

# **Semestrální práce z předmětu X31EO3**

***Název: Návrh LC filtru***

**Jméno: Tomáš Hejda**

**Číslo zadání: 2**

## 2.1 Zadání úlohy (výchozí toleranční schéma)

Pásmová propust (PP):

- útlum v propustném pásmu  $a_p=1\text{dB}$
- útlum v nepropustném pásmu  $a_s=19\text{dB}$
- dolní mez nepropustného pásma  $f_{-s}=100\text{Hz}$
- meze propustného pásma  $f_{-p}=580\text{Hz}$   
 $f_p=2600\text{Hz}$
- horní mez nepropustného pásma  $f_s=4650\text{Hz}$

## 2.2 Toleranční schéma normované dolní propusti (NDP)

V prvním kroku se provede transformace PP na NDP.

$$\Delta f = f_p - f_{-p} = 2600 - 580\text{Hz} = 2020\text{Hz}$$

$$f_m = \sqrt{f_p \cdot f_{-p}} = \sqrt{2600 \cdot 580}\text{Hz} = 1228,006515\text{Hz}$$

$$\sqrt{f_s \cdot f_{-s}} = \sqrt{4650 \cdot 100}\text{Hz} = 681,9090848\text{Hz}$$

Protože  $\sqrt{f_p \cdot f_{-p}} \neq \sqrt{f_s \cdot f_{-s}}$ , je PP nesymetrická a filtry, ze kterých se skládá mají tedy rozdílnou selektivitu. Proto je potřeba PP transformovat na symetrickou.

$$\Omega_p = \frac{f_p^2 - f_m^2}{\Delta f \cdot f_p} = \frac{2600^2 - 1228,006515^2}{2020 \cdot 2600} = 1$$

$$\Omega_{-p} = \frac{f_{-p}^2 - f_m^2}{\Delta f \cdot f_{-p}} = \frac{580^2 - 1228,006515^2}{2020 \cdot 580} = -1$$

$$\Omega_s = \frac{f_s^2 - f_m^2}{\Delta f \cdot f_s} = \frac{4650^2 - 1228,006515^2}{2020 \cdot 4650} = 2,141435111$$

$$\Omega_{-s} = \frac{f_{-s}^2 - f_m^2}{\Delta f \cdot f_{-s}} = \frac{100^2 - 1228,006515^2}{2020 \cdot 100} = -7,415841589$$

Nyní se z normovaného kmitočtu  $\Omega$  udělá absolutní hodnota a z mezí nepropustných pásem  $\Omega_s$  a  $\Omega_{-s}$  se vybere ta přísnější (tj. ta s menší absolutní hodnotou). Tím vznikne NDP.

## 2.3 Schéma LC filtru pro Butterworthovu a Čebyševovu aproximaci

### 2.3.1 Butterworthova aproximace

Sekundární parametry:

$$\varepsilon = \sqrt{10^{0,1a_p} - 1} = \sqrt{10^{0,1} - 1} = 0,508847139$$

$$k = \frac{1}{\Omega_s} = \frac{1}{2,141435111} = 0,466976559$$

$$k_1 = \sqrt{\frac{10^{0,1a_p} - 1}{10^{0,1a_s} - 1}} = \sqrt{\frac{10^{0,1} - 1}{10^{1,9} - 1}} = 0,0574564$$

Stupeň aproximace:

$$n \geq \frac{\log \frac{1}{k_1}}{\log \frac{1}{k}} = \frac{\log \frac{1}{0,0574564}}{\log \frac{1}{0,466976559}} = 3,751566778$$

Přepočítání na n celé:

$n = 4$ . Nejprve se zmenší útlum v propustném pásmu  $a_p$ , aby se stupeň  $n$  přiblížil číslu 4. Tím se zpřísní toleranční schéma propustného pásma kvůli případným ztrátám.

$$a_p = 0,75\text{dB} \Rightarrow \varepsilon = 0,434168432; \quad k_1 = 0,049024064$$

Nyní se upraví nepropustné pásmo posunutím  $\Omega_s$ .

$$k_1 = k^n$$

$$k = \sqrt[n]{k_1} = \sqrt[4]{0,049024064} = 0,470546261$$

$$\Omega_s = \frac{1}{k} = \frac{1}{0,470546261} = 2,125189553$$

Výpočet pólů:

$$r = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon^n}} = \frac{1}{0,434168432^4} = 1,23192832$$

$$s_\mu = \frac{1}{\varepsilon^n} \left[ -\sin \frac{(2\mu-1)\pi}{2n} + j \cos \frac{(2\mu-1)\pi}{2n} \right] = \alpha_\mu + j\beta_\mu, \quad \mu = 1, 2, \dots, n$$

$$s_1 = 1,23192832 \left( -\sin \frac{\pi}{8} + j \cos \frac{\pi}{8} \right) = -0,471438558 + j1,13815336$$

$$s_2 = 1,23192832 \left( -\sin \frac{3\pi}{8} + j \cos \frac{3\pi}{8} \right) = -1,13815336 + j0,471438557$$

$$s_3 = 1,23192832 \left( -\sin \frac{5\pi}{8} + j \cos \frac{5\pi}{8} \right) = -1,13815336 - j0,471438557$$

$$s_4 = 1,23192832 \left( -\sin \frac{7\pi}{8} + j \cos \frac{7\pi}{8} \right) = -0,471438557 - j1,13815336$$

Přenosová a charakteristická funkce NDP:

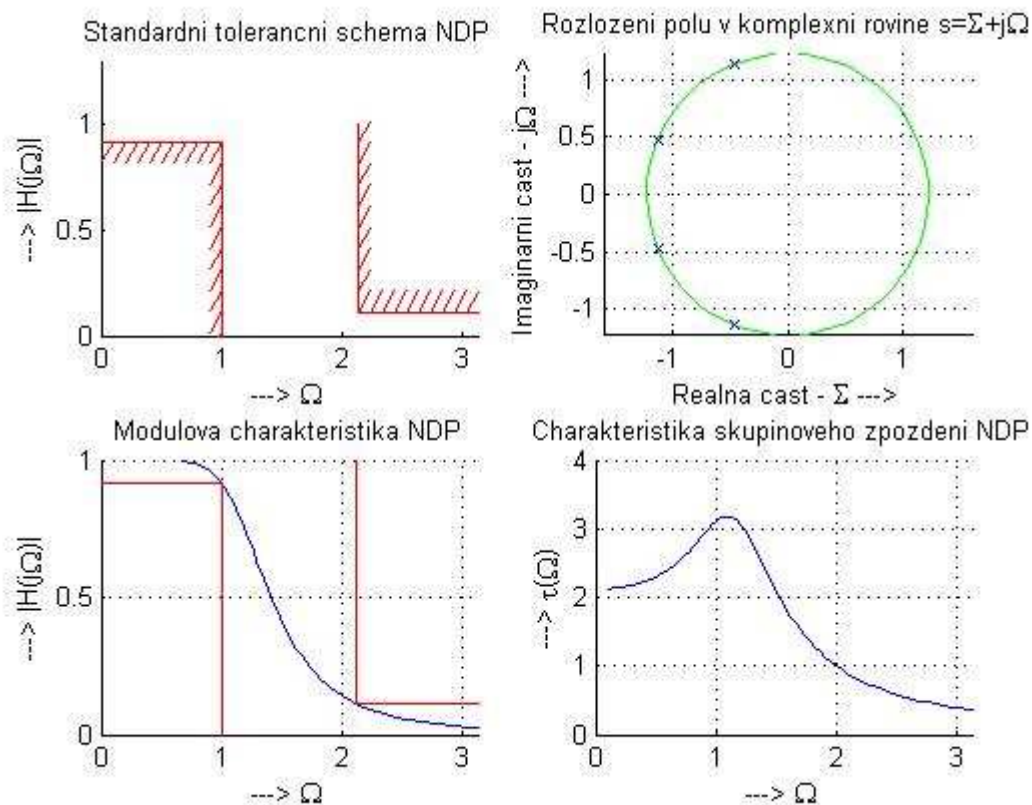
$$\alpha_\mu = -\frac{1}{\varepsilon^n} \sin(2\mu-1) \frac{\pi}{2n}, \quad \alpha_0 = -\frac{1}{\varepsilon^n}$$

$$H(s) = \frac{H_0}{\prod_{\mu=1}^m (s^2 - 2\alpha_\mu s + \alpha_0^2)}, \quad H_0 = \frac{1}{\varepsilon}, \quad m = \frac{n}{2}$$

$$H(s) = \frac{1}{0,434168432} \frac{1}{(s^2 + 0,942877115s + 1,517647386)(s^2 + 2,276306721s + 1,517647386)} =$$

$$= \frac{2,303253591}{s^4 + 3,219183836s^3 + 5,181572286s^2 + 4,885585934s + 2,303253588}$$

$$\varepsilon\varphi = \varepsilon s^n = 0,434168432s^4$$



Obr. 1 Butterworthova aproximace – výsledné grafy

### 2.3.2 Čebyševova aproximace

Sekundární parametry:

$$\varepsilon = 0,508847139$$

$$k = 0,466976559$$

$$k_1 = 0,0574564$$

Stupeň aproximace:

$$n \geq \frac{\arg \cosh \frac{1}{k_1}}{\arg \cosh \frac{1}{k}} = 2,544091516$$

Přepočet na n celé:

Zpřísnění propustného pásma kvůli ztrátám:

$$a_p = 0,35\text{dB} \Rightarrow \varepsilon = 0,289701422; \quad k_1 = 0,032711593$$

Úprava nepropustného pásma (posunutím  $\Omega$ ):

$$k = \frac{1}{\cosh\left[\frac{1}{n} \arg \cosh\left(\frac{1}{k_1}\right)\right]} = \frac{1}{\cosh\left[\frac{1}{3} \arg \cosh\left(\frac{1}{0,032711593}\right)\right]} = 0,476982646$$

$$\Omega_s = \frac{1}{k} = 2,096512329$$

Maxima aproximující funkce v propustném pásmu (pro n liché):

$$\Omega_{0,\mu} = \cos \frac{(2\mu-1)\pi}{2n}, \quad \mu = 1, 2, \dots, \frac{(n-1)}{2}$$

$$\mu = 1$$

$$\Omega_{01} = \cos \frac{\pi}{6} = 0,866025403$$

Hlavní a vedlejší poloosy elipsy:

$$a = \frac{1}{2} \left[ \left( \sqrt{1 + \frac{1}{\varepsilon^2}} + \frac{1}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{n}} - \left( \sqrt{1 + \frac{1}{\varepsilon^2}} - \frac{1}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{n}} \right] = \frac{1}{2} \left[ \left( \sqrt{1 + \frac{1}{0,289701422^2}} + \frac{1}{0,289701422} \right)^{\frac{1}{3}} - \left( \sqrt{1 + \frac{1}{0,289701422^2}} - \frac{1}{0,289701422} \right)^{\frac{1}{3}} \right] = 0,697723684$$

$$b = \frac{1}{2} \left[ \left( \sqrt{1 + \frac{1}{\varepsilon^2}} + \frac{1}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{n}} + \left( \sqrt{1 + \frac{1}{\varepsilon^2}} - \frac{1}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{n}} \right] = 1,219351606$$

Póly přenosové funkce:

$$s_\mu = \alpha_\mu + j\beta_\mu = -a \sin \frac{(2\mu-1)\pi}{2n} + j b \cos \frac{(2\mu-1)\pi}{2n}, \quad \mu = 1, 2, \dots, n$$

$$\mu = 1, 2, 3$$

$$s_1 = \alpha_1 + j\beta_1 = -a \sin \frac{\pi}{6} + j\beta \cos \frac{\pi}{6} = -0,348861842 + j1,055989467$$

$$s_2 = \alpha_2 + j\beta_2 = -a \sin \frac{\pi}{2} + j\beta \cos \frac{\pi}{2} = -a = -0,697723684$$

$$s_3 = \alpha_3 + j\beta_3 = -a \sin \frac{5\pi}{6} + j\beta \cos \frac{5\pi}{6} = -0,348861842 - j1,055989467$$

Přenosová a charakteristická funkce NDP:

$$H_0 = \frac{1}{\varepsilon \cdot 2^{2m}}, \quad m = \frac{n-1}{2}$$

$$H_0 = \frac{1}{0,289701422 \cdot 2^2} = 0,862957448$$

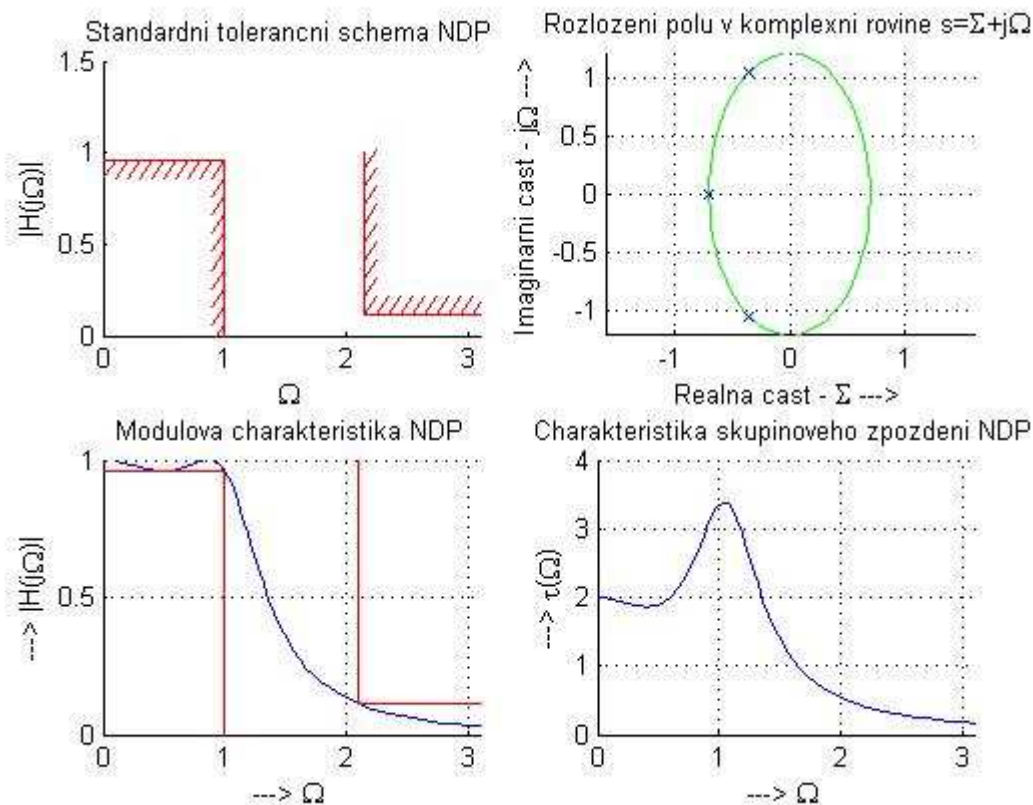
$$H(s) = \frac{H_0}{(s+a) \prod_{\mu=1}^m (s^2 - 2\alpha_\mu s + \alpha_\mu^2 + \beta_\mu^2)}, \quad m = \frac{n-1}{2}$$

$$H(s) = \frac{0,862957448}{(s + 0,697723684)(s^2 + 0,697723684s + 1,236818338)} =$$

$$= \frac{0,862957448}{s^3 + 1,395447368s^2 + 1,723636677s + 0,862957447}$$

$$\varphi(s) = 2^{2m} s \prod_{\mu=1}^m (s^2 + \Omega_{0\mu}^2), \quad m = \frac{n-1}{2}$$

$$\varphi(s) = 2^2 s (s^2 + 0,866025403^2) = 4s^3 + 3s$$



Obr. 2 Čebyševova aproximace – výsledné grafy

## 2.4 Realizace

### 2.4.1 Realizace pasivního Butterworthova filtru (Cauer I)

Filtry jsou realizovány prvním Cauerovým tvarem, tedy střídavým odštěpováním pólů impedance a admittance v nekonečnu.

#### 2.4.1.1 $r_{vst} = r_{výst} = 1$

$$z_{vst}(s) = \frac{H^{-1}(s) + \varepsilon\varphi(s)}{H^{-1}(s) - \varepsilon\varphi(s)} =$$

$$= \frac{s^4 + 3,219183836s^3 + 5,181572286s^2 + 4,885585934s + 2,303253588}{2,303253591} + 0,434168432s^4$$

$$= \frac{s^4 + 3,219183836s^3 + 5,181572286s^2 + 4,885585934s + 2,303253588}{2,303253591} - 0,434168432s^4$$

$$= \frac{4,606507182s^4 + 7,41459673s^3 + 11,93447497s^2 + 11,25274335s + 5,304977098}{7,41459673s^3 + 11,93447497s^2 + 11,25274335s + 5,304977098}$$

Příklad štěpení:

$$\frac{(4,607s^4 + 7,415s^3 + 11,934s^2 + 11,253s + 5,305) \div (7,415s^3 + 11,934s^2 + 11,253s + 5,305) = 0,621s - 4,607s^4 - 7,415s^3 - 6,991s^2 - 3,296s}{4,943s^2 + 7,957s + 5,305}$$

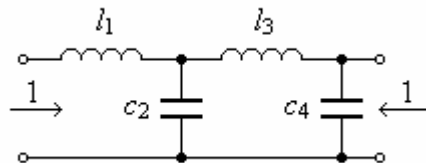
$$z_{vst}(s) = 0,621s + \frac{1}{\frac{7,415s^3 + 11,934s^2 + 11,253s + 5,305}{4,943s^2 + 7,957s + 5,305}}$$

$$\frac{(7,415s^3 + 11,934s^2 + 11,253s + 5,305) \div (4,943s^2 + 7,957s + 5,305) = 1,5s - 7,415s^3 - 11,934s^2 - 7,957s}{3,296s + 5,305}$$

⋮

$$z_{vst}(s) = 0,62128s + \frac{1}{1,49989s + \frac{1}{1,49989s + \frac{1}{0,62127s + 1}}}$$

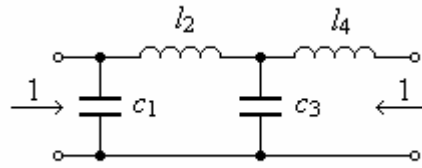
Výsledné zapojení NDP je na Obr. 3.



Obr. 3 Zapojení NDP (kladné znaménko v čitateli)

$$\begin{aligned} l_1 &= 0,62128 & l_3 &= 1,49989 \\ c_2 &= 1,49989 & c_4 &= 0,62127 \end{aligned}$$

V prípade volby záporného znaménka v čitateli a kladného znaménka ve jmenovateli  $z_{vst}$  by měl číselník nižší stupeň než jmenovateľ a obvod by tedy začínal admitancí. Hodnoty součástek by byly stejné. Toto zapojení je na Obr. 4.



Obr. 4 Zapojení NDP (záporné znaménko v čitateli)

$$c_1 = 0,62128 \quad c_3 = 1,49989$$

$$l_2 = 1,49989 \quad l_4 = 0,62127$$

#### 2.4.1.2 $r_{vst} = 1, r_{výst} = \infty$

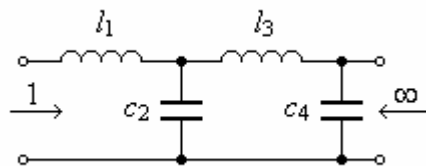
Filtr s výstupem naprázdno se realizuje od začátku.

$$z_{p1}(s) = \frac{Su\{H^{-1}(s)\}}{Li\{H^{-1}(s)\}}$$

$$H^{-1}(s) = 0,434168432s^4 + 1,397667998s^3 + 2,249675115s^2 + 2,121167184s + 1$$

$$z_{p1}(s) = \frac{0,434168432s^4 + 2,249675115s^2 + 1}{1,397667998s^3 + 2,121167184s}$$

$$z_{p1}(s) = 0,310637742s + \frac{1}{0,878616216s + \frac{1}{1,280237649s + \frac{1}{1,242550967s}}}$$



Obr. 5 Zapojení NDP při výstupu naprázdno

$$l_1 = 0,31064 \quad l_3 = 1,28024$$

$$c_2 = 0,87862 \quad c_4 = 1,24255$$

### 2.4.1.3 $r_{vst} = 0$ , $r_{výst} = 1$

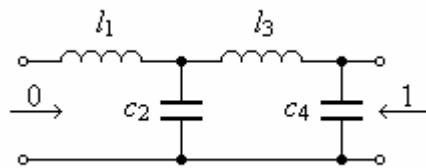
Filtr se vstupem nakrátko se realizuje od konce.

$$z_{k2}(s) = \frac{Li\{H^{-1}(s)\}}{Su\{H^{-1}(s)\}}$$

$$z_{k2}(s) = \frac{1,397667998s^3 + 2,121167184s}{0,434168432s^4 + 2,249675115s^2 + 1}$$

$$z_{k2}(s) = \frac{1}{\frac{0,434168432s^4 + 2,249675115s^2 + 1}{1,397667998s^3 + 2,121167184s}}$$

$$z_{k2}(s) = \frac{1}{0,310637742s + \frac{1}{0,878616216s + \frac{1}{1,280237649s + \frac{1}{1,242550967s}}}}$$



Obr. 6 Zapojení NDP se vstupem nakrátko

$$\begin{aligned} l_1 &= 1,24255 & l_3 &= 0,87862 \\ c_2 &= 1,28024 & c_4 &= 0,31064 \end{aligned}$$

### 2.4.2 Realizace pasivního Čebyševova filtru (Cauer I)

$$H^{-1}(s) = \frac{s^3 + 1,395447368s^2 + 1,723636677s + 0,862957447}{0,862957448} =$$

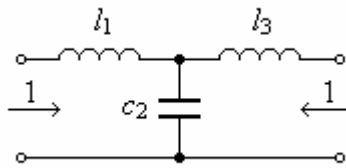
$$= 1,158805689s^3 + 1,617052349s^2 + 1,997359987s + 1$$

$$\varepsilon\varphi(s) = 0,289701422(4s^3 + 3s) = 1,158805689s^3 + 0,869104266s$$

### 2.4.2.1 $r_{vst} = r_{výst} = 1$

$$z_{vst}(s) = \frac{H^{-1}(s) + \varepsilon\varphi(s)}{H^{-1}(s) - \varepsilon\varphi(s)} = \frac{2,317611378s^3 + 1,617052349s^2 + 2,866464253s + 1}{1,617052349s^2 + 1,12825721s + 1}$$

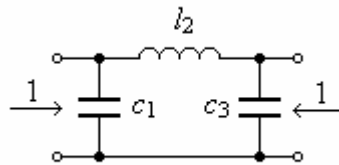
$$z_{vst}(s) = 1,43323 + \frac{1}{1,12826 + \frac{1}{1,43323 + 1}}$$



Obr. 7 Zapojení NDP (kladné znaménko v čitateli)

$$l_1 = 1,43323 \quad c_2 = 1,12826 \quad l_3 = 1,43323$$

Pokud se prohodí znaménka v čitateli a jmenovateli v  $z_{vst}$  u  $\varepsilon\varphi(s)$ , bude zapojení vypadat jako na Obr 8.



Obr. 8 Zapojení NDP (záporné znaménko v čitateli)

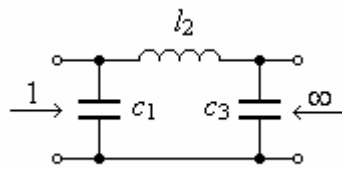
$$c_1 = 1,43323 \quad l_2 = 1,12826 \quad c_3 = 1,43323$$

### 2.4.2.2 $r_{vst} = 1, r_{výst} = \infty$

$$z_{p1}(s) = \frac{Su\{H^{-1}(s)\}}{Li\{H^{-1}(s)\}}$$

$$z_{p1}(s) = \frac{1,617052349s^2 + 1}{1,158805689s^3 + 1,997359987s}$$

$$z_{p1}(s) = \frac{1}{0,71662s + \frac{1}{1,26259s + \frac{1}{1,28074s}}}$$



Obr. 9 Zapojení NDP s výstupem naprázdno

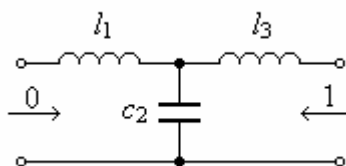
$$c_1 = 0,71662 \quad l_2 = 1,26259 \quad c_3 = 1,28074$$

### 2.4.2.3 $r_{vst} = 0$ , $r_{výst} = 1$

$$z_{k2}(s) = \frac{Li\{H^{-1}(s)\}}{Su\{H^{-1}(s)\}}$$

$$z_{k2}(s) = \frac{1,158805689s^3 + 1,997359987s}{1,617052349s^2 + 1}$$

$$z_{k2}(s) = 0,71662s + \frac{1}{1,26259s + \frac{1}{1,28074s}}$$



Obr. 10 Zapojení NDP se vstupem nakrátko

$$l_1 = 1,28074 \quad c_2 = 1,26259 \quad l_3 = 0,71662$$

## 2.5 Odnormování

$$\Delta\omega = 2\pi\Delta f = 2\pi \cdot 2020 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} = 4040\pi \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\omega_m = 2\pi f_m = 2\pi \cdot 1228,006515 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} = 7715,792492 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$R_0 = 100\Omega \text{ (volný parametr)}$$

## 2.5.1 Odnormování pasivního Butterworthova filtru

### 2.5.1.1 $R_i = R_z = 100\Omega$

$$L_1 = \frac{R_0 l_1}{\Delta\omega} = \frac{100 \cdot 0,62128}{4040\pi} \text{ H} = 4,895 \text{ mH}$$

$$C_1 = \frac{\Delta\omega}{R_0 l_1 \omega_m^2} = \frac{4040\pi}{100 \cdot 0,62128 \cdot 7715,792492^2} \text{ F} = 3,431 \mu\text{F}$$

$$L_2 = \frac{\Delta\omega R_0}{\omega_m^2 c_2} = \frac{4040\pi \cdot 100}{7715,792492^2 \cdot 1,49989} \text{ H} = 14,214 \text{ mH}$$

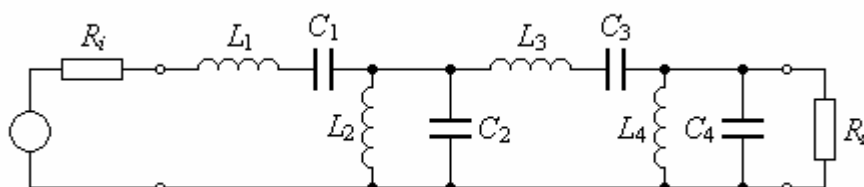
$$C_2 = \frac{c_2}{R_0 \Delta\omega} = \frac{1,49989}{100 \cdot 4040\pi} \text{ F} = 1,182 \mu\text{F}$$

$$L_3 = 11,818 \text{ mH}$$

$$L_4 = 34,315 \text{ mH}$$

$$C_3 = 1,421 \mu\text{F}$$

$$C_4 = 0,489 \mu\text{F}$$



Obr. 11 Zapojení PP (kladné znaménko v čitateli)

Volba záporného znaménka vede na toto zapojení:

$$L_1 = 34,315 \text{ mH}$$

$$L_2 = 11,818 \text{ mH}$$

$$C_1 = 0,490 \mu\text{F}$$

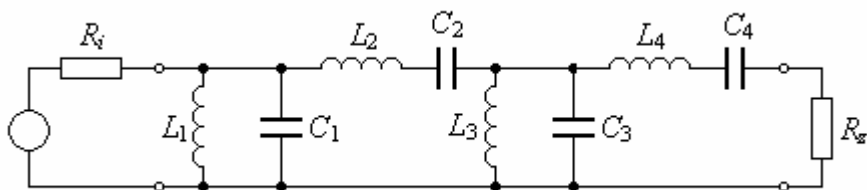
$$C_2 = 1,421 \mu\text{F}$$

$$L_3 = 14,214 \text{ mH}$$

$$L_4 = 4,895 \text{ mH}$$

$$C_3 = 1,182 \mu\text{F}$$

$$C_4 = 3,432 \mu\text{F}$$



Obr. 12 Zapojení PP (záporné znaménko v čitateli)

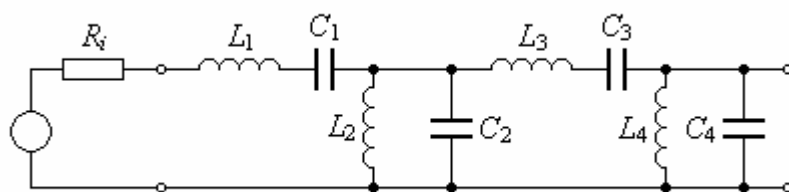
### 2.5.1.2 $R_i = 100\Omega$ , $R_z = \infty$

$$L_1 = 2,448\text{mH} \quad L_2 = 24,264\text{mH}$$

$$C_1 = 6,863\ \mu\text{F} \quad C_2 = 0,692\ \mu\text{F}$$

$$L_3 = 10,087\text{mH} \quad L_4 = 17,158\text{mH}$$

$$C_3 = 1,665\ \mu\text{F} \quad C_4 = 0,979\ \mu\text{F}$$



Obr. 13 Zapojení PP s výstupem naprázdno

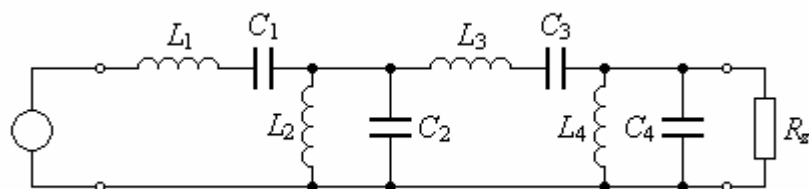
### 2.5.1.3 $R_i = 0\Omega$ , $R_z = 100\Omega$

$$L_1 = 9,790\text{mH} \quad L_2 = 16,652\text{mH}$$

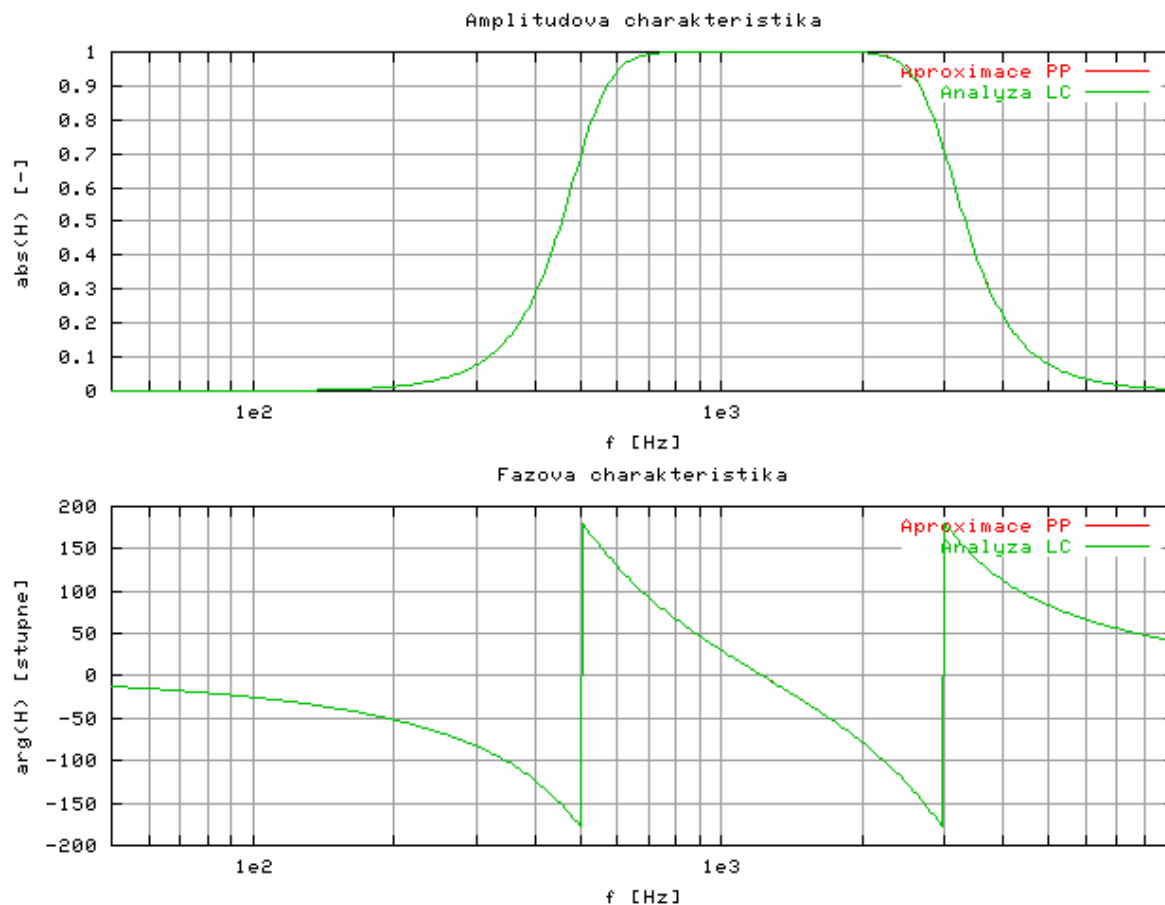
$$C_1 = 1,716\ \mu\text{F} \quad C_2 = 1,009\ \mu\text{F}$$

$$L_3 = 6,923\text{mH} \quad L_4 = 68,630\text{mH}$$

$$C_3 = 2,426\ \mu\text{F} \quad C_4 = 0,245\ \mu\text{F}$$



Obr. 14 Zapojení PP se vstupem nakrátko



Obr. 15 Amplitudová a fázová charakteristika

## 2.5.2 Odnormování pasivního Čebyševova filtru

### 2.5.2.1 $R_i = R_z = 100\Omega$

$$L_1 = 11,292\text{mH}$$

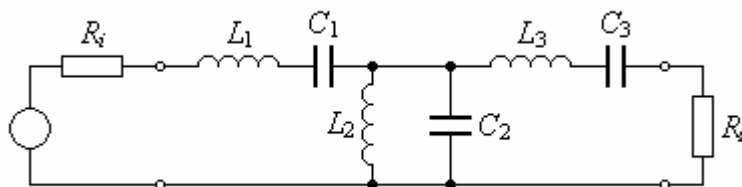
$$L_2 = 18,896\text{mH}$$

$$L_3 = 11,292\text{mH}$$

$$C_1 = 1,487\ \mu\text{F}$$

$$C_2 = 0,889\ \mu\text{F}$$

$$C_3 = 1,487\ \mu\text{F}$$



Obr. 16 Zapojení PP (kladné znaménko v čitateli)

Volba záporného znaménka vede na toto zapojení:

$$L_1 = 14,875\text{mH}$$

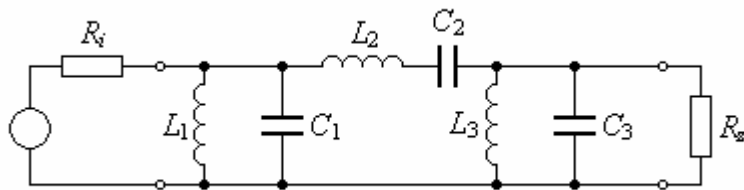
$$L_2 = 8,890\text{mH}$$

$$L_3 = 14,875\text{mH}$$

$$C_1 = 1,129\ \mu\text{F}$$

$$C_2 = 1,890\ \mu\text{F}$$

$$C_3 = 1,129\ \mu\text{F}$$



Obr. 17 Zapojení PP (záporné znaménko v čitateli)

### 2.5.2.2 $R_i = 100\Omega$ , $R_z = \infty$

$$L_1 = 29,750\text{mH}$$

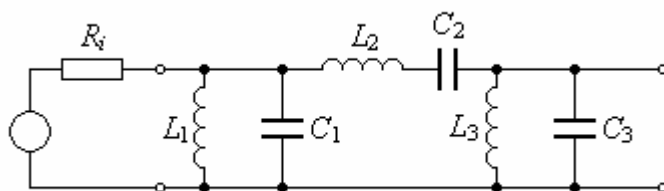
$$L_2 = 9,948\text{mH}$$

$$L_3 = 16,646\text{mH}$$

$$C_1 = 0,565\ \mu\text{F}$$

$$C_2 = 1,689\ \mu\text{F}$$

$$C_3 = 1,009\ \mu\text{F}$$



Obr. 18 Zapojení PP s výstupem naprázdno

### 2.5.2.3 $R_i = 0\Omega$ , $R_z = 100\Omega$

$$L_1 = 10,091\text{mH}$$

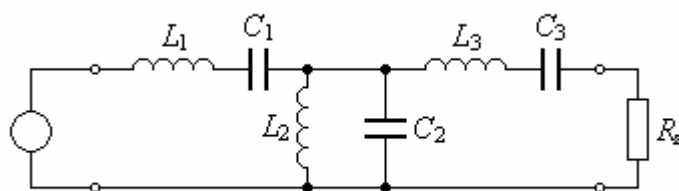
$$L_2 = 16,885\text{mH}$$

$$L_3 = 5,646\text{mH}$$

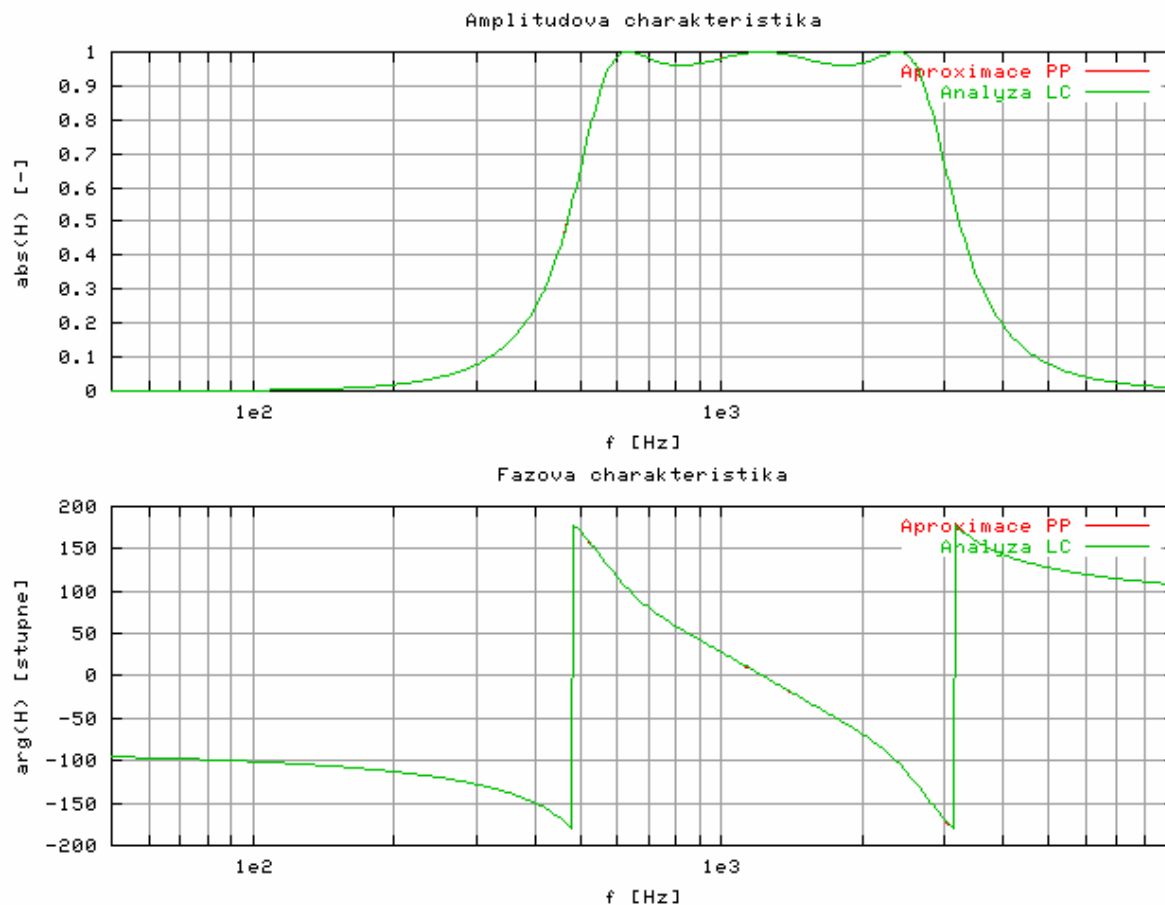
$$C_1 = 1,665\ \mu\text{F}$$

$$C_2 = 0,995\ \mu\text{F}$$

$$C_3 = 2,975\ \mu\text{F}$$



Obr. 19 Zapojení PP se vstupem nakrátko



Obr. 20 Amplitudová a fázová charakteristika

## 2.6 Kaskádní syntéza

Čebyševova přenosová funkce:

$$H(s) = \frac{0,862957448}{(s + 0,348861842 - 1,055989466j)(s + 0,348861842 + 1,055989466j)(s + 0,697723684)}$$

$$s_1 = -0,348861842 + j1,055989466$$

$$s_2 = -0,348861842 - j1,055989466$$

$$s_3 = -0,697723684$$

$$K = 0,862957448$$

$$\Delta\omega = 12692,03432 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\omega_m = 7715,792492 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$p_v = \frac{s_\mu \Delta \omega}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{s_\mu \Delta \omega}{2}\right)^2 - \omega_m^2}$$

Příklad výpočtu:

$$\begin{aligned} & \frac{(-0,348861842 + j1,055989466) \cdot 12692,03432}{2} \pm \\ & \pm \sqrt{\left(\frac{(-0,348861842 + j1,055989466) \cdot 12692,03432}{2}\right)^2 - 7715,792492^2} = -2213,883236 + \\ & + j6701,327272 \pm \sqrt{7057,553839^2 \cdot e^{2j1,889872906} - 59533453,78} = -2213,883236 + j6701,327272 \pm \\ & \pm \sqrt{-40006508,21 - j29671912,23 - 59533453,78} = -2213,883236 + j6701,327272 \pm \sqrt{103868312,8} \cdot \\ & \cdot e^{-\frac{1}{2}j2,851888658} = -2213,883236 + j6701,327272 \pm (1471,113664 - j10084,846892) = \\ & = \begin{cases} -742,769572 - j3383,519618 \\ -3684,9969 + j16786,17416 \end{cases} \end{aligned}$$

$$p_{1,2} = -3684,9969 \pm j16786,1742$$

$$p_{3,4} = -4427,7665 \pm j6318,8874$$

$$p_{5,6} = -742,7696 \pm j3383,5196$$

Příklad výpočtu:

$p_{1,2}$ :

$$\omega_{p1} = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} = \sqrt{3684,9969^2 + 16786,1742^2} = 17185,89091$$

$$Q_{p1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\cos \gamma} = \frac{\omega_{p1}}{2\alpha} = \frac{17185,89091}{2 \cdot 3684,9969} = 2,331873184$$

$$H_{01} = \frac{\Delta \omega}{-2\Re(p_v)} = \frac{12692,03432}{-2 \cdot (-3684,9969)} = 1,722122795$$

|           | $\omega_{p\mu}$ | $Q_{p\mu}$ | $H_{0\mu}$ | $\mu$ |
|-----------|-----------------|------------|------------|-------|
| $p_{1,2}$ | 17185,89091     | 2,33187    | 1,72212    | 1     |
| $p_{3,4}$ | 7715,79249      | 0,87130    | 1,43323    | 2     |
| $p_{5,6}$ | 3464,08889      | 2,33187    | 8,54372    | 3     |

$$H_0 = KH_{01}H_{02}H_{03} = 18,197728$$

$$H_{01} = H_{02} = H_{03} = \sqrt[3]{H_0} = 2,63030$$

$$H_\mu(p) = \frac{H_{0\mu} p \frac{\omega_{p\mu}}{Q_{p\mu}}}{p^2 + p \frac{\omega_{p\mu}}{Q_{p\mu}} + \omega_{p\mu}^2}$$

Blok  $H_1$ :

$$Q_{p1} < 5, \quad C = 1 \mu\text{F}$$

$$C_1 = C_2 = C = 1 \mu\text{F}$$

$$R_1 = \frac{1}{2C\omega_{p1}Q_{p1}} = \frac{1}{2 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot 17185,89091 \cdot 2,3318} \Omega = 12,47652435 \Omega$$

$$R_2 = 4R_1Q_{p1}^2 = 271,3702784 \Omega$$

$$R_3 = \infty$$

Blok  $H_2$ :

$$Q_{p2} < 5, \quad C = 1 \mu\text{F}$$

$$C_1 = C_2 = C = 1 \mu\text{F}$$

$$R_1 = \frac{1}{2C\omega_{p2}Q_{p2}} = 74,374 \Omega$$

$$R_2 = 4R_1Q_{p2}^2 = 225,848 \Omega$$

$$R_3 = \infty$$

Blok  $H_3$ :

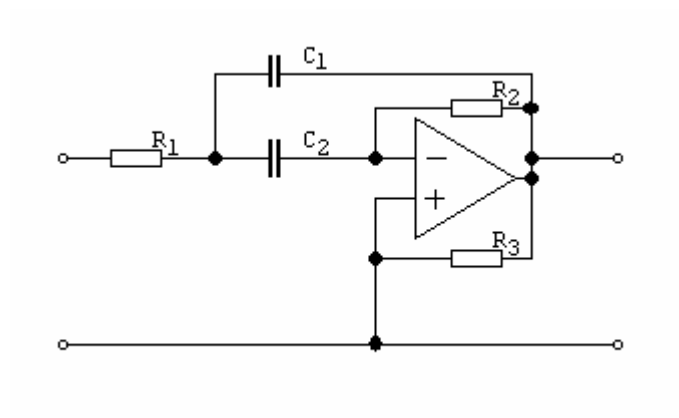
$$Q_{p3} < 5, \quad C = 1 \mu\text{F}$$

$$C_1 = C_2 = C = 1 \mu\text{F}$$

$$R_1 = \frac{1}{2C\omega_{p3}Q_{p3}} = 61,898\Omega$$

$$R_2 = 4R_1Q_{p3}^2 = 1346,311\Omega$$

$$R_3 = \infty$$



Obr. 21 Schéma jednoho bloku

## 2.7 Závěr

Butterworthovou aproximací vznikl filtr s nejlepším skupinovým zpožděním. Skupinové zpoždění je záporná derivace fáze podle kmitočtu. Ideální fázová charakteristika je lineární a ideální skupinové zpoždění je konstantní, což znamená, že nedochází k fázovému posuvu jednotlivých harmonických a ke ztrátám, neboli všechny harmonické frekvence se šíří stejnou dobou.

Čebyševovou aproximací se realizoval filtr s menším stupněm aproximace, větší strmostí modulové charakteristiky, ale s horším skupinovým zpožděním než v případě Butterworthova filtru.

Největší výhodou kaskádní syntézy aktivních filtrů s OZ je jednoduchost návrhu a snadné ladění díky rozdělení do bloků. Nevýhodou je větší citlivost na změny parametrů součástek.