{G_2}} \end{aligned} \right\} 2 \text{ uvjeta}$$

Za zadani primjer:

$$\omega_p = 1$$

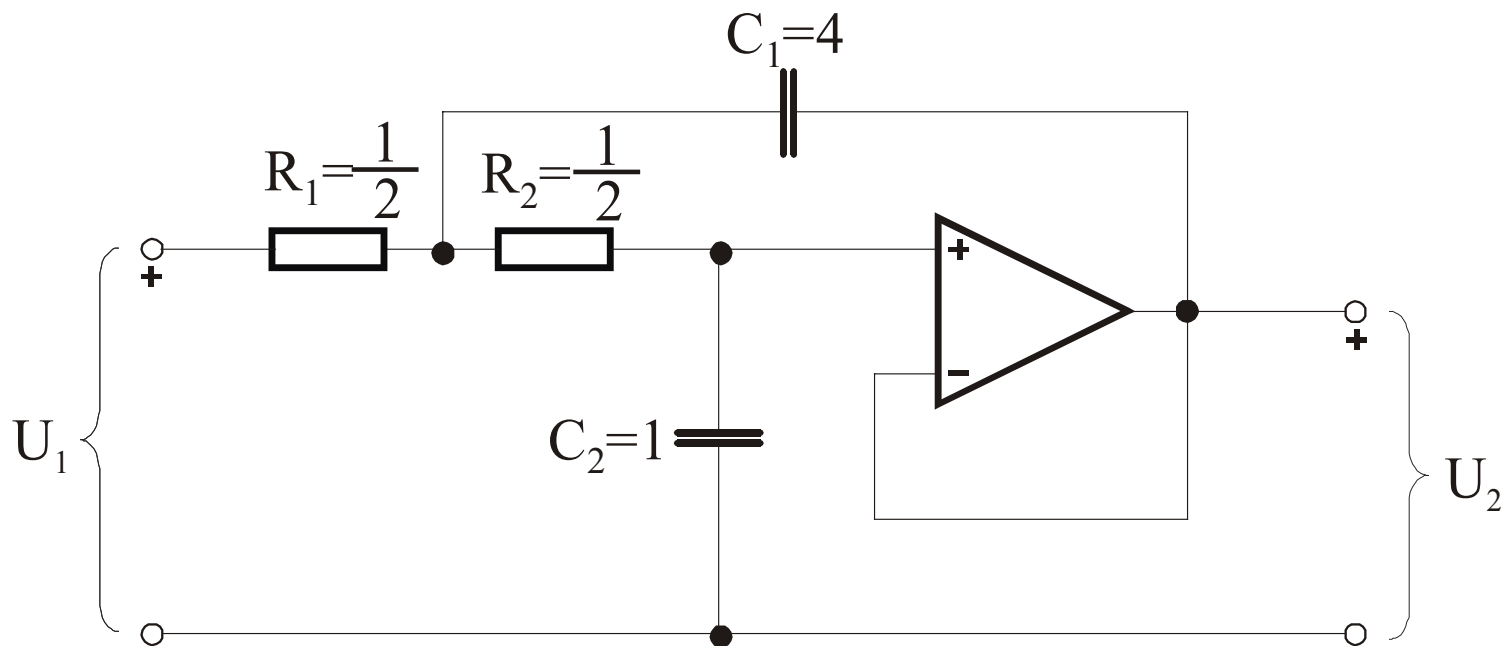
$$Q_p = 1$$

Zbog jediničnoga pojačanja pojačala

$$k = 1$$

$$\frac{\omega_p}{Q_p} = \frac{G_1 + G_2}{C_1} = 1$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}} = 1$$

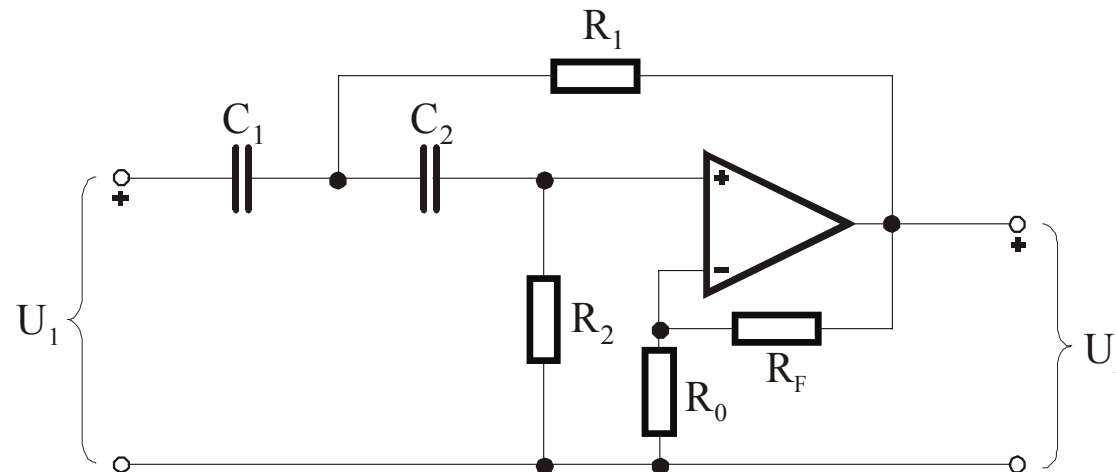


VP filter 2. reda

- Opća VP prijenosna funkciju 2. reda glasi

$$H_{VP}(s) = k \cdot \frac{s^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} s + \omega_p^2}$$

- Mreža kojom je moguće ostvariti tu funkciju ima oblik



- Prijenosna funkcija te mreže je

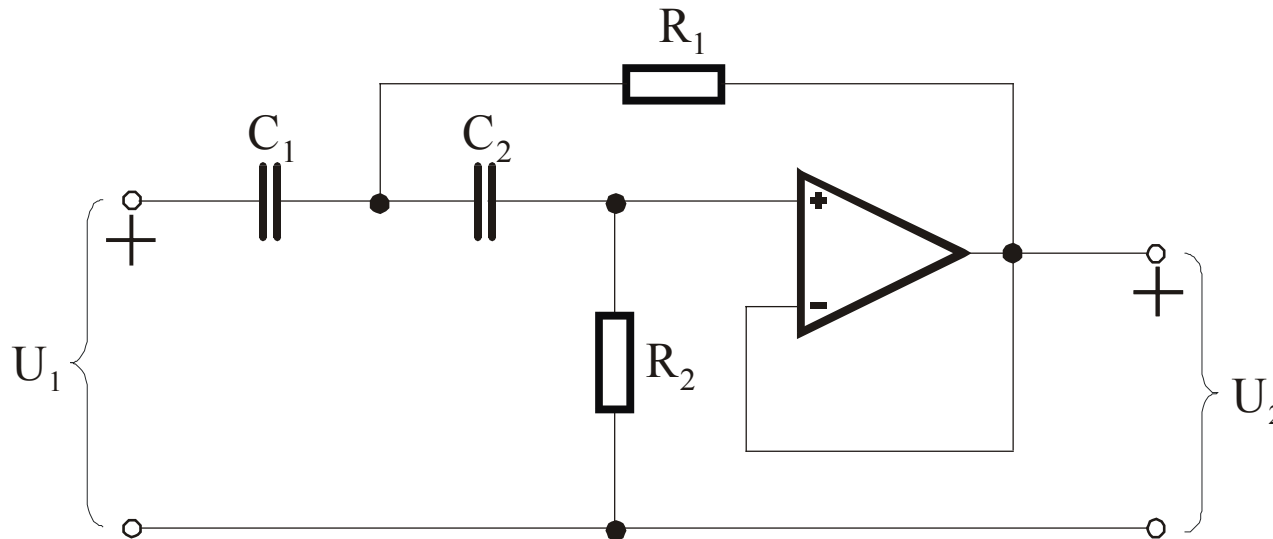
$$H(s) = \frac{\left(1 + \frac{G_0}{G_F}\right)s^2}{s^2 + s \left[G_2 \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) - \frac{G_1 G_0}{C_1 G_F} \right] + \frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}}$$

- Parametri prijenosne funkcije su

$$k = 1 + \frac{G_0}{G_F} \quad \omega_p = \sqrt{\frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}} \quad Q_p = \frac{\sqrt{\frac{C_1 G_1}{C_2 G_2}}}{1 + \frac{C_1}{C_2} - \frac{G_1}{G_2} \cdot \frac{G_0}{G_F}}$$

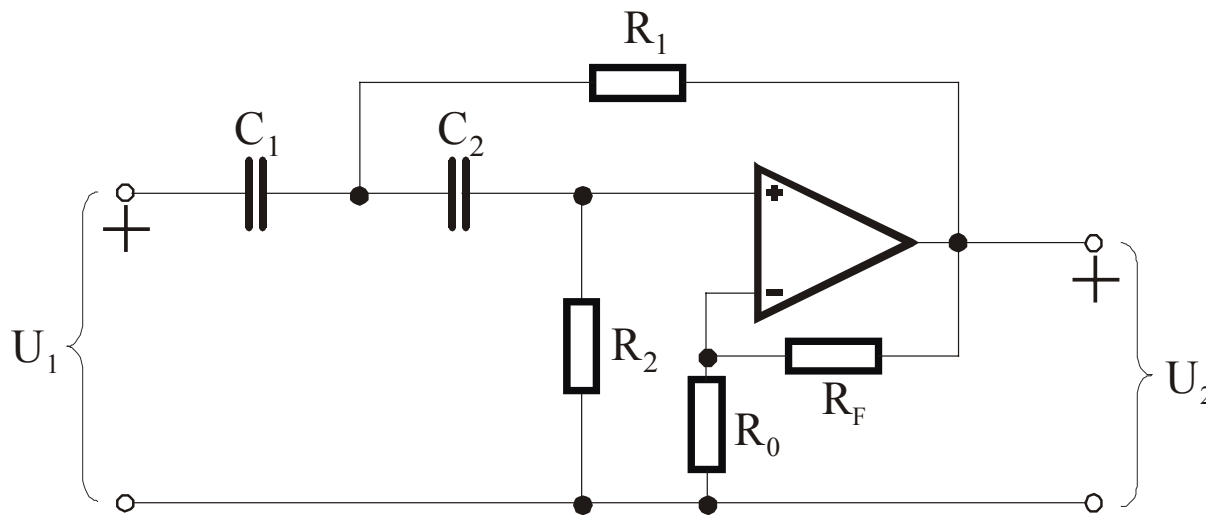
- Za realizaciju ovog filtra potrebno je ispuniti 3 uvjeta: k , ω_p , i Q_p .
- Mreža ima 6 pasivnih elemenata.
- Neke od njih (3) moguće je odabrati proizvoljno
 - ili postaviti dodatne uvjete.
 - Npr.: jednaki kapaciteti, ili
jednaki otpori R_1 i R_2 , ili
pojaćenje pojačala $k=1$ itd.

- Česta je upotreba jediničnoga pojačala (naponskog slijedila) pa je za $k=1 \Rightarrow G_0=0$ ili $R_F=0$



$$k = 1 \quad \omega_p = \sqrt{\frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}} \quad Q_p = \frac{\sqrt{\frac{C_1 G_1}{C_2 G_2}}}{1 + \frac{C_1}{C_2}}$$

- Primjer: VP filter 2. reda ima Q-faktor $Q=2$ i frekvenciju polova $\omega_p=10^3$ r/s. Odrediti elemente za konfiguraciju s $R_1=R_2$ i $C_1=C_2$.
- Odabrat ćemo: $R_1=R_2=R$ i $C_1=C_2=C$.



$$k = 1 + \frac{R_F}{R_0}$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}} = \frac{1}{RC}$$

$$Q_p = \frac{\sqrt{\frac{C_1 G_1}{C_2 G_2}}}{1 + \frac{C_1}{C_2} - \frac{G_1}{G_2} \cdot \frac{G_0}{G_F}} = \frac{1}{1 + 1 - \frac{G_0}{G_F}} = \frac{1}{2 - \frac{G_0}{G_F}}$$

$$\frac{R_F}{R_0} = 2 - \frac{1}{Q_p} = \frac{3}{2}$$

$$R_0 = 1 \cdot 10^3 \quad \longrightarrow \quad \text{proizvoljno}$$

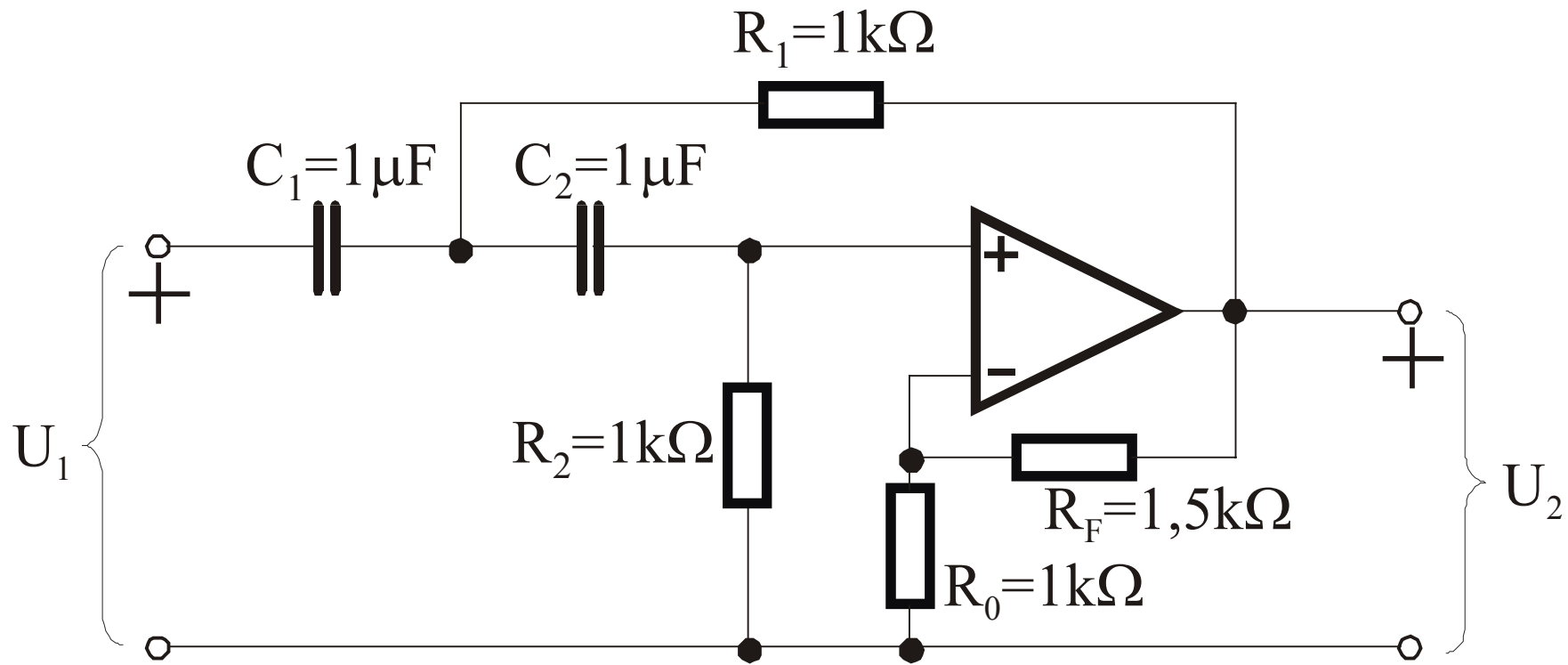
$$R_F = \frac{3}{2} R_0 = 1,5 \cdot 10^3 = 1,5 \text{ k}\Omega$$

$$k = 1 + \frac{R_F}{R_0} = 1 + \frac{3}{2} = 2,5$$

$$RC = \frac{1}{\omega_p} = \frac{1}{10^3}$$

$$R = 10^3 \Omega = 1 \text{ k}\Omega \quad \longrightarrow \quad \text{otpor normalizacije}$$

$$C = \frac{1}{\omega_p \cdot R} = 10^{-6} \text{ F} = 1 \mu\text{F}$$

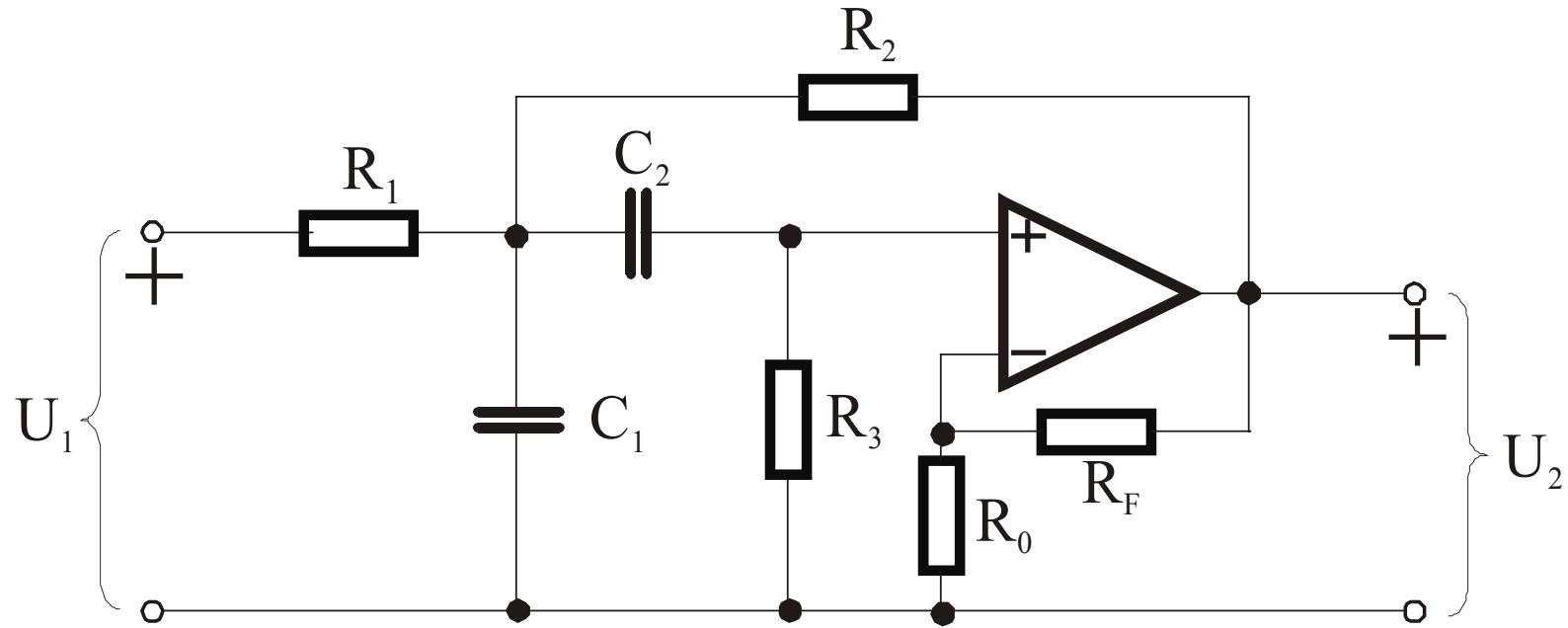


Pojasno propusni filter 2. reda

- Opću PP prijenosnu funkciju 2. reda

$$H_{PP}(s) = k \cdot \frac{\frac{\omega_p}{Q_p} s}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} s + \omega_p^2}$$

moguće je ostvariti kao aktivnu RC mrežu s jednim operacijskim pojačalom



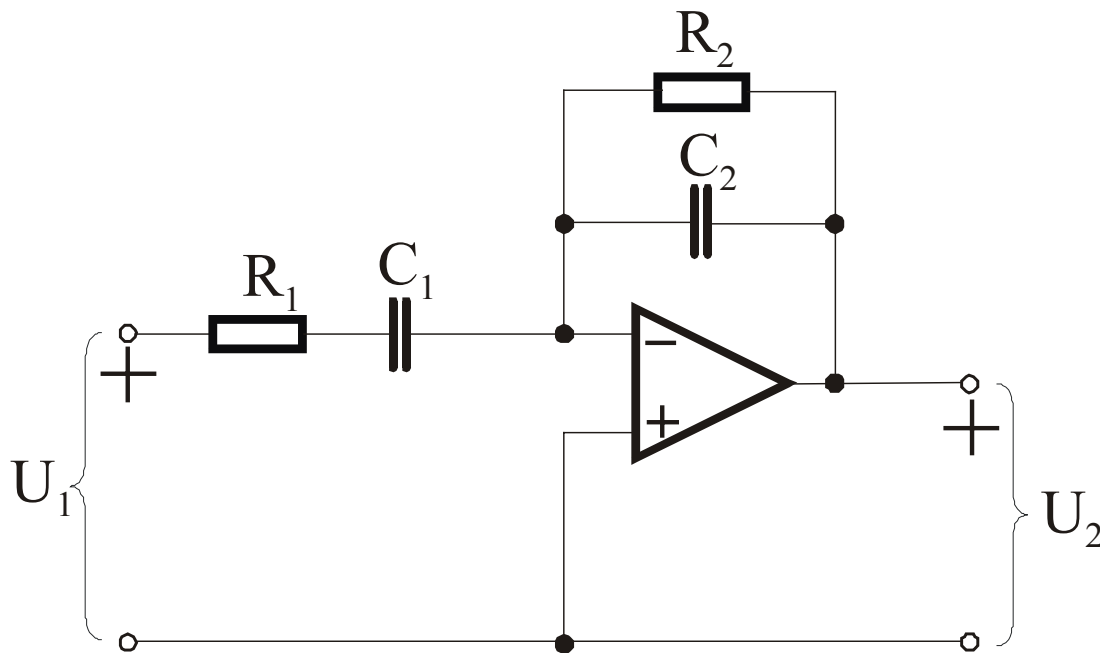
$$H(s) = \left(1 + \frac{R_F}{R_0}\right) \cdot \frac{\frac{G_1}{C_1} s}{s^2 + s \left(\frac{G_3}{C_1} + \frac{G_3}{C_2} + \frac{G_1 + G_2}{C_1} - \left(1 + \frac{G_0}{G_F}\right) \frac{G_2}{C_1} \right) + \frac{(G_1 + G_2)G_3}{C_1 C_2}}$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{(G_1 + G_2)G_3}{C_1 C_2}}$$

$$Q_p = \frac{\sqrt{\frac{G_3}{G_1 + G_2} \cdot \frac{C_2}{C_1}}}{\frac{G_3}{G_1 + G_2} \cdot \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) + \frac{C_2}{C_1} - \left(1 + \frac{G_0}{G_F}\right) \frac{G_2}{G_1 + G_2}}$$

Širokopojasni PP filter

- PP filter s velikom širinom pojasa, odnosno malim Q-faktorom, moguće je realizirati kao
 - kombinaciju NP i VP filtra 1. reda



$$Z_2(s) = \frac{1/C_2}{s + 1/R_2C_2}$$

$$Z_1(s) = R_1 \frac{s + 1/R_1C_1}{s}$$

Prijenosna funkcija

$$H(s) = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{s \cdot \frac{1}{R_1 C_2}}{\left(s + \frac{1}{R_1 C_1}\right) \left(s + \frac{1}{R_2 C_2}\right)}$$

$$H(s) = k \cdot \frac{\frac{\omega_p}{Q_p} s}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} s + \omega_p^2}$$

$$H(s) = - \frac{s \cdot \frac{1}{C_2 R_1}}{s^2 + s \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2} \right) + \frac{1}{R_1 C_1 R_2 C_2}}$$

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

$$k = \frac{1}{\frac{C_2}{C_1} + \frac{R_1}{R_2}}$$

$$Q_p = \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} + \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1} + \sqrt{R_2 C_2}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2}} + \sqrt{\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}}} \leq 0.5$$

Kod ove mreže Q-faktor ne može biti veći od 0,5

$$Q_p \leq 0,5$$

jer mreža ima dva realna pola

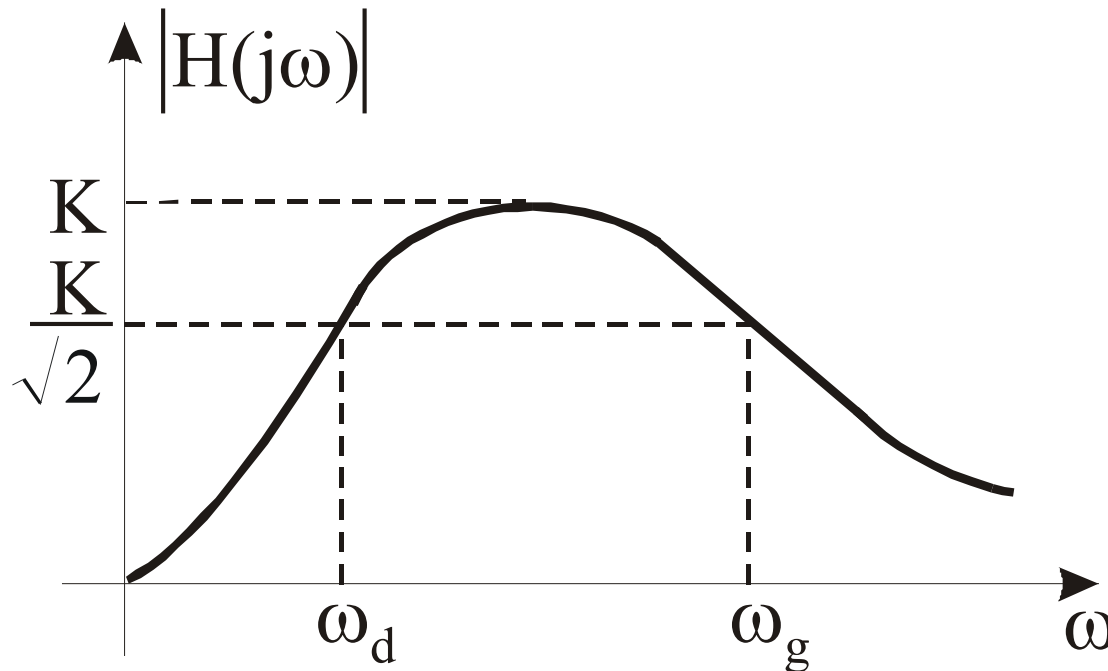
$$s_{p_1} = -\frac{1}{R_1 C_1} = -\omega_d$$

$$s_{p_2} = -\frac{1}{R_2 C_2} = -\omega_g$$

Funkciju $H(s)$ moguće je napisati i kao

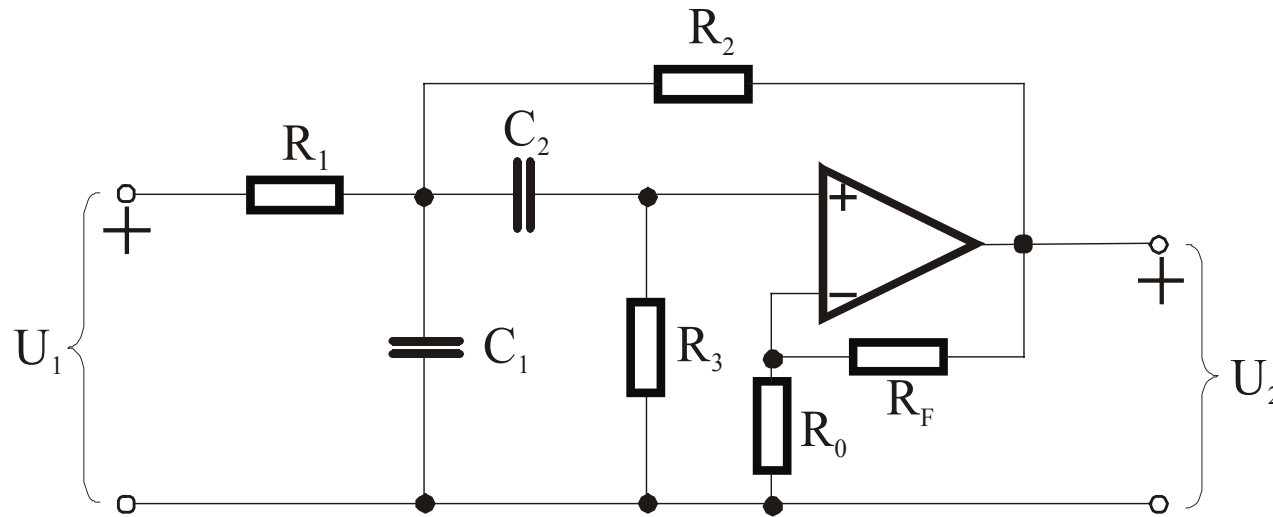
$$H(s) = -k \cdot \frac{s}{s + \omega_d} \cdot \frac{\omega_g}{s + \omega_g} \quad \omega_g = \frac{1}{R_2 C_2} \quad \omega_d = \frac{1}{R_1 C_1}$$

Amplitudno frekvencijska karakteristika



$$k = \frac{R_2}{R_1}$$

Primjer: Uskopojasni PP filter



Pošto je broj elemenata veći od broja uvjeta, moguće je neke elemente uzeti proizvoljno ili dodati nove uvjete.

Npr. \rightarrow dodatni uvjeti $C_1=C_2=C$ i $R_F=R_0$.

Tada je

$$Q_p = \frac{\omega_p}{\frac{G_3}{C_1} + \frac{G_3}{C_2} + \frac{G_1 + G_2}{C_1} - \left(1 + \frac{G_0}{G_F}\right) \frac{G_2}{C_1}} = \frac{C\omega_p}{2G_3 + G_1 - G_2}$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{(G_1 + G_2)G_3}{C_1 C_2}} = \frac{\sqrt{(G_1 + G_2)G_3}}{C} \quad k = \frac{2Q_p}{R_1 C \omega_p}$$

Broj nepoznanica je 4 \rightarrow jedna proizvoljno

- Odabere li se proizvoljna vrijednost za kapacitet C, tada su ostali elementi

$$R_1 = \frac{2Q_p}{k\omega_p C}$$

$$R_2 = \frac{kR_1}{\sqrt{(k-1)^2 + 8Q_p^2} - 1}$$

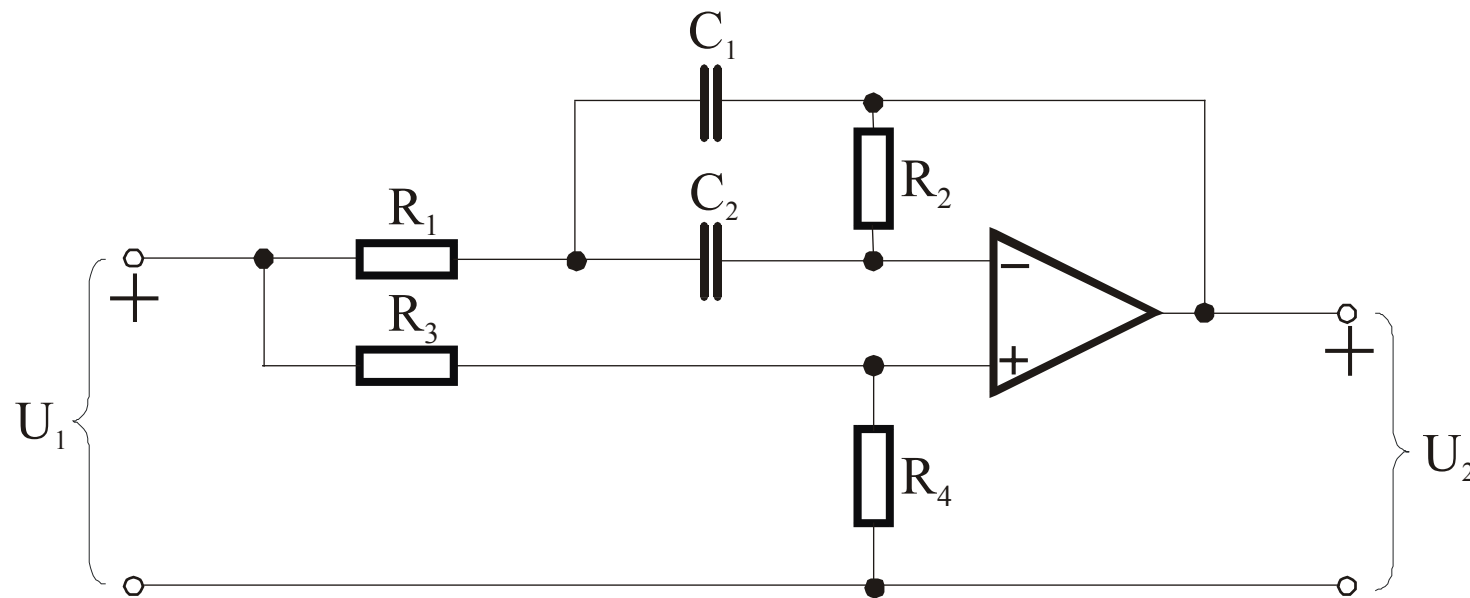
$$R_3 = \frac{k^2 R_1 (R_1 + R_2)}{4Q_p^2 R_2}$$

Pojasna brana 2. reda

Opća prijenosna funkcija pojasne brane 2. reda glasi:

$$H_{PB}(s) = k \cdot \frac{s^2 + \omega_p^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} s + \omega_p^2}$$

Realizacija ove funkcije moguća je aktivnom mrežom s jednim operacijskim pojačalom.



- U realizaciji PB \rightarrow nule na $j\omega$ -osi.
- To je ispunjeno ako brojnik ne sadrži član s^1 .

Mrežom na slici realizira se prijenosna funkcija:

$$H_{PB}(s) = k \cdot \frac{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_z} s + \omega_p^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} s + \omega_p^2}$$

Za pojasnu branu mora biti srednji član brojnika jednak nuli tj. $Q_z \rightarrow \infty$.

- Proračun prijenosne funkcije mreže na slici daje

$$H(s) = \frac{G_3}{G_3 + G_4} \cdot \frac{s^2 + s \left[G_2 \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) - \frac{G_1 G_4}{C_1 G_3} \right] + \frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}}{s^2 + s \left[G_2 \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \right] + \frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}}$$

Uvjet za pojasnu branu ($Q_z \rightarrow \infty$) moguće je postići ako je

$$G_2 \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) = \frac{G_1 G_4}{C_1 G_3}$$

Tada prijenosna funkcija filtra glasi

$$H(s) = \frac{G_3}{G_3 + G_4} \cdot \frac{s^2 + \frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}}{s^2 + s G_2 \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) + \frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}}$$

Usporedbom s općom funkcijom dobiva se

$$\omega_p = \sqrt{\frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}} \quad Q_p = \frac{\omega_p}{G_2} \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad k = \frac{G_3}{G_3 + G_4}$$

To su uvjeti koji moraju biti ispunjeni za realizaciju PB.

■ Primjer: Realizirati pojasnu branu za eliminaciju signala frekvencije 50 Hz, s Q-faktorom $Q=2$, koristeći jednake kapacitete.

$$C_1 = C_2 = C = 10 \mu F$$

$$\omega_p = \frac{1}{C} \sqrt{G_1 G_2}$$

\Downarrow

$$\sqrt{G_1 G_2} = C \cdot \omega_p = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 2\pi \cdot 50$$

\Downarrow

$$\sqrt{R_1 R_2} = 1000 / \pi = 318,3 \Omega$$

$$Q_p = \frac{\omega_p}{G_2} \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{\omega_p C}{2G_2} = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{G_1 G_2}}{G_2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{G_1}{G_2}} = 2$$

$$\sqrt{\frac{G_1}{G_2}} = \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} = 4 \qquad \sqrt{R_1 R_2} = 318,3 \Omega$$

$$R_2 = 4 \cdot 318,3 = 1,273 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = \frac{318,3}{4} = 79,57 \Omega$$

Uvjet za pojasnu branu

$$\frac{G_4}{G_3} \cdot \frac{G_1}{C_1} = G_2 \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)$$

$$\frac{G_4}{G_3} = \frac{G_2}{G_1} C_1 \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) = \frac{G_2}{G_1} \cdot 2 = \frac{R_1}{R_2} \cdot 2 = \frac{1}{8}$$

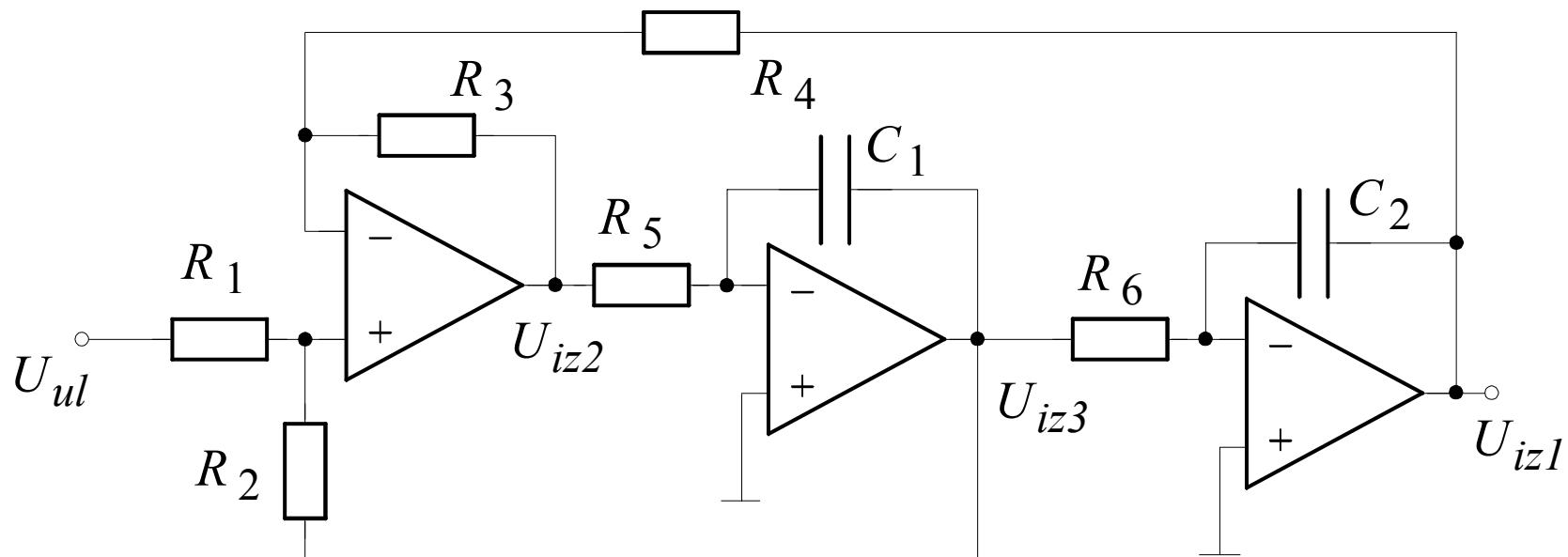
$$R_4 = 8R_3$$

$$R_3 = 1\text{k}\Omega$$

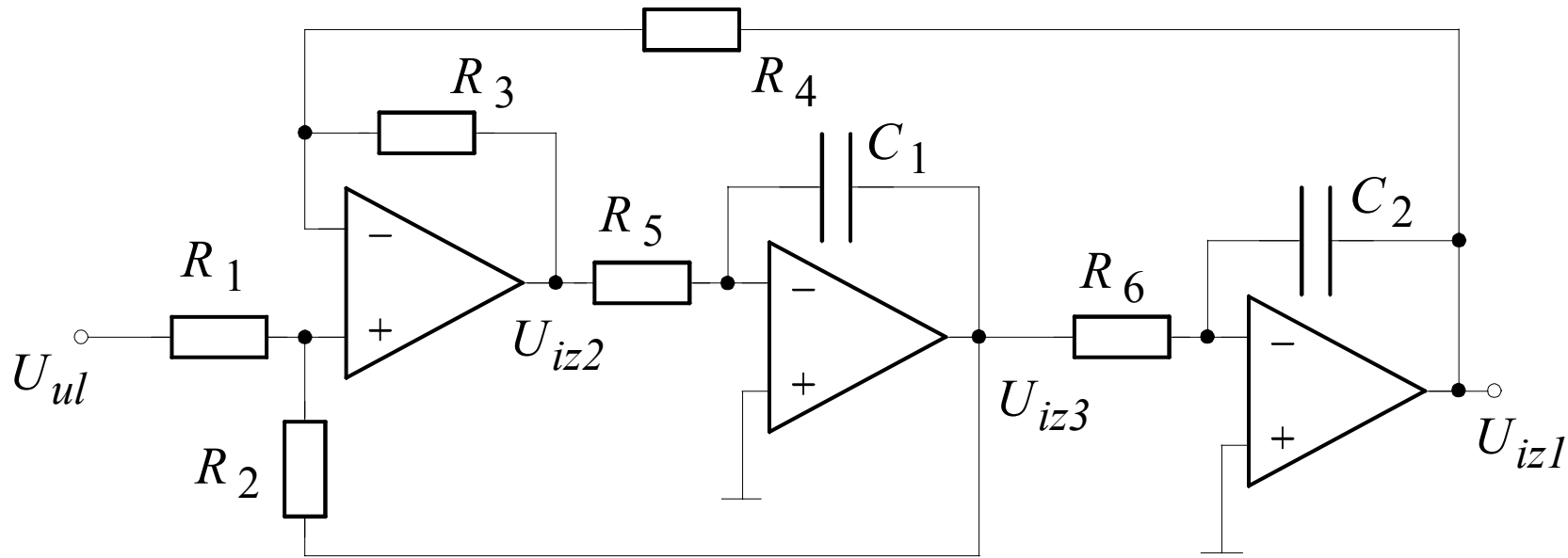
$$R_4 = 8\text{k}\Omega$$

Univerzalna filtarska sekcija 2. reda

- U praksi se često koristi sekcija s tri pojačala.



- Posebna kvaliteta → velika fleksibilnost primjene.
- Moguće realizirati osnovne prijenosne funkcije 2. stupnja:
 - niskopropusnu,
 - visokopropusnu,
 - pojasnopropusnu,
 - pojasnu branu (s dodatkom još jednog operac. pojačala)
- Naziva se **univerzalnom filtarskom sekcijom**.



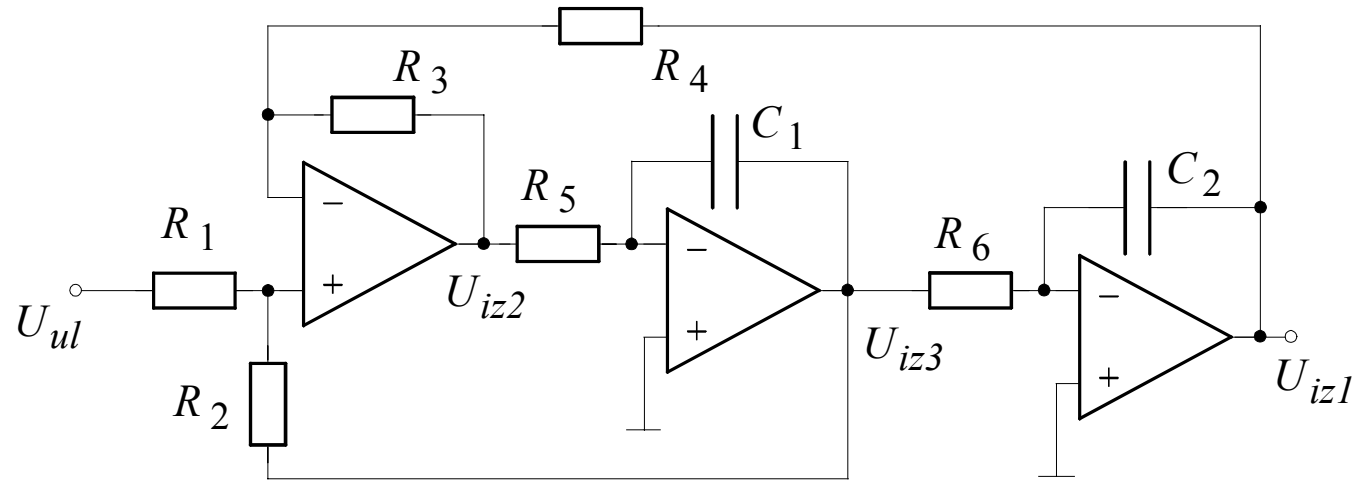
- Analizom sekcije moguće je dobiti prijenosne funkcije:

$$\frac{U_{iz1}(s)}{U_{ul}(s)}$$

$$\frac{U_{iz2}(s)}{U_{ul}(s)}$$

$$\frac{U_{iz3}(s)}{U_{ul}(s)}$$

- Svaka od njih realizira jednu prijenosnu funkciju filtra.



■ Analiza sekcije:

$$U_{iz1}(s) = -\frac{1}{R_6 C_2 s} U_{iz3}(s)$$

$$U_{iz3}(s) = -\frac{1}{R_5 C_1 s} U_{iz2}(s)$$

$$U_{iz2} = \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) \frac{R_2 U_{ul}}{R_1 + R_2} + \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) \frac{R_1 U_{iz3}}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_4} U_{iz1}$$

- Moguće je ostvariti 3 prijenosne funkcije.
- NP prijenosna funkcija:
 - Ulazni napon U_{ul}
 - Izlazni napon U_{iz1}

$$H_{NP}(s) = \frac{U_{iz1}}{U_{ul}} = \frac{\frac{G_1(G_4 + G_3)G_5G_6}{G_3(G_1 + G_2)C_1C_2}}{s^2 + s \left[\frac{G_2G_5(G_4 + G_3)}{G_3(G_1 + G_2)C_1} \right] + \frac{G_4G_5G_6}{G_3C_1C_2}}$$

■ VP prijenosna funkcija:

- Ulazni napon U_{ul}
- Izlazni napon U_{iz2}

$$H_{VP}(s) = \frac{U_{iz2}}{U_{ul}} = \frac{\frac{G_1(G_4 + G_3)}{G_3(G_1 + G_2)} s^2}{s^2 + s \left[\frac{G_2 G_5 (G_4 + G_3)}{G_3 (G_1 + G_2) C_1} \right] + \frac{G_4 G_5 G_6}{G_3 C_1 C_2}}$$

■ PP prijenosna funkcija:

- Ulazni napon U_{ul}
- Izlazni napon U_{iz3}

$$H_{PP}(s) = \frac{U_{iz3}}{U_{ul}} = \frac{-\frac{G_1(G_4 + G_3)G_5}{G_3(G_1 + G_2)C_1}s}{s^2 + s\left[\frac{G_2G_5(G_4 + G_3)}{G_3(G_1 + G_2)C_1}\right] + \frac{G_4G_5G_6}{G_3C_1C_2}}$$

- Za sve prijenosne funkcije vrijedi:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{G_4 G_5 G_6}{G_3 C_1 C_2}}$$

$$k_{NP} = \frac{G_1 (G_4 + G_3)}{G_4 (G_1 + G_2)}$$

$$Q_p = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \frac{\sqrt{G_4 G_6}}{\sqrt{G_3 G_5}} \cdot \frac{1 + \frac{G_1}{G_2}}{1 + \frac{G_4}{G_3}}$$

$$k_{PP} = \frac{G_1}{G_2}$$

$$k_{VP} = \frac{G_1 (G_4 + G_3)}{G_3 (G_1 + G_2)}$$

- Broj pasivnih elemenata filtra je 8.
- Broj uvjeta koje treba ispuniti je 3.
- Prema tome 5 elemenata je moguće proizvoljno odabrati.
- U praktičnim realizacijama uobičajeno je odabrati

$$G_5 = G_6 = G$$

$$C_1 = C_2 = C$$

pa je

$$\omega_p = \sqrt{\frac{G_4}{G_3}} \cdot \frac{G}{C}$$

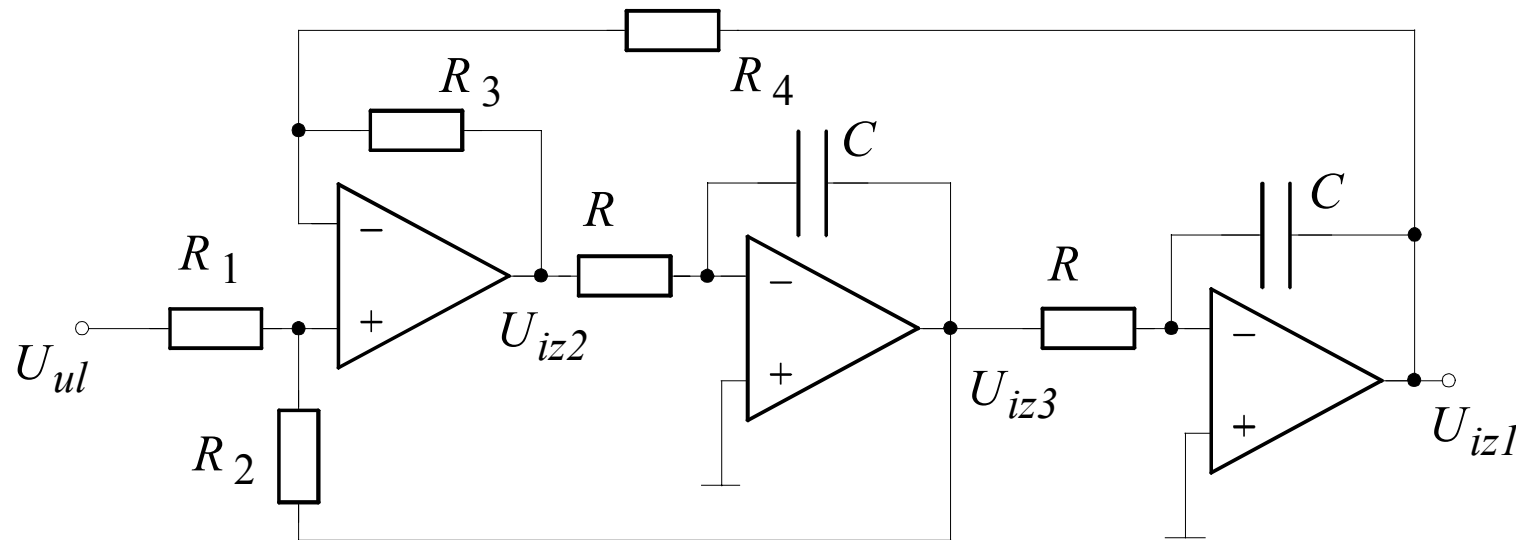
$$Q_p = \sqrt{\frac{G_4}{G_3}} \cdot \frac{1 + \frac{G_1}{G_2}}{1 + \frac{G_4}{G_3}}$$

čime je broj nepoznanica smanjen.

- Primjer: Realizirati filter s prijenosnom funkcijom

$$H(s) = \frac{6}{s^2 + 3s + 5}$$

- Rješenje: Funkciju ćemo realizirati mrežom s 3 operacijska pojačala uz $G_5 = G_6 = G$ $C_1 = C_2 = C$



- Za parametre prijenosne funkcije tada vrijedi

$$\omega_p^2 = \frac{G_4}{G_3} \cdot \left(\frac{G}{C} \right)^2 = 5$$

$$\omega_p^2 = \frac{G_4}{G_3} = 5$$

$$\frac{\omega_p}{Q_p} = \frac{G}{C} \cdot \frac{1 + \frac{G_4}{G_3}}{1 + \frac{G_1}{G_2}} = 3$$

$$\frac{\omega_p}{Q_p} = \frac{1 + \omega_p^2}{1 + \frac{G_1}{G_2}} = 3$$

$$k_{NP} = \frac{G_1(G_4 + G_3)}{G_4(G_1 + G_2)} = ?$$

$$k_{NP} = \frac{1 + \frac{G_3}{G_4}}{1 + \frac{G_2}{G_1}} = \frac{1 + \frac{1}{5}}{1 + \frac{G_2}{G_1}}$$

- Odabrat ćemo proizvoljne vrijednosti normiranih elemenata

$$G = 1$$

$$C = 1$$

$$G_4 = 1$$

pa je :

$$G_3 = \frac{G_4}{\omega_p^2} = \frac{1}{5}$$

podešavanje: sa G_3 : ω_p
sa G_2 : q_p

$$\frac{\omega_p}{Q_p} = \frac{6}{1 + \frac{G_2}{G_1}} = 3 \Rightarrow 1 + \frac{G_2}{G_1} = \frac{6}{3} = 2 \Rightarrow G_2 = G_1$$

elementi :

$$G_1 = G_2 = 1$$

$$G_3 = \frac{1}{5}$$

$$G_4 = 1$$

pojačanje $k_{NP} = \frac{1 + \frac{G_3}{G_4}}{1 + \frac{G_2}{G_1}} = \frac{1 + \frac{1}{5}}{1 + 1} = \frac{\frac{6}{5}}{2} = \frac{3}{5}$

- Prema tome mreža ima konačan oblik

