

Slovenská technická univerzita v Bratislave  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikácií

## Výpočty a merania na vyvažovačoch

## Zadanie úloh

1. Vypočítajte, zrealizujte a premerajte vyvažovač pre homogénne vedenie, ktorého impedancia má priebeh daný tabuľkou.  
 kábel: konštrukcia XV, priemer žíl  $\varnothing = 1,2$  mm, izolácia styroflex,  $R = 31,9 \text{ } \Omega/\text{km}$ ,  $C=23,5 \text{ nF/km}$ .

<b>f [kHz]</b>	0,3	0,5	0,8	1	2	3	5	10	15	20	30	60
<b>Re{Z<sub>L</sub>} [Ω]</b>	616	485	394	359	276	243	218	199	194	191	188	185
<b>Im{Z<sub>L</sub>} [Ω]</b>	584	444	342	318	196	147	100	56	40	31	23	15

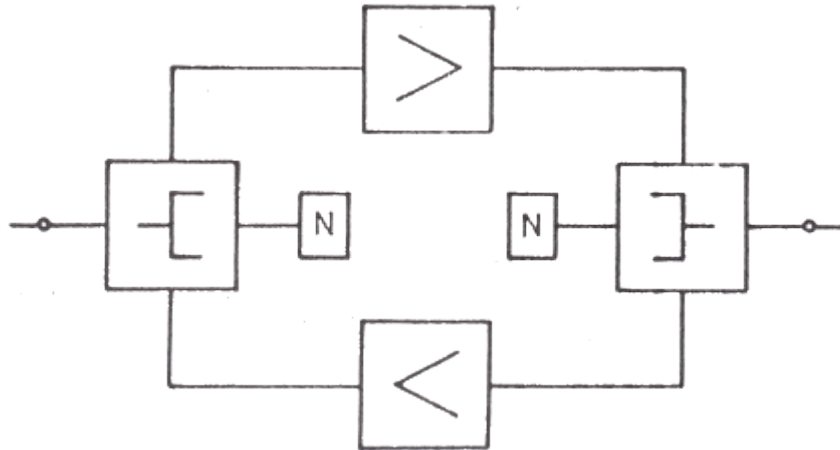
2. Vypočítajte, zrealizujte a premerajte vyvažovač pre pupinované vedenie, ktorého impedancia má priebeh daný tabuľkou. Návrh vyvažovača zrealizujte v tvare podľa Hoyta.  
 kábel: konštrukcia XV, priemer žíl  $\varnothing = 1,2$ mm, izolácia kordel-papier,  $R = 31,9 \text{ } \Omega/\text{km}$ ,  $C= 26,5 \text{ nF/km}$ , pupinacia  $100/70 \text{ mH}$  – kmeňové vedenie, pupinizačný krok  $s = 1,7 \text{ km}$ .

<b>f [kHz]</b>	0,3	0,5	0,8	1,2	1,8	2,4	3	3,4
<b>Re{Z<sub>L</sub>} [Ω]</b>	1470	1483	1490	1515	1590	1716	1927	2175
<b>Im{Z<sub>L</sub>} [Ω]</b>	265	144	92	66	50	48	53	66

3. Pre obidva typy vyvažovačov určte tlmenie nevyváženia  $a_{nv}$  [Np].

## Teoretický úvod

Dôležitým elementom v zariadeniach pre dvojdrôtové a štvordrôtové vedenia sú vyvažovače. Ich účelom je napodobniť impedanciu vedenia vo vyžadovanom frekvenčnom pásme.



Bloková schéma použitia diferencielneho transformátora v dvojdrôtových vedeniach

### Výpočet vyvažovača pre homogénne vedenie

Vyvažujeme, aby  $Z_L \stackrel{!}{=} Z_N$ . Aby sme mohli vypočítať a navrhnúť zapojenie impedancie  $Z_N$ , musíme vyšetriť priebeh impedancie  $Z_L = f(\omega)$ .

Pri homogénnych vedeniach je

$$Z = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

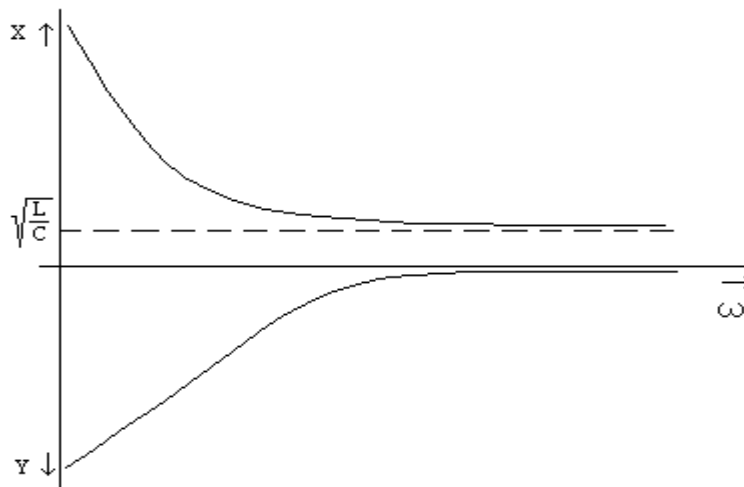
kde  $R, L, C, G$  sú kilometrové konštanty.

Pre akustické pásmo platí  $G \ll \omega C$ . Preto v ďalšom:

$$Z_L = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C} + \frac{R}{j\omega C}} = X + jY$$

Vyšetríme priebeh X a Y:

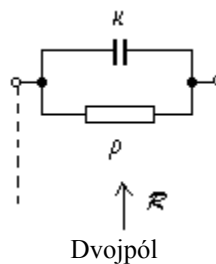
$$\begin{aligned} X_{\omega \rightarrow 0} &= \infty & Y_{\omega \rightarrow 0} &= \infty \\ X_{\omega \rightarrow \infty} &= \sqrt{\frac{L}{C}} & Y_{\omega \rightarrow \infty} &= 0 \end{aligned}$$



Priebeh impedancie homogénneho vedenia v závislosti od  $\omega$

Úlohou je nájsť vhodné zoskupenie prvkov R, L, C, tak, aby ich impedancia mala rovnaký priebeh ako  $Z_L$ . Úplne presne napodobniť impedanciu nie je možné, a preto stačí, aby impedancia vyvažovača napodobňovala impedanciu  $Z_L$  v predpísaných medziach.

Vyšetríme priebeh impedancie dvojpólu.

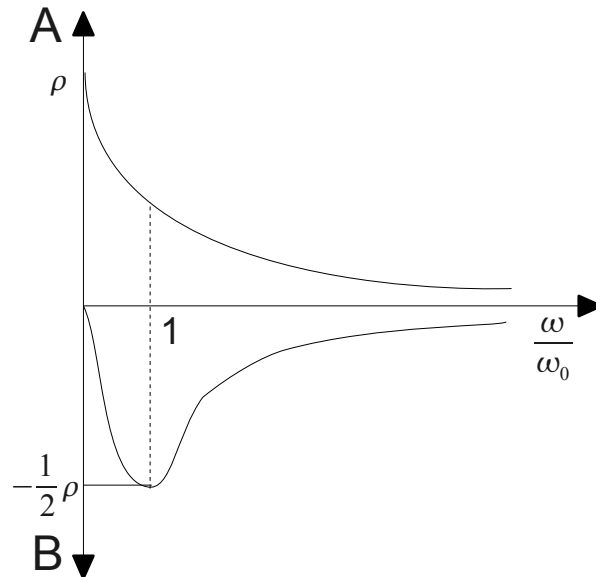


$$R = \frac{\rho \frac{1}{j\omega \kappa}}{\rho + \frac{1}{j\omega \kappa}} = \frac{\rho - j\omega \kappa \rho^2}{1 + (\omega \kappa \rho)^2} = A + jB$$

$$A = \frac{\rho}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \quad B = \frac{-\rho \frac{\omega}{\omega_0}}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

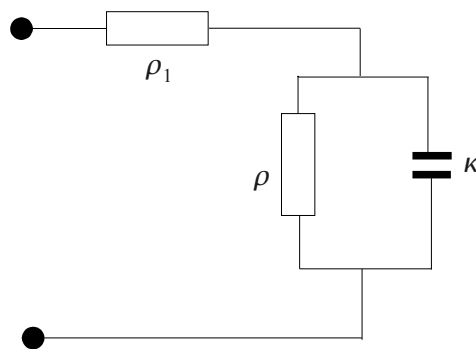
Vyšetríme priebeh A a B:

$$\begin{aligned} A_{\omega \rightarrow 0} &= \rho & B_{\omega \rightarrow 0} &= 0 & B_{\omega \rightarrow \infty} &= 0 \\ A_{\omega \rightarrow \infty} &= 0 & B_{\omega \rightarrow \omega_0} &= -\frac{1}{2}\rho \end{aligned}$$



A a B znázornené graficky

Impedancia R má podobný priebeh ako impedancia  $Z_L$  pre  $\omega > \omega_0$ , okrem toho reálna zložka impedancie  $Z_L$  sa pre  $\omega \rightarrow \infty$   $X = \sqrt{\frac{L}{C}}$  a reálna zložka impedancie R sa pre  $\omega \rightarrow \infty$   $A \rightarrow 0$ . To znamená, že reálnu zložku impedancie R treba zväčšiť o konštantnú hodnotu  $\sqrt{\frac{L}{C}}$ . To jednoducho dosiahneme zapojením odporu  $\rho_1 = \sqrt{\frac{L}{C}}$  do série s impedanciou R.



Zapojenie vyvažovača

Porovnaním vzťahov pre vlnovú impedanciu a pre impedanciu vyvažovača získame vzťahy na výpočet prvkov vyvažovača pre homogénne vedenie:

$$X_{\omega_d} = \rho_1 + A \quad Y_{\omega_d} = B$$

Ďalej platí:

$$\frac{1}{\omega_d \kappa \rho} = \left| \frac{X_{\omega_d} - \rho_1}{Y_{\omega_d}} \right| \rightarrow \omega_d \kappa \rho = \left| \frac{Y_{\omega_d}}{X_{\omega_d} - \rho_1} \right|$$

Následne po dosadení dostaneme:

$$\rho = (X_{\omega_d} - \rho_1) \cdot (1 + \omega_d^2 \rho^2 \kappa^2) = (X_{\omega_d} - \rho_1) \cdot \left( 1 + \left| \frac{Y_{\omega_d}}{X_{\omega_d} - \rho_1} \right|^2 \right)$$

$$\kappa = \frac{1}{\omega_d \rho} \left| \frac{Y_{\omega_d}}{X_{\omega_d} - \rho_1} \right|$$

V zapojení vyvažovača pre homogénne vedenia sa často zapája ešte do série premenlivá kapacita, ktorá je rádovo niekoľko  $\mu\text{F}$ . Tá nám zlepšuje napodobnenie imaginárnej zložky pri nízkych kmitočtoch. Potom zapojenie vyvažovača je:

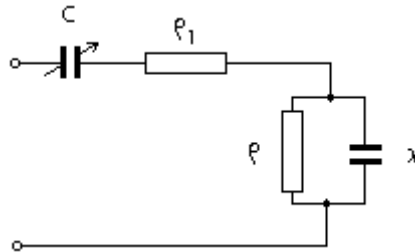


Schéma vyvažovača pre homogénne vedenie

### Výpočet vyvažovača pre pupinované vedenia podľa Hoyta

Najprv si musíme vykonať rozbor impedancie pupinovaného vedenia. Impedancia pupinovaného vedenia závisí od nábehovej sekcie, t.j. od kapacity nábehového úseku.

Reálna zložka je daná vzťahom

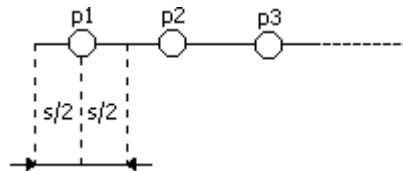
$$X = \frac{\sqrt{1 - \eta^2}}{1 - 4x(1-x)\eta^2} \sqrt{\frac{Ls}{Cs}}$$

a imaginárna zložka

$$Y = \frac{(1 - 2x)\eta}{1 - 4x(1-x)\eta^2} \sqrt{\frac{Ls}{Cs}},$$

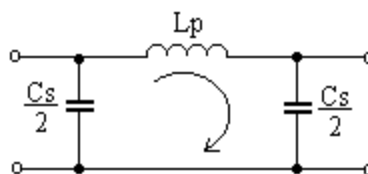
kde  $s$  je pupinizačný krok,  $\omega_0$  je vlastný rezonančný kmitočet pupinovaného vedenia  $\left( \eta = \frac{\omega}{\omega_0} \right)$ ,

$x$  je dĺžka nábehovej sekcie v intervale (0-0,5)s.



Bloková schéma pupinovaného vedenia

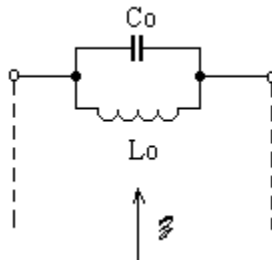
Zjednodušená náhradná schéma bude



Určíme vlastný rezonančný kmitočet  $\omega_0$  tak, že vstupné a výstupné svorky necháme naprázdno a určíme podmienku rezonancie:

$$\omega_0 = \frac{2}{\sqrt{Lp \cdot Cs}}$$

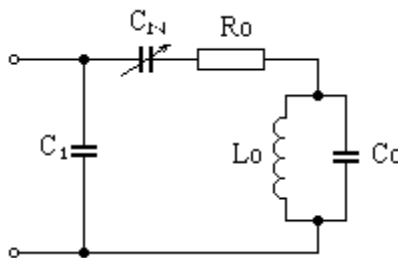
Teraz si vyšetříme hodnotu impedancie Z:



$$Z = \frac{j\omega L_0 \frac{1}{j\omega C_0}}{j\left(\omega L_0 - \frac{1}{\omega C_0}\right)} = j \frac{\omega L_0}{1 - \omega^2 L_0 C_0}$$

Zistili sme náhradu pupinovaného vedenia pre  $x = 0,17$ , ale nábehová sekcia na pupinovaných vedeniach je  $0,5$  s, preto musíme ešte na vstupné svorky zapojiť náhradu vedenia dĺžky  $0,33$  s.

Pri zjednodušených predpokladoch môžeme túto časť vedenia nahradiť kapacitou  $C_1$ . Ešte do série s odporom  $R_0$  býva zapojená kapacita  $C_N$  (niekoľko  $\mu\text{F}$ ), ktorá nám upravuje impedančnú charakteristiku oblasti pod  $400$  Hz.



Bloková schéma Hoytovho vyvažovača

Pre výpočty jednotlivých prvkov schémy Hoytovho vyvažovača použijeme tieto vzťahy

$$C_1 = 0,33 C_s$$

$$C_0 = 0,428 C_s$$

$$L_0 = 0,33 L_p$$

$$R_0 = \sqrt{\frac{L_p}{C_s}}$$

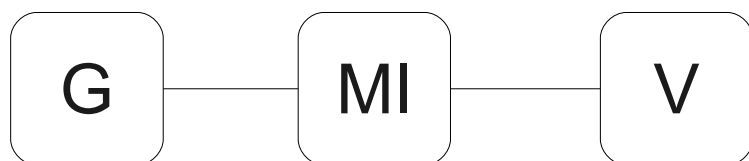
Tlmenie nevyváženia určíme z hodnôt  $Z_N$  a  $Z_L$ , ktoré odčítame z grafu pri kmitočte  $\omega_n$  t.j. tam kde  $a_{nv}$  podľa vzťahu

$$a_{nv} = \ln \left| \frac{Z_L + Z_N}{Z_L - Z_N} \right| [\text{Np}]$$

má minimálnu hodnotu. Hodnota  $a_{nv}$  má byť väčšia ako  $7$  Np. Uvedené merania vykonáme jednak na vyvažovačoch pre homogénne vedenia, jednak na vyvažovačoch pre pupinované vedenie.

## Riešenie

Schéma zapojenia:



G – generátor  
MI – merač impedancií  
V – vyvažovač

### Úloha č. 1

Súpis prístrojov

- Tesla RC oscilátor BM 344
- Tesla tranzistorový merač impedancií 12XL020
- 2x odporová dekáda XL6
- Decade Condenser TR-9301/A

Zadané hodnoty:

$$f_d = 0,8 \text{ kHz}$$

$$\rho_1 = 182 \Omega$$

$$X_{\omega d} = 394 \Omega$$

$$Y_{\omega d} = 342 \Omega$$

Z týchto hodnôt sme vypočítali hodnoty  $\rho$  a  $\kappa$  potrebné pre konštrukciu vyvažovača:

$$\omega_d = 2\pi f_d = 2\pi \cdot 800 = 5026,54 \text{ s}^{-1}$$

$$\rho = (X_{\omega d} - \rho_1) \cdot \left( 1 + \left| \frac{Y_{\omega d}}{X_{\omega d} - \rho_1} \right|^2 \right) = (394 - 182) \cdot \left( 1 + \left| \frac{342}{394 - 182} \right|^2 \right) = 763,71 \Omega$$

$$\kappa = \frac{1}{\omega_d \rho} \left| \frac{Y_{\omega d}}{X_{\omega d} - \rho_1} \right| = \frac{1}{5026,54 \cdot 763,71} \left| \frac{342}{394 - 182} \right| = 420,23 \text{ nF}$$

	Vypočítané hodnoty	Nastavené hodnoty
$\rho [\Omega]$	763,7118	763,7
$\kappa [\text{nF}]$	420,23	420,23

Napokon sme zrealizovali samotný vyvažovač a postupne pri rôznych frekvenciách vstupného signálu sme merali tranzistorovým meračom impedancií hodnotu  $Z_N$  a fázu vyvažovača  $\varphi_N$ . Namerané a vypočítané hodnoty sú zapísané v tabuľke.

f [kHz]	0,3	0,5	0,8	1	2	3	5	10	15	20	30	60
$\text{Re}\{Z_L\} [\Omega]$	616	485	394	359	276	243	218	199	194	191	188	185
$\text{Im}\{Z_L\} [\Omega]$	584	444	342	318	196	147	100	56	40	31	23	15
$Z_L [\Omega]$	848,83	657,54	521,73	479,59	338,51	284	239,84	206,73	198,08	193,5	189,4	185,61
$\varphi_L [^\circ]$	43,47	42,47	40,96	41,53	35,38	31,71	24,64	15,72	11,65	9,22	6,98	4,64
$Z_N [\Omega]$	1420	1100	590	585	365	270	184	168	166	165	164	163
$\varphi_N [^\circ]$	34	46	62	57	52	44	22	10	6	3	0	0
$a_{\text{nv}} [\text{Np}]$	1,379	1,379	2,79	2,312	3,279	3,678	2,027	2,27	2,429	2,532	2,633	2,74

Vzorový výpočet pre frekvenciu 0,3 kHz

$$Z_L = \sqrt{\Re \{ Z_L \}^2 + \Im \{ Z_L \}^2} = 616^2 + 584^2 = 848,83 \Omega$$

$$\varphi_L = \arctg \frac{\Im \{ Z_L \}}{\Re \{ Z_L \}} = \arctg \frac{584}{616} = 43,47^\circ$$

## Úloha č. 2

Súpis prístrojov

- Tesla RC oscilátor BM 344
- Tesla tranzistorový merač impedancií 12XL020
- Variable artificial line 1721/S
- Zdroj

Zadané hodnoty:

$$C = 26,5 \text{ nF/km}$$

$$L_p = 100 \text{ mH}$$

$$s = 1,7 \text{ km}$$

Z daných hodnôt sme vypočítali hodnoty potrebné pre konštrukciu vyvažovača.

$$C_1 = 0,33 C s = 0,33 \cdot 26,5 \cdot 10^{-7} \cdot 1,7 = 14,86 \text{ nF}$$

$$C_0 = 0,428 C s = 0,428 \cdot 26,5 \cdot 10^{-7} \cdot 1,7 = 19,28 \text{ nF}$$

$$L_0 = 0,33 L_p = 0,33 \cdot 100 \cdot 10^{-3} = 33 \text{ mH}$$

$$R_0 = \sqrt{\frac{L_p}{C s}} = \sqrt{\frac{100 \cdot 10^{-3}}{26,5 \cdot 10^{-7} \cdot 1,7}} = 1489,88 \Omega$$

	Vypočítané hodnoty	Nastavené hodnoty
<b>C<sub>1</sub> [nF]</b>	14,86	15
<b>C<sub>0</sub> [nF]</b>	19,28	19
<b>L<sub>0</sub> [mH]</b>	33	33
<b>R<sub>0</sub> [Ω]</b>	1489,88	1490

Napokon sme zrealizovali samotný vyvažovač a postupne pri rôznych frekvenciách vstupného signálu sme merali tranzistorovým meračom impedancií hodnotu  $Z_N$  a fázu vyvažovača  $\varphi_N$ . Namerané a vypočítané hodnoty sú zapísané v tabuľke nižšie.

Vzorový výpočet pre frekvenciu 0,3 kHz

$$Z_L = \sqrt{\Re \{ Z_L \}^2 + \Im \{ Z_L \}^2} = 1470^2 + 265^2 = 1493,7 \Omega$$

$$\varphi_L = \arctg \frac{\Im \{ Z_L \}}{\Re \{ Z_L \}} = \arctg \frac{265}{1470} = 10,22^\circ$$



f [kHz]	0,3	0,5	0,8	1,2	1,8	2,4	3	3,4
Re{Z <sub>L</sub> } [Ω]	1470	1483	1490	1515	1590	1716	1927	2175
Im{Z <sub>L</sub> } [Ω]	265	144	92	66	50	48	53	66
Z <sub>L</sub> [Ω]	1493,7	1489,98	1492,84	1516,44	1590,79	1716,67	1927,73	2176
φ <sub>L</sub> [°]	10,22	5,55	3,53	2,49	1,80	1,60	1,58	1,74
Z <sub>N</sub> [Ω]	1500	1520	1540	1610	1620	1740	1920	2150
φ <sub>N</sub> [°]	0	0	0	0	0	0	0	0
a <sub>nv</sub> [Np]	6,164	4,608	4,164	3,509	4,7	4,998	6,21	5,114

Tabuľka nameraných a vypočítaných hodnôt pre pupinované vedenie

### Úloha č. 3

Vzorový výpočet pre homogénne vedenie, pre hodnotu 0,3 kHz

$$a_{nv} = \ln \left| \frac{Z_L + Z_N}{Z_L - Z_N} \right| = \ln \left| \frac{843,83 + 1420}{843,83 - 1420} \right| = 1,379 \text{ Np}$$

Vzorový výpočet pre pupinované vedenie, pre hodnotu 0,3 kHz

$$a_{nv} = \ln \left| \frac{Z_L + Z_N}{Z_L - Z_N} \right| = \ln \left| \frac{1493,7 + 1500}{1493,7 - 1500} \right| = 6,164 \text{ Np}$$

Ostatné hodnoty tlmenia nevyváženia sú počítané podľa vzorového výpočtu a sú zapísané v tabuľkách k jednotlivým úlohám.

## Záver

Našou úlohou bolo zrealizovať a premerať vyvažovač.

V prvej úlohe sme pomocou daných hodnôt a veličín vypočítali  $\rho$  a  $\kappa$ , ktoré sme využili pri nastavovaní vyvažovača pre homogénne vedenie. Po zapojení vyvažovača sme menili frekvenciu a odčítavali hodnoty. Namerané hodnoty pre impedanciu  $Z_N$  nám vyšli v rozmedzí od 1420Ω po 163Ω. Pre fázu  $\varphi_N$  sme namerali hodnoty od 34° po 0°.

V druhej úlohe sme pomocou vypočítaných parametrov zostrojili Hoytov vyvažovač a následne pomocou zmeny frekvencie na generátore sme odčítavali hodnoty impedancie na merači impedancií, ktoré nám vyšli v rozmedzí od 1500Ω po 2150Ω, a hodnoty fázy, ktoré nám pri všetkých frekvenciách vyšli nulové.

V tretej úlohe sme následne z nameraných a vypočítaných hodnôt pre impedanciu a fázu vypočítali hodnoty tlmenia nevyváženia pre úlohu jedna a úlohu dva. V prvej úlohe sa hodnoty tlmenia pohybovali 1,38 Np po 2,74 Np, čo ale nespĺňa podmienku pre tlmenie nevyváženia, ktorá hovorí, že tlmenie nevyváženia musí byť väčšie ako 7Np. V druhej úlohe nám vyšli hodnoty tlmenia v rozmedzí od 5,1Np do 6,164Np. Tieto hodnoty taktiež nespĺňajú podmienku pre tlmenie nevyváženia. Preto môžeme tvrdiť, že navrhnuté vyvažovače nevyhovujú pre dané frekvenčné pásmo.