

TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Katedra elektrotechniky a mechatroniky

**MSE-12: Pasívny hornopriepustný Pí filter LCL 3. rádu**

REFERÁT V RÁMCI PREDMETU

MODELOVANIE A SIMULÁCIE V ELEKTROTECHNIKE

LS 2022, 2. roč. Bc. ApE

**Ivan Zeman 100 %**

Odovzdané dňa:	Bodov spolu:	Poznámka:
Hodnotenie: – správy (max. 18b.)		
– riešenia (max. 14 b.)		
– prezentácie a prednesu (max. 8 b.)		

**Dátum zaslania: 12.3.2022 (Úvod do problematiky)**

- POZOR! – máte iný typ filtra (hornopriepustný HPF), ako uvádzate v popise (dolnopriepustný DPF – pozrite si konfiguráciu a porovnajte s tým, čo ste písali). Popisovali ste duálny filter, Asi som urobil chybu v názve – nazval som to podľa prvkov a LCL, tak som to premenoval. Vychádzali ste zrejme z názvu, neporovnali zapojenia. Pre HPF hľadajte napr. <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/rf-filters/constant-k-simple-high-pass-lc-rf-filter-design-calculations.php>, alebo v Úvode stačí uviesť, že tam a tam sa nachádzajú také a také výpočty.
- Mohli by byť uvedené nejaké výpočty, ako sa určujú frekvencie <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/rf-filters/constant-k-simple-high-pass-lc-rf-filter-design-calculations.php>, alebo v Úvode stačí uviesť, že tam a tam sa nachádzajú také a také výpočty.
- Okrem toho pre popisovaný typ dolnopriepustného filtra je to obširne (popis využitia v striedačoch PWM). Predmet MSE nie je o praktickom využití filtrov, ale o modelovaní elektrických obvodov (ktoré vlastne predstavujú filtre) a ich analýze.
- Ináč pri popise filtra treba neuvádzať toľko, stačia cca 1-4, alebo ani čiadny. Alebo to možno uviesť stručne slovne takto: V lit. [ ] je uvedený matematický model/simulácie, frekvenčné charakteristiky, ..., nachádza sa ..., autori sa zoberajú ..., vyriešili ... a príp. aké výsledky dosiahli
- Rozmery veličín sa nepíšu italics. Ani skratky netreba písať italics.
- K prevzatým obrázkom z literatúry uviesť odkiaľ sú – na konci textu pod obrázok dať [ ],
- Písať skrátené Obr.- 2 nie Obrázok 2, atď.

**Dátum zaslania: 31.3.**

- OK („Už som našiel chybu“) v MSP, rovnica pre s3 - chyba
- Zoznam symbolov a skratiek – pozor, čo má byť italics
- Chýba text pod obr., číslovať ich. Z textu sa odvolávať na obrázky
- V nadpisoch nepoužívať skratku (3.3. Nájdenie TF)
- Dôležité rovnice číslovať.
- Indexy! UA, UB ...
- Chýbajú výsledky (TF) v symbolickom tvare a numerickom (ten prepočítať tiež pre  $a_0 = 1$ )

**Dátum zaslania: 18.4.**

- Zmeny a úpravy vyznačené priamo v texte.
- Riešenie v Simulinku: stačí zobrazit' výstup na Scope a uložiť ho s príponou .fig. Potom sa dá upraviť a výsledný obrázok možno použiť do správy. Zo Simulinku sa dá zostaviť aj prenos (inštrukcia linmod) a tiež LFCh (blok Bode Plot). Toto riešenie si ukážeme na najbližšom vyučovaní.
- Výstupná rovnica SS modelu: v každej rovnici dole na str.13 sa nachádza dvojica derivácií. Treba vyriešiť lineárnu sústavu rovníc vzhľadom na ti derivácie (cvičenie 6, bod 2, 3, riešenie v symb. MATLABe) a tak získať  $\frac{dx_1}{dt} = \dots$ ,  
 $\frac{dx_2}{dt} = \dots$ ,  $\frac{dx_3}{dt} = \dots$   
Potom už vieme dosadiť napr. do rovnice pre s3 za  $\frac{dx_2}{dt}$ ,  $\frac{dx_3}{dt}$  a tak dostaneme výstupnú rovnicu (bez derivácií):

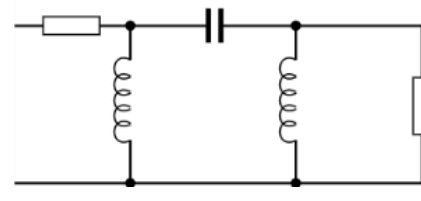
$$y = R_2 \cdot x_3 = R_2 \cdot C \cdot \frac{dx_2}{dt} - L_2 \cdot \frac{dx_3}{dt}$$

**Dátum zaslania: 26.4.**

- Veľmi dobre, vzorovo spracované. Treba ešte drobné úpravy.
- Tab 4.1. – hodnoty prvkov netreba písať do tabuľky, škoda miesta. Písať ich do riadku!
- Nie lineárno-frekvenčná ale logaritmická frekvenčná (charakteristika)
- Nie indukcia cievky ale indukčnosť cievky
- Treba ešte uviesť výsledky (PrCh, príp aj Bode) zo Simulinku a všetko zo Simsape (schéma, simulácia).

## 1 Zadanie

Analyzujte zapojenie prenosového článku podľa obrázka:

	<p><b>Simple LC High Pass Filter Circuit Design &amp; Calculations</b>  <a href="https://www.electronics-notes.com/articles/radio/rf-filters/constant-k-simple-high-pass-lc-rf-filter-design-calculations.php">https://www.electronics-notes.com/articles/radio/rf-filters/constant-k-simple-high-pass-lc-rf-filter-design-calculations.php</a></p> <p><b>High &amp; Low Pass LC RF Filter Design</b>  <a href="https://www.electronics-notes.com/articles/radio/rf-filters/high-low-pass-lc-filter.php">https://www.electronics-notes.com/articles/radio/rf-filters/high-low-pass-lc-filter.php</a></p> <p>Pozn.: vstupný odpor má malú, výstupný veľkú hodnotu.</p>
---	---

Pre vyšetrovanie zvolte vhodné parametre obvodu, pri ktorých sa začínajú prejavovať jeho frekvenčné vlastnosti. Prekreslite tento obvod s použitím značiek podľa [normy](#).

Správa musí obsahovať nasledovné výstupy:

- 1) Zostavenie rovníc obvodu a z nich odpovedajúcu maticovú rovnicu s impedanciami obvodu:  
 (1) metódou slučkových prúdov (MSP) a (2) metódou uzlových napätí (MUN).
- 2) Nájdenie TF aplikáciou MSP a MUN v symbolickom MATLabe. Uveďte ju:  
 (1) v symbolickom tvare a (2) v numerickom tvare pre zvolené hodnoty parametrov ( $a_0 = 1$ ).
- 3) Zo získanej TF nakresliť PrCh a odpovedajúce LFCh. Popíšte ich priebeh a uveďte, o aký obvod ide. V tabuľke (napr. pod grafom) uveďte hodnoty núl a pólov pre základné hodnoty parametrov.
- 4) Vyšetrenie závislosti zmeny vlastností obvodu – PrCh a LFCh od zmien  $L$  a  $C$ , pri dvoch-troch hodnotách frekvencie: pričom ostatné parametre obvodu zostávajú na pôvodných hodnotách (zmenu jedného parametra uveďte v jednom grafe. Slovné charakterizujte vplyv jednotlivých parametrov na vlastnosti obvodu).
- 5) Odozvy obvodu na harmonický signál pri troch rôznych frekvenciách zvolených tak, aby vystihovali frekvenčné vlastnosti obvodu (extrém LAFCh, jeden bod pri nižšej a druhý pri vyššej frekvencii, kde sa prejavuje zmena fázy, príp. zmena amplitúdy LFCh). Zobrazte iba niekoľko amplitúd.
- 6) Odvodenie stavového modelu obvodu. Overte správnosť riešenia s výsledkami získanými v bode 3.
- 7) Odvodenie simulačného modelu z rovníc obvodu (nie z TF!) a simulácia obvodu v Simulinku pri základných hodnotách parametrov (výstup v MATLabe pomocou bloku To Workspace). Porovnajte s výsledkami získanými v bode 3.
- 8) Odozvu obvodu v Simulinku na signál s narastajúcou frekvenciou (chirp).
- 9) Odvodenie stavového modelu obvodu a jeho simulácia. Porovnajte získané priebehy s výsledkami získanými v bode 3.
- 10) Simuláciu obvodu pomocou programu Simscape.  
 Overte správnosť riešenia s výsledkami získanými v bode 3.
- 11) V závere dôsledne analyzujte dosiahnuté výsledky (o aký obvod ide, aké sú použité metódy riešenia, aké sú dosiahnuté výsledky, aký majú vplyv jednotlivé parametre na zmenu vlastností a pod.). Nezapudnite uviesť referencie a dôsledne ich v správe citovať.

## 2 Zoznam symbolov a skratiek

### Symbody

$C$	kapacita
$F(s)$	prenosová funkcia
$i(t), I(s)$	prúd – časová funkcia, operátorový obraz
$L$	indukčnosť
$R$	odpor
$S$	slučka
$s$	Laplaceov operátor
$u(t), U(s)$	napätie - časová funkcia, operátorový obraz
$x$	premenná

### Grécke písmená

$\omega(t), \omega(s)$	kruhová frekvencia
------------------------	--------------------

### Dolné indexy

$C$	kondenzátora
$i$	indukovaný
$L$	indukčnosti
$R$	odporu

### Horné indexy

$T$	transponovaný
$-1$	inverzný

### Skratky

I.KZ	1. Kirchhoffov zákon
II.KZ	2. Kirchhoffov zákon
HPF	hornopriepustný filter
MSP	metóda slučkových prúdov
MUN	metóda uzlových napätí
OZ	Ohmov zákon

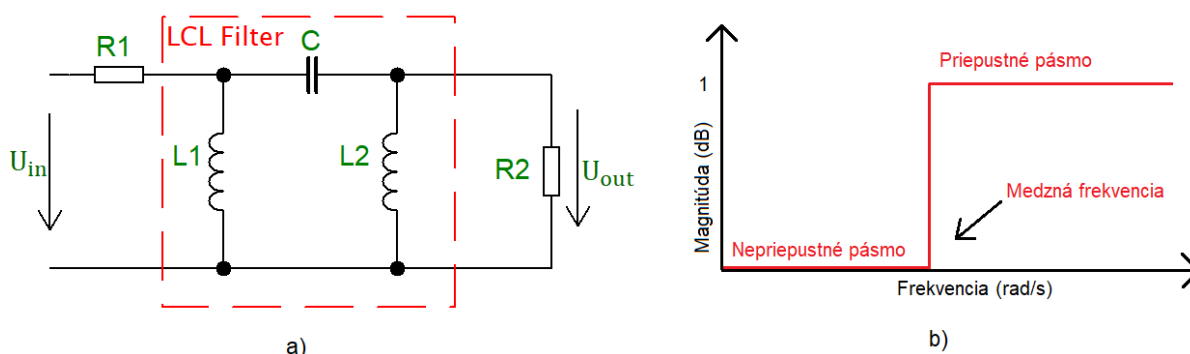
### 3 Úvod

Hlavnú podstatu tohto referátu tvorí **analýza zapojenia prenosového článku** hornopriepustného LCL filtra podľa obr. 2.

Na základe teoretických poznatkov môžeme, pod pojmom **hornopriepustný filter (HPF)**, označiť typ elektronického obvodu, ktorého hlavnou úlohou je prepúšťanie žiaducich – vysokofrekvenčných – signálov a zároveň odstránenie, resp. tlmenie nežiaducich – nízkofrekvenčných – signálov (obr. 1b). Horná priepust HPF sa považuje za pasívnu, ak v jeho elektronickom obvode nie je použitý žiadny zosilňovací prvok – v opačnom prípade sa považuje za aktívnu. Horná priepust HPF sa využíva tam, kde sú nízke frekvencie nežiaduce a preto by sa mali odfiltrovať [1].

V praxi rozlišujeme **3 rády HPF** [2]:

- 1) HPF 1. rádu – typ el. obvodu, zloženého z kondenzátora a rezistora alebo rezistora a cievky zapojených do série.
- 2) HPF 2. rádu – typ el. obvodu, zloženého z kondenzátora a cievky zapojených do série.
- 3) HPF 3. rádu – typ el. obvodu, zloženého z 3 pasívnych súčiastok (2 kondenzátory a 1 cievka, alebo 1 kondenzátor a 2 cievky (obr. 1a)).



Obr. 1 – a) Pasívny hornopriepustný LCL filter 3. rádu, b) Frekvenčná odozva ideálneho HPF.

Zdroj [2] sa ďalej venuje podrobnejšiemu opisu filtrov jednotlivých rádoov a ich porovnávaníu. V literatúre [3] sú uvedené základné vzťahy pre výpočet jednotlivých prvkov el. obvodu HPF a pre výpočet TF.

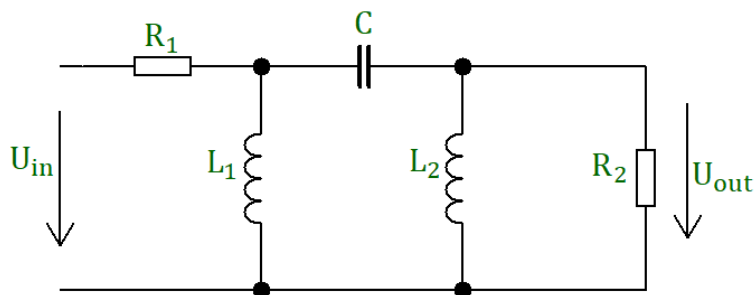
Rýchle online výpočty a kalkulácie hodnôt jednotlivých prvkov obvodu, pre rôzne typy filtrov, ponúkajú platformy ako napr. *Jotrin.it* [4], *Calculatoredge.com* [5], *LearningAboutElectronics.com* [6].

## 4 Vypracovanie

Analýzu zapojenia prenosového článku budeme vykonávať na základe bodov obsiahnutých v kapitole 1 (Zadanie).

### 4.1 Schéma elektrického obvodu

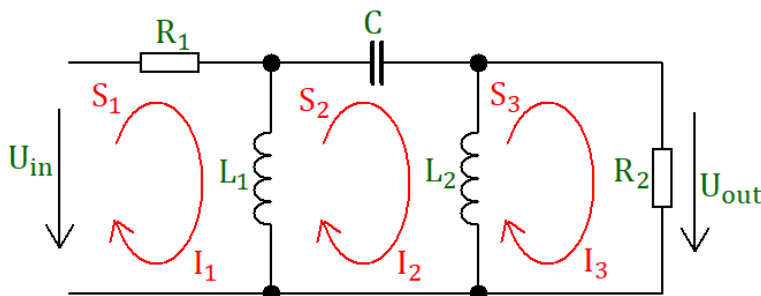
Analyzovať budeme zapojenie prenosového článku – pasívneho hornopriepustného LCL filtra 3. rádu – podľa schémy zapojenia na obr. 2.



Obr. 2 – Schéma zapojenia analyzovaného prenosového článku

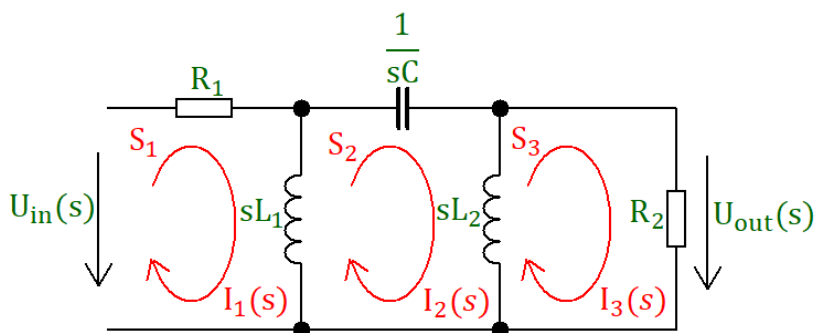
### 4.2 Nájdenie prenosovej funkcie metódou slučkových prúdov

Najskôr si **zadefinujeme nezávislé slučky** v obvode a **zvolíme smer slučkových prúdov** (obr.3).



Obr. 3 – Označenie slučiek a smery slučkových prúdov

Potom **nahradíme jednotlivé prvky ich impedanciami** Laplaceovou transformáciou (obr.4).



Obr. 4 – Nahradenie prvkov impedanciami Laplaceovou transformáciou

V ďalšom kroku zostavíme, pre každú slučku, **napät'ové rovnice podľa II. KZ**:

$$s1: \quad [R_1 + sL_1] \cdot I_1(s) - sL_1 \cdot I_2(s) = U_{in}(s)$$

$$s2: \quad -sL_1 \cdot I_1(s) + \left[ \frac{1}{sC} + sL_2 + sL_1 \right] \cdot I_2(s) - sL_2 \cdot I_3(s) = 0$$

$$s3: \quad -sL_2 \cdot I_2(s) + R_2 \cdot I_3(s) = 0$$

**Rovnice zapíšeme v maticovom tvare:**

$$\begin{bmatrix} R_1 + sL_1 & -sL_1 & 0 \\ -sL_1 & \frac{1}{sC} + sL_2 + sL_1 & -sL_2 \\ 0 & -sL_2 & R_2 + sL_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1(s) \\ I_2(s) \\ I_3(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{in}(s) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Z maticovej rovnice (4.10) vypočítame, **Cramerovým pravidlom**, hodnotu prúdu  $I_3(s)$ .

$$I_3(s) = \frac{\det \begin{vmatrix} R_1 + sL_1 & -sL_1 & U_{in}(s) \\ -sL_1 & \frac{1}{sC} + sL_2 + sL_1 & 0 \\ 0 & -sL_2 & 0 \end{vmatrix}}{\det \begin{vmatrix} R_1 + sL_1 & -sL_1 & 0 \\ -sL_1 & \frac{1}{sC} + sL_2 + sL_1 & -sL_2 \\ 0 & -sL_2 & R_2 \end{vmatrix}}$$

Pomocou prúdu  $I_3(s)$  vypočítame (použitím OZ) napätie na rezistore  $R_2$ , t.j. napätie  $U_{out}(s)$ .

$$U_{out}(s) = I_3(s) \cdot R_2$$

**Výslednú prenosovú funkciu** vypočítame vzťahom:

$$F(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{U_{out}(s)}{U_{in}(s)} \quad (4.12)$$

Dostávame **výsledok prenosovej funkcie v symbolickom tvare**:

$$F(s) = \frac{b_3 s^3}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s} \quad (4.13)$$

kde:

$$b_3 = C \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot R_2$$

$$a_3 = C \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot R_1 + C \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot R_2$$

$$a_2 = L_1 \cdot L_2 + C \cdot L_1 \cdot R_1 \cdot R_2 + C \cdot L_2 \cdot R_1 \cdot R_2$$

$$a_1 = R_1 \cdot R_2 + L_1 \cdot R_2 + L_2 \cdot R_1$$

Po dosadení konkrétnych hodnôt jednotlivých prvkov (podľa tab. 4.1), do prenosovej funkcie (4.13), získavame:

- **Výslednú prenosovú funkciu v numerickom tvare:**

$$F(s) = \frac{7,35 \cdot 10^{-8} \cdot s^3}{8,085 \cdot 10^{-8} \cdot s^3 + 0,0001768 \cdot s^2 + 0,735 \cdot s + 250} \quad (4.14)$$

- **Výslednú prenosovú funkciu v numerickom tvare upravenú pre  $a_0 = 1$ :**

$$F(s) = \frac{2,94 \cdot 10^{-10} \cdot s^3}{3,234 \cdot 10^{-10} \cdot s^3 + 7,07 \cdot 10^{-7} \cdot s^2 + 0,00294 \cdot s + 1} \quad (4.15)$$

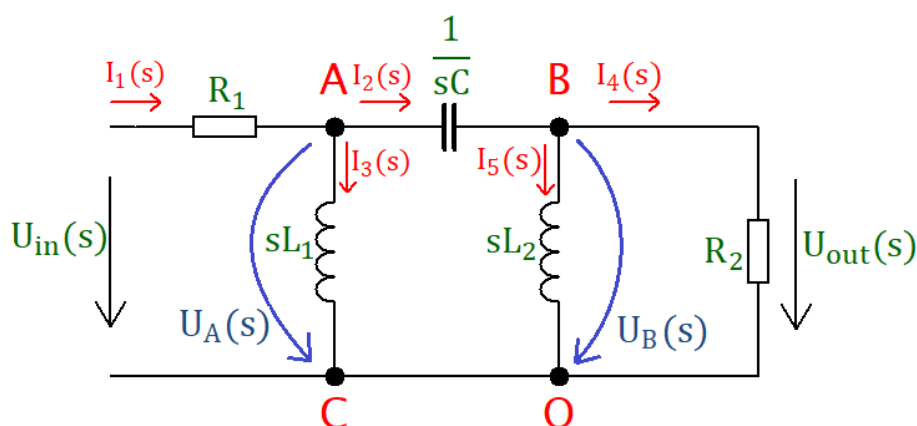
Tabuľka 4.1 obsahuje hodnoty jednotlivých prvkov použitých pri výpočte TF v numerickom tvare.

Tabuľka 4.1- hodnoty prvkov použitých pre výpočet prenosovej funkcie v numerickom tvare:

$R_1$	$R_2$	$L_1$	$L_2$	$C$	$U_{in}$
20 $\Omega$	50 $\Omega$	14 mH	7 mH	15 $\mu F$	10V

### 4.3 Metóda uzlových napätí

V obvode s prvkami v Laplaceovej transformácii označíme smery prúdov, zvolíme referenčný uzol  $O$  a označíme napätie každého z uzlov vzhľadom k referenčnému bodu (obr. 5). Za vzťažný uzol –  $O$  – zvolíme uzol spoločný pre cievky  $L_1$  a  $L_2$ .



Obr. 5 – Označenie schémy zapojenia pre metódu uzlových napätí

Pre uzly A a B zostavíme **rovnice podľa 1. KZ**:

$$\text{uzol A: } I_1(s) - I_2(s) - I_3(s) = 0$$

$$\text{uzol B: } I_2(s) - I_4(s) - I_5(s) = 0$$

Po dosadení uzlových napätí dostaneme:

$$\frac{U_{in}(s) - U_A(s)}{R_1} - [U_A(s) - U_B(s)] \cdot sC - \frac{U_A(s)}{sL_1} = 0$$

$$[U_A(s) - U_B(s)] \cdot sC - \frac{U_B(s)}{R_2} - \frac{U_B(s)}{sL_2} = 0$$

Rovnice prepíšeme nasledovne:

$$\left( \frac{1}{R_1} + sC + \frac{1}{sL_1} \right) \cdot U_A(s) - U_B(s) \cdot sC = \frac{U_{in}(s)}{R_1}$$

$$-U_A(s) \cdot sC + \left( \frac{1}{R_2} + sC + \frac{1}{sL_2} \right) \cdot U_B(s) = 0$$

Rovnice prepíšeme do maticového tvaru:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} + sC + \frac{1}{sL_1} & -sC \\ -sC & \frac{1}{R_2} + sC + \frac{1}{sL_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_A(s) \\ U_B(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{U_{in}(s)}{R_1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Pre nájdenie TF, pomocou metódy uzlových napätí, použijeme rovnice zapísané v maticovom tvare (4.11).

Z maticovej rovnice vypočítame hodnotu napätia  $U_B(s)$ .

$$U_B(s) = \frac{\det \begin{vmatrix} \frac{1}{R_1} + sC + \frac{1}{sL_1} & \frac{U_{in}(s)}{R_1} \\ -sC & 0 \end{vmatrix}}{\det \begin{vmatrix} \frac{1}{R_1} + sC + \frac{1}{sL_1} & -sC \\ -sC & \frac{1}{R_2} + sC + \frac{1}{sL_2} \end{vmatrix}}$$

Pre výpočet prúdu tečúceho rezistorom  $R_2$ , t.j. prúd  $I_4(s)$  platí vzťah:

$$I_4(s) \cdot R_2 - U_B(s) = 0 \quad \text{z toho vyplýva, že} \quad I_4(s) = \frac{U_B(s)}{R_2}$$

Potom napätie na rezistore  $R_2$ , t.j. napätie  $U_{out}(s)$ , vypočítame vzťahom:

$$U_{out}(s) = R_2 \cdot I_4(s)$$

**Výslednú prenosovú funkciu** vypočítame vzťahom (4.12).

Dostávame **totožný výsledok prenosovej funkcie v symbolickom tvare** (4.13) ako pri MSP.

Pre výpočet prenosovej funkcie v numerickom tvare použijeme hodnoty prvkov z tab. 4.1. Dostávame **totožné výsledky prenosových funkcií** ako pri MSP:

- Totožnú výslednú prenosovú funkciu v **numerickom tvare** (4.14).
- Totožnú výslednú prenosovú funkciu v numerickom tvare **upravenú pre  $a_0 = 1$**  (4.15).



#### 4.4 Prechodová a logaritmicko-frekvenčná charakteristika

Z dvoch výsledných (totožných) prenosových funkcií dostávame **prechodovú** a **logaritmicko-frekvenčnú charakteristiku** (obr. 6).

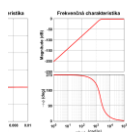
Nakoľko je sústava tvorená troma zásobníkmi energie (2 cievky a jeden kondenzátor) a čitateľ prenosovej funkcie obsahuje iba jednu derivačnú zložku ( $b_3 s^3$ ), ide o **derivačnú sústavu 3. rádu**.

Na základe **núl a pólov** výsledného prenosu (tab. 4.2), prechodovej a logaritmicko-frekvenčnej charakteristiky (obr. 6), môžeme o nami vyšetřovanom systéme – pasívnom hornopriepustnom LCL filtri tretieho rádu – vyhlásiť že je:

- **stabilný**,
- **periodický** (kmitavý),
- **tlmený** ( $0 < \text{tlmenie} < 1$ ),
- **má derivačné vlastnosti**.

Na základe prechodovej charakteristiky výsledného prenosu (obr. 6) môžeme vyhlásiť, že nami vyšetřovaný systém:

- **má maximálny prechmit**  $h_{max} = 0,909$ ,
- **dobu maximálneho prechmitu**  $t_{max} = 0$  sekúnd,



Obr. 6 – Prechodová a logaritmicko-frekvenčná charakteristika analyzovaného prenosového článku  
(Najdenie\_TF\_MSP.m, Najdenie\_TF\_MUN.m)

Nuly a póly výslednej prenosovej funkcie (4.15) získame prostredníctvom výpočtu koreňov čitateľa a menovateľa prenosu. Hodnoty núl a pólov daného prenosu sú zapísané v tab. 4.2.

Tabuľka 4.2 –nuly a póly výslednej prenosovej funkcie (Najdenie\_TF\_MSP.m)

<b>nuly</b>	$s_c:$	0
<b>póly</b>	$s_1:$	1000
	$s_2:$	$-0.9095 + 2.7561i$
	$s_3:$	$-0.9095 - 2.7561i$
	$s_4:$	$-0.3671 + 0.0000i$

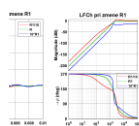
## 4.5 Vyšetrenie závislosti zmeny vlastností obvodu od zmien parametrov $R_1, L_1, L_2, C$

Pre analýzu zapojenia vyšetrovaného prenosového článku (pasívny HPF LCL 3. rádu) budeme meniť hodnoty jednotlivých prvkov obvodu. Pre zmenené hodnoty prvkov obvodu vypočítame TF a priebehy PrCh a LFCh zobrazíme v spoločných grafoch – vždy jeden graf PrCH a LFCh pre jeden prvok obvodu. Zo zobrazených priebehov analyzujeme vlastnosti vyšetrovaného obvodu.

### 4.5.1 Vyšetrenie závislosti zmeny vlastností obvodu od zmeny $R_1$

Na základe výslednej závislosti, realizovanej pre 3 rôzne hodnoty parametra  $R_1$  (obr. 7), môžeme konštatovať že:

- Pri **vyššej hodnote elektrického odporu rezistora  $R_1$**  je, v PrCh, menší maximálny prekmit, kmitanie prebieha na nižších hodnotách zosilnenia, perióda kmitov sa predlžuje. V LFCh sa veľkosť frekvenčnej odozvy posúva na nižšie hodnoty amplitúdy, fázový posun začína klesať pri vyššej hodnote kruhovej frekvencii.
- Pri **nižšej hodnote elektrického odporu rezistora  $R_1$**  je, v PrCh, väčší maximálny prekmit, kmitanie prebieha na vyšších hodnotách zosilnenia, perióda kmitov sa skracuje. V LFCh sa veľkosť frekvenčnej odozvy posúva na vyššie hodnoty amplitúdy, fázový posun začína klesať pri nižšej hodnote kruhovej frekvencii a má plynulejší priebeh.

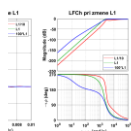


Obr. 7 – Prechodová a logaritmicko-frekvenčná charakteristika analyzovaného prenosového článku pri zmene  $R_1$  (Vyšetrenie\_vplyvu\_zmeny\_parametrov.m)

#### 4.5.2 Vyšetrenie závislosti zmeny vlastností obvodu od zmeny $L_1$

Na základe výslednej závislosti, realizovanej pre 3 rôzne hodnoty parametra  $L_1$  (obr. 8), môžeme konštatovať že:

- Pri **vyššej hodnote indukcie cievky  $L_1$**  je, v PrCh, menší maximálny prekmit, kmitanie prebieha na nižších hodnotách zosilnenia, perióda prvého prekmitu vzrastá. V LFCh sa veľkosť frekvenčnej odozvy posúva na vyššie hodnoty amplitúdy, fázový posun začína klesať pri nižšej hodnote kruhovej frekvencii a má plynulejší priebeh.
- Pri **nižšej hodnote indukcie cievky  $L_1$**  je, v PrCh, nižší maximálny prekmit s kratšou periódou prekmitu, frekvencia kmitov vzrastá. V LFCh sa charakteristika posúva na nižšie hodnoty amplitúdy, fázový posun začína klesať pri vyššej hodnote kruhovej frekvencii.

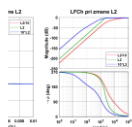


Obr. 8 – Prechodová a logaritmicke-frekvenčná charakteristika analyzovaného prenosového článku pri zmene  $L_1$  (Vyšetrenie\_vplyvu\_zmeny\_parametrov.m)

#### 4.5.3 Vyšetrenie závislosti zmeny vlastností obvodu od zmeny $L_2$

Na základe výslednej závislosti, realizovanej pre 3 rôzne hodnoty parametra  $L_2$  (obr. 9), môžeme konštatovať že:

- Pri **vyššej hodnote indukcie cievky  $L_2$**  je, v PrCh, menší maximálny prekmit s dlhšou periódou prekmitu. V LFCh sa veľkosť frekvenčnej odozvy posúva na vyššie hodnoty amplitúdy, fázový posun začína klesať pri nižšej hodnote kruhovej frekvencii a má plynulejší priebeh.
- Pri **nižšej hodnote indukcie cievky  $L_2$**  je, v PrCh, nižší maximálny prekmit s kratšou periódou prekmitu. V LFCh sa veľkosť frekvenčnej odozvy posúva na nižšie hodnoty amplitúdy, pokles fázového posunu má plynulejší priebeh.

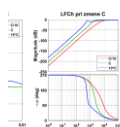


Obr. 9 – Prechodová a logaritmicke-frekvenčná charakteristika analyzovaného prenosového článku pri zmene  $L_2$  (Vyšetrenie\_vplyvu\_zmeny\_parametrov.m)

#### 4.5.4 Vyšetrenie závislosti zmeny vlastností obvodu od zmeny $C$

Na základe výslednej závislosti, realizovanej pre 3 rôzne hodnoty parametra  $C$  (obr. 10), môžeme konštatovať že:

- Pri vyššej hodnote elektrickej kapacity kondenzátora  $C$  je, v PrCh, menší maximálny prekmit, kmitanie prebieha na nižších hodnotách zosilnenia, perióda kmitov sa predlžuje. V LFCh sa veľkosť frekvenčnej odozvy posúva na vyššie hodnoty amplitúdy, pokles fázového posunu má rýchlejší priebeh.
- Pri nižšej hodnote elektrickej kapacity kondenzátora  $C$  je, v PrCh, väčší maximálny prekmit, kmitanie prebieha na vyšších hodnotách zosilnenia, perióda kmitov sa skracuje, frekvencia kmitov sa skracuje. V LFCh sa veľkosť frekvenčnej odozvy posúva na nižšie hodnoty amplitúdy, pokles fázového posunu má plynulejší priebeh.



Obrázok 10 – Prechodová a logaritmicko-frekvenčná charakteristika analyzovaného prenosového článku pri zmene C (Vyšetrenie\_vplyvu\_zmeny\_parametrov.m)

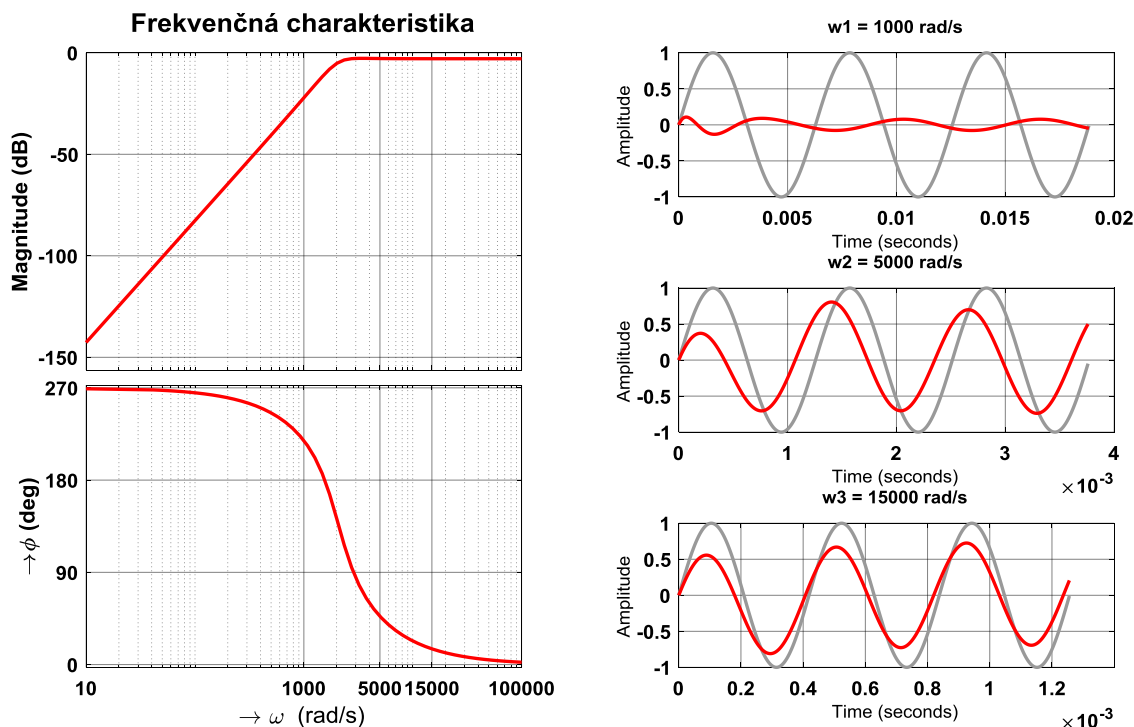
#### 4.6 Odozva obvodu na harmonický signál pri zmene frekvencie

Pre potrebu analýzy odozvy prenosového článku na harmonický signál, zobrazíme **priebehy amplitúd v čase, pri troch rôznych hodnotách kruhovej frekvencie** (obr. 11):

- $\omega_1 = 1000 \text{ rad/s}$
- $\omega_2 = 5000 \text{ rad/s}$
- $\omega_3 = 15000 \text{ rad/s}$

Pre zobrazené priebehy môžeme konštatovať:

- pri kruhovej frekvencii  **$\omega_1 = 1000 \text{ rad/s}$**  je veľkosť frekvenčnej odozvy **-22,1 db**, čo znamená že hodnota amplitúdy výstupného napätia predstavuje **menej ako 10%** hodnoty amplitúdy vstupného napätia. Fázový posun má hodnotu 218 stupňov.
- pri kruhovej frekvencii  **$\omega_1 = 5000 \text{ rad/s}$**  je veľkosť frekvenčnej odozvy **-2,83 db**, čo znamená že hodnota amplitúdy výstupného napätia predstavuje **približne 70%** hodnoty amplitúdy vstupného napätia. Fázový posun má hodnotu 47,3 stupňov.
- pri kruhovej frekvencii  **$\omega_1 = 15000 \text{ rad/s}$**  je veľkosť frekvenčnej odozvy **-2,92 db**, čo znamená že hodnota amplitúdy výstupného napätia predstavuje **približne 70%** hodnoty amplitúdy vstupného napätia. Fázový posun má hodnotu 15,4 stupňov.



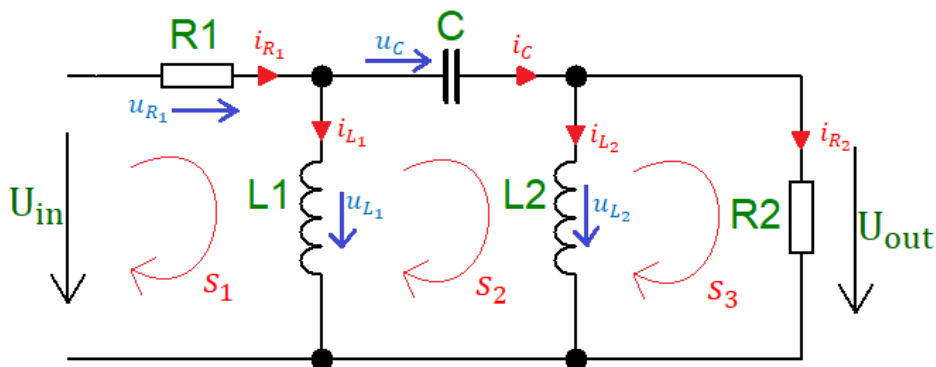
Obr. 11 – Odozva obvodu na harmonický signál pri zmene frekvencie  
(Vysetrenie\_zmeny\_fazoveho\_posunu\_pri\_zmene\_frekvencie.m)

## 4.7 Stavový model obvodu

Analýzu prenosového článku (obr. 2) môžeme vykonať aj pomocou stavového modelu obvodu. Analýza prenosového článku, touto metódou, nám zároveň posluží na overenie predchádzajúcich riešení.

### 4.7.1 Odvodenie stavového modelu

Pre potrebu odvodenia stavového modelu analyzovaného prenosového článku, si do pôvodnej schémy zapojenia (obr. 2), vyznačíme vetvové prúdy, úbytky napätí na súčiastkach a uzavreté napäťové slučky (obr. 12).



Obr. 12 – Označenie schémy zapojenia pre získanie stavového modelu

Následne si **zvolíme stavové veličiny** elektrického obvodu:

$$i_{L_1} = x_1, \quad u_C = x_2, \quad i_{L_2} = x_3,$$

Z napäťových slučiek v schéme zostavíme **napäťové rovnice**:

$$s1: \quad R_1 \cdot \left( i_{L_1} + C \cdot \frac{du_C}{dt} \right) + L_1 \cdot \frac{di_{L_1}}{dt} = U_{in}$$

$$s2: \quad -L_1 \cdot \frac{di_{L_1}}{dt} + u_C + L_2 \cdot \frac{di_{L_2}}{dt} = 0$$

$$s3: \quad -L_2 \cdot \frac{di_{L_2}}{dt} + R_2 \cdot \left( C \cdot \frac{du_C}{dt} - i_{L_2} \right) = 0$$

V rovniciach **nahradíme stavové veličiny**:

$$s1: \quad R_1 \cdot \left( x_1 + C \cdot \frac{dx_2}{dt} \right) + L_1 \cdot \frac{dx_1}{dt} = U_{in}$$

$$s2: \quad -L_1 \cdot \frac{dx_1}{dt} + x_2 + L_2 \cdot \frac{dx_3}{dt} = 0$$

$$s3: \quad -L_2 \cdot \frac{dx_3}{dt} + R_2 \cdot \left( C \cdot \frac{dx_2}{dt} - x_3 \right) = 0$$

Rovnice **upravíme** nasledovným spôsobom:

$$s1: \quad R_1 \cdot x_1 + L_1 \cdot \frac{dx_1}{dt} + R_1 \cdot C \cdot \frac{dx_2}{dt} = U_{in}$$

$$s2: \quad x_2 - L_1 \cdot \frac{dx_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{dx_3}{dt} = 0$$

$$s3: \quad -R_2 \cdot x_3 + R_2 \cdot C \cdot \frac{dx_2}{dt} - L_2 \cdot \frac{dx_3}{dt} = 0$$

Vzhľadom na to, že rovnice tvoria sústavu lineárnych algebraických rovníc s viacerými neznámymi, ich **riešenie budeme hľadať pomocou symbolického počtu** v symbolickom MATLABe. Pre riešenie v MATLABe rovnice formálne prepíšeme ( $dx \approx dx/dt$ , atď.):

$$s1: \quad R_1 \cdot x_1 + L_1 \cdot dx_1 + R_1 \cdot C \cdot dx_2 = U_{in}$$

$$s2: \quad x_2 - L_1 \cdot dx_1 + L_2 \cdot dx_3 = 0$$

$$s3: \quad -R_2 \cdot x_3 + R_2 \cdot C \cdot dx_2 - L_2 \cdot dx_3 = 0$$

Po vyriešení v MATLABe dostávame upravený výpis riešenia rovníc:

$$dx_1 = \frac{R_2 \cdot U_{in} + R_1 \cdot X_2 - R_1 \cdot R_2 \cdot X_1 - R_1 \cdot R_2 \cdot X_3}{L_1 \cdot (R_1 + R_2)} \quad (4.16)$$

$$dx_2 = \frac{U_{in} - X_2 - R_1 \cdot X_1 + R_2 \cdot X_3}{C \cdot (R_1 + R_2)} \quad (4.17)$$

$$dx_3 = \frac{-R_2 \cdot (X_2 - U_{in} + R_1 \cdot X_1 + R_1 \cdot X_3)}{L_2 \cdot (R_1 + R_2)} \quad (4.18)$$



Upravený výpis riešenia rovníc prepíšeme do **maticového tvaru** stavového modelu:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_1 \cdot R_2}{L_1 \cdot (R_1 + R_2)} & \frac{R_1}{L_1 \cdot (R_1 + R_2)} & \frac{-R_1 \cdot R_2}{L_1 \cdot (R_1 + R_2)} \\ \frac{-R_1}{C \cdot (R_1 + R_2)} & \frac{-1}{C \cdot (R_1 + R_2)} & \frac{R_2}{C \cdot (R_1 + R_2)} \\ \frac{-R_1 \cdot R_2}{L_2 \cdot (R_1 + R_2)} & \frac{-R_2}{L_2 \cdot (R_1 + R_2)} & \frac{-R_1 \cdot R_2}{L_2 \cdot (R_1 + R_2)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{R_2}{L_1 \cdot (R_1 + R_2)} \\ \frac{1}{C \cdot (R_1 + R_2)} \\ \frac{R_2}{L_2 \cdot (R_1 + R_2)} \end{bmatrix} \cdot U_{in}$$

Pre získanie stavového modelu analyzovaného prenosového článku použijeme **výstupnú rovnicu**:

$$y = U_{out} = L_2 \cdot dx_3$$

Do výstupnej rovnice dosadíme, za  $dx_3$ , riešenie rovnice (4.18) zo symbolického MATLABu (Stavovy\_model\_M):

$$y = U_{out} = L_2 \cdot \frac{-R_2 \cdot (X_2 - U_{in} + R_1 \cdot X_1 + R_1 \cdot X_3)}{L_2 \cdot (R_1 + R_2)}$$

Po **úprave** dostávame výsledok:

$$U_{out} = \frac{R_2 \cdot U_{in} - R_2 \cdot X_2 - R_1 \cdot R_2 \cdot X_1 - R_1 \cdot R_2 \cdot X_3}{R_1 + R_2}$$

Výsledok prepísaný do maticového tvaru:

$$U_{out} = \begin{bmatrix} \frac{-R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} & \frac{-R_2}{R_1 + R_2} & \frac{-R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \end{bmatrix} \cdot U_{in}$$

#### 4.7.2 Nájdenie prenosovej funkcie pomocou stavového modelu

Stavové rovnice zapíšeme do MATLABu v tvare matíc a vektorov (4.19 – 4.22), pričom následne do nich dosadíme parametre z tab. 4.1.

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{-R_1 \cdot R_2}{L_1 \cdot (R_1 + R_2)} & \frac{R_1}{L_1 \cdot (R_1 + R_2)} & \frac{-R_1 \cdot R_2}{L_1 \cdot (R_1 + R_2)} \\ \frac{-R_1}{C \cdot (R_1 + R_2)} & \frac{-1}{C \cdot (R_1 + R_2)} & \frac{R_2}{C \cdot (R_1 + R_2)} \\ \frac{-R_1 \cdot R_2}{L_2 \cdot (R_1 + R_2)} & \frac{-R_2}{L_2 \cdot (R_1 + R_2)} & \frac{-R_1 \cdot R_2}{L_2 \cdot (R_1 + R_2)} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$[b] = \begin{bmatrix} \frac{R_2}{L_1 \cdot (R_1 + R_2)} \\ \frac{1}{C \cdot (R_1 + R_2)} \\ \frac{R_2}{L_2 \cdot (R_1 + R_2)} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

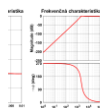
$$[cT] = \begin{bmatrix} \frac{-R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} & \frac{-R_2}{R_1 + R_2} & \frac{-R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$$[d] = \left[ \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] \quad (4.22)$$

Na základe stavového modelu obvodu (4.19 – 4.22), dostávame, riešením v MATLABe, výslednú prenosovú funkciu v numerickom tvare:

$$F(s) = \frac{5,145 \cdot 10^{-11} \cdot s^3 + 6,629 \cdot 10^{-24} \cdot s^2 - 2,372 \cdot 10^{-35} \cdot s - 2,674 \cdot 10^{-48}}{7,203 \cdot 10^{-11} \cdot s^3 + 2,891 \cdot 10^{-07} \cdot s^2 + 0,00063 \cdot s + 1} \quad (4.23)$$

Prenosovej funkcii stavového modelu (4.23) zodpovedá PRCh a LFCh (obr.13).



Obrázok 13 – Prechodová a logaritmicko-frekvenčná charakteristika analyzovaného prenosového článku (Stavovy\_model\_M.m)

#### 4.7.3 Zhodnotenie výsledkov získaných zo stavového modelu obvodu

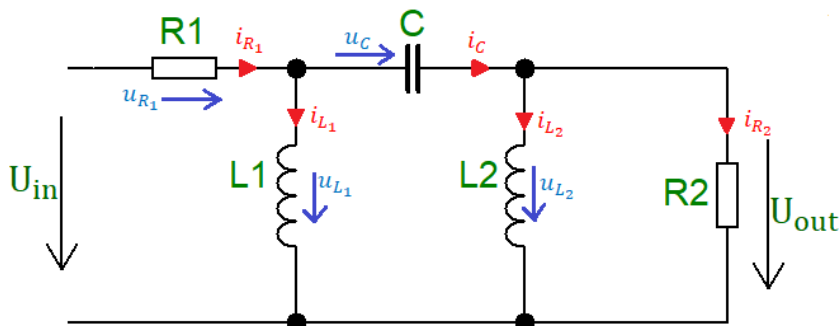
Pri porovnaní nájdenej prenosovej funkcie (4.23), s prenosovou funkciou získanou metódami MSP a MUN (4.14), je zrejme, že prenosové funkcie sa nezhodujú a preto sa nezhodujú ani PrCh a LFCh. Vzhľadom na to môžeme usudzovať, že pri nachádzaní TF, pomocou stavového modelu, sme zrejme niekde urobili chybu.

### 4.8 Odvodenie simulačného modelu z rovníc obvodu

Analýzu prenosového článku (obr. 2) môžeme vykonať aj pomocou simulačného modelu obvodu. Analýza prenosového článku, touto metódou, nám zároveň poslúži na overenie predchádzajúcich riešení.

#### 4.8.1 Odvodenie simulačného modelu

Pre potrebu odvodenia simulačného modelu analyzovaného prenosového článku, si do pôvodnej schémy zapojenia (obr. 2), vyznačíme vetvové prúdy a úbytky napätí na súčiastkach (obr. 14).



Obr. 14 – Označenie schémy zapojenia pre potrebu odvodenia simulačného modelu

Simulačný obvod vytvoríme na základe týchto rovníc (1. KZ, 2. KZ, OZ):

$$U_{out}(s) = I_{R_2}(s) \cdot R_2$$

$$I_{R_2}(s) = I_C(s) - I_{L_2}(s)$$

$$I_C(s) = I_{R_1}(s) - I_{L_1}(s)$$

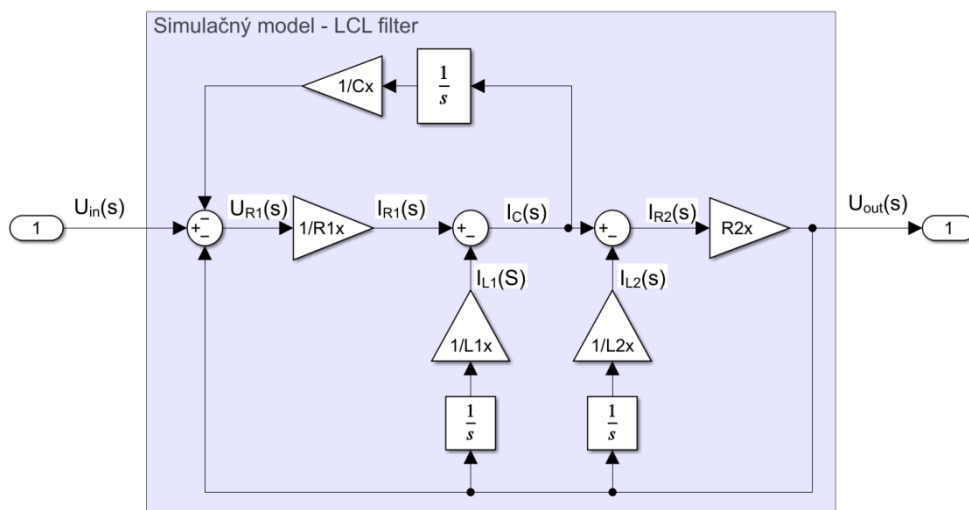
$$I_{L_2}(s) = U_{out}(s) \cdot \frac{1}{sL_2}$$

$$I_{L_1}(s) = U_{out}(s) \cdot \frac{1}{sL_1}$$

$$U_{R_1}(s) = U_{in}(s) - U_C(s) - U_{out}(s)$$

#### 4.8.2 Simulačný model v Simulinku

Výsledný simulačný model obvodu (obr. 15) nám umožňuje sledovať priebeh napätia na rezistore  $R_2$ , t.j. napätie  $U_{out}$ , prípadne nájsť prenosovú funkciu a k nemu odpovedajúce charakteristiky (PrCh a LFCh).



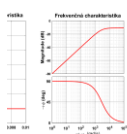
Obr. 15 – Simulačný model analyzovaného prenosového článku (LCL\_filter\_S.slx)

#### 4.8.1 Nájdenie prenosovej funkcie pomocou simulačného modelu

Zo zostaveného simulačného modelu (obr.15) dostávame výslednú prenosovú funkciu (LCL\_filter\_M.m):

$$F(s) = \frac{1,574 \cdot 10^{11} \cdot s^3 - 0,012 \cdot s^2 + 1,846 \cdot 10^{-20} \cdot s + 5,264 \cdot 10^{-50}}{3,511 \cdot 10^{11} \cdot s^3 + 1,574 \cdot 10^{15} \cdot s^2 + 5,248 \cdot 10^{12} \cdot s - 1} \quad (4.24)$$

Prenosovej funkcii (4.24) zodpovedá prechodová a logaritmicke-frekvenčná charakteristika (obr.16):



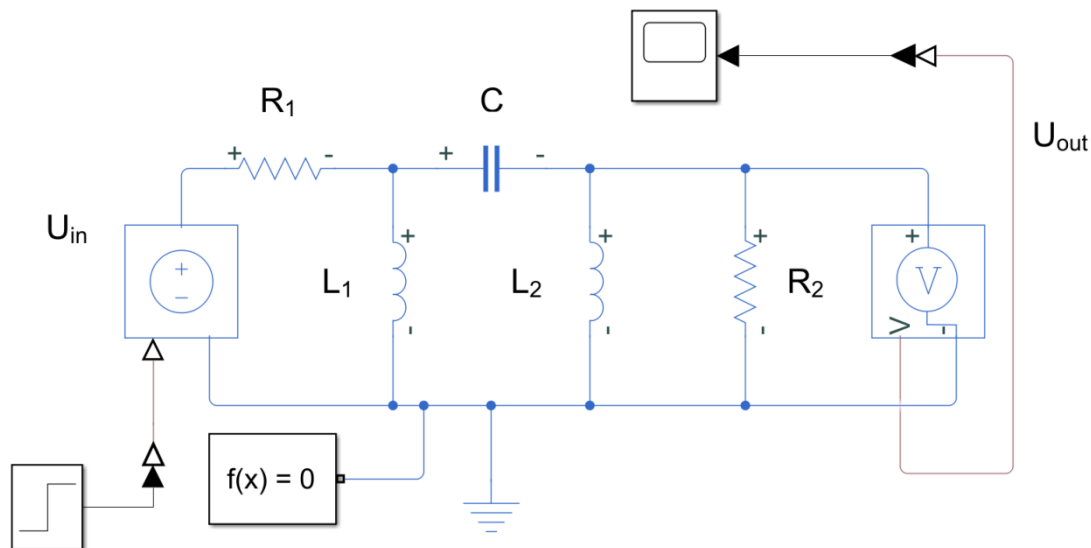
Obrázok 16 – Prechodová a logaritmicke-frekvenčná charakteristika analyzovaného prenosového článku (LCL\_filter\_M.m)

#### 4.8.1 Zhodnotenie výsledkov získaných zo stavového modelu obvodu

Pri porovnaní nájdenej prenosovej funkcie (4.24), s prenosovou funkciou získanou metódami MSP a MUN (4.14), je zrejmé, že prenosové funkcie sa nezhodujú a preto sa nezhodujú ani PrCh a LFCh. Vzhľadom na to môžeme usudzovať, že pri nachádzaní TF, pomocou simulačného modelu, sme zrejme niekde urobili chybu.

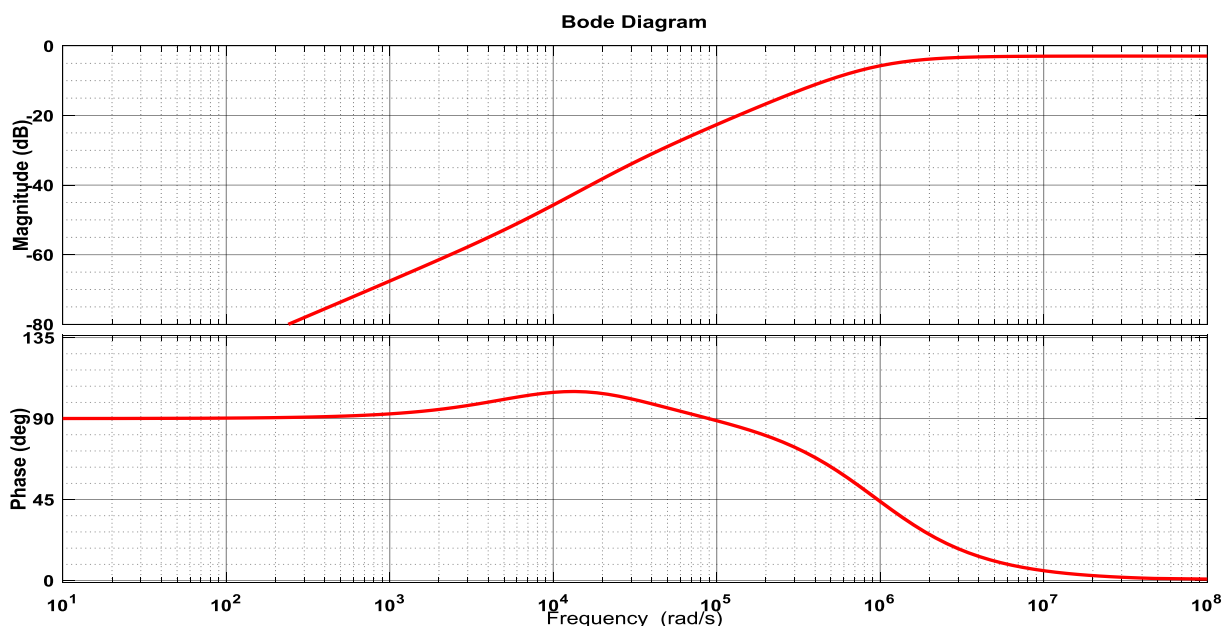
#### 4.9 Analýza obvodu na základe simulačného modelu v Simscape

Analýzu prenosového článku (obr. 2) môžeme vykonať aj pomocou simulačného modelu obvodu vytvoreného v simulačnom prostredí Simscape. Analýza prenosového článku, touto metódou, nám zároveň poslúži na overenie predchádzajúcich riešení. Simulačná schéma prenosového článku, vytvorená v prostredí Simscape, sa nachádza na obr. 17.



Obrázok 177 – Simulačný model obvodu v prostredí Simscape (LCL\_filter\_Simscape.slx)

Zo simulačnej schémy dostávame logaritmicko-frekvenčnú charakteristiku (obr. 18), ktorá sa však nezohoduje s našimi predchádzajúcimi výsledkami, a preto môžeme predpokladať, že pri získavaní sme niekde urobili chybu..



Obrázok 188 – Logaritmicko-frekvenčná charakteristika prenosového článku  
(LCL\_filter\_Simscape.slx)

## 5 Záver

Hlavnou podstatou tohto referátu bola **analýza zapojenia prenosového článku**, t.j. pasívneho hornopriepustného LCL filtra (obr. 2).

Analýzu prenosového článku sme vykonávali na základe viacerých metód a postupov. Prenosovú funkciu, a k nej prislúchajúcu prechodovú a logaritmicko-frekvenčnú charakteristiku, sme hľadali **metódou slučkových prúdov**, **metódou uzlových napätí**, pomocou **stavového modelu** obvodu, pomocou **simulačného modelu** v Simulinku a v Simscape. Zo všetkých riešení sme požadovali rovnaké výsledky, ktoré mali zároveň slúžiť aj ako kontrola správnosti jednotlivých riešení. Zhodné riešenia sme však dostali len pri MSP a MUN, čo naznačuje, že pri ostatných riešeniach sme zrejme urobili chyby.

Z nájdenej prenosovej funkcie, podľa MSP a MUN, sme zistili nuly a póly prenosu, ktoré nám spolu s odpovedajúcimi PrCh a LFCh umožnili charakterizovať systém ako **stabilnú, periodickú, tlmenú, derivačnú sústavu 3. rádu**.

**Dynamické vlastnosti** obvodu sme zisťovali pozorovaním zmien v PrCh a LFCh vzhľadom na **zmenu hodnôt jednotlivých prvkov**. So zmenou parametrov jednotlivých prvkov  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $L_1$ ,  $L_2$  a  $C$  sa v PrCh menili hodnoty a periódy kmitov, a v LFCh sa menili veľkosti frekvenčných odoziev spolu s fázovými posuvmi.

**Dynamické vlastnosti** obvodu sme zisťovali taktiež **odzvou obvodu na harmonický signál pri 3 rôznych frekvenciách**, pričom sme na príslušných PrCh a LFCh pozorovali zmeny amplitúdy a zmeny fázového posunu napätia na rezistore  $R_2$ , t.j. napätia  $U_{out}$ .

Získané výsledky môžu poslúžiť pri **návrhu a dimenzovaní** pasívneho hornopriepustného filtra 3. Rádu.

Pre získanie lepšieho prehľadu, z oblastí dynamických vlastností obvodu, odporúčame sledovať zmeny PrCh a LFCh pri použití viacerých hodnôt jednotlivých prvkov obvodu, prípadne **využiť platformy slúžiace na rýchle výpočty** prvkov obvodu, ktoré sme spomínali v úvode referátu.

## Zoznam použitej literatúry

- [1] ElectronicBase. *High Pass Filter Calculator*. Dostupné na internete: <https://electronicbase.net/high-pass-filter-calculator/>, [online: marec 2022].
- [2] Fusheng, L. – Ruisheng, L – Fengquan, Z.: *Microgrid Technology and Engineering Application*. Academic Press. 2015. ISBN: 9780128035986.
- [3] Libbey R.: *Handbook of Circuit Mathematics for Technical Engineers*. CRC Press. Boston. 1991. ISBN: 0-8493-7404-9
- [4] Jotrin. *Chebyshev Pi LC High-Pass Filter Calculator*. Dostupné na internete: <https://www.jotrin.it/tool/details/QBXFPLGTLBQJSQ>, [online: marec 2022].
- [5] CalculatorEdge. *Butterworth Tee LC High Pass Filter Calculator*. Dostupné na internete: <http://www.calculatoredge.com/electronics/bw%20tee%20high%20pass.htm>, [online: marec 2022].
- [6] LearningAboutElectronics. *High Pass Filter Calculator*. Dostupné na internete: <http://www.learningaboutelectronics.com/Articles/High-pass-filter-calculator.php>, [online: marec 2022].

## 6 Prílohy

### 6.1 Zoznam príloh

**Príloha A: LCL\_filter\_blok\_schem\_M.m** (Program pre výpočet a zobrazenie TF na základe blokovej schémy prenosového článku)

**Príloha B: LCL\_filter\_blok\_Simscape.slx** (Program pre zobrazenie LFCh prenosového článku na základe simulačného modelu v simulačnom prostredí Simscape)

**Príloha C: LCL\_filter\_blok\_schem\_S.slx** (Bloková schéma prenosového článku)

**Príloha D: Najdenie\_TF\_MSP.m** (Program pre výpočet TF pomocou symbolického MATLABu – metódou slučkových prúdov – a výpočet núl a pólov TF)

**Príloha E: Najdenie\_TF\_MUN.m** (Program pre výpočet TF pomocou symbolického MATLABu, metódou uzlových napätí)

**Príloha F: Stavovy\_model\_M.m** (Program pre výpočet a zobrazenie TF pomocou stavového modelu el. obvodu, )

**Príloha G: Vyšetrenie\_vplyvu\_zmeny\_parametrov.m** (Program pre vyšetrenie zmeny fázového posunu pri zmene frekvencie).

**Príloha H: Vyšetrenie\_zmeny\_fazoveho\_posunu\_pri\_zmene\_frekvencie.m** (Program pre vyšetrenie zmeny fázového posunu pri zmene frekvencie).

### Príloha A: LCL\_filter\_blok\_schem\_M.m

```
% Program pre výpočet a zobrazenie TF na základe blokovej schémy
% prenosového článku. I. Zeman, 10.5.2022
% Znázornenie PrCH a LFCH viacslučkového obvodu HPF LCL
% Príklad: trojslučkový obvod - hornopriepustný LCL filter
% Zmeny veľkosti popisov osi, farby a hrúbky čiary
% Simulácia a znázornenie PrCH a LFCH z blok. modelu v Simulinku

clear, clc, clf, format compact
syms s R1 R2 L1 L2 C Uin %deklarácia symbolických premenných
R1x=20; R2x=50; L1x=14e-3; L2x=7e-3; Cx=15e-6; Uinx=10;
Tstep=10e-3; wmin=1; wmax=1e5; % parametre pre Step a Bode

[A,B,C,D]=linmod('LCL_filter_blok_schem_S');
[num,den]=ss2tf(A,B,C,D)
F=tf(num/den(end),den/den(end))

figure(1) % Vykresľovanie a popis priebehov PrCh a LFCh
color='r';
subplot(121); step(F,Tstep,color), grid on,
    title('Prechodová charakteristika','FontSize',16)
    xlabel('\rightarrow T','FontSize',14)
    ylabel('\rightarrow U_{out}/U_{in}','FontSize',14)
```



```

        set(findall(gcf,'type','line'),'linewidth',1.5) % inštrukcia pre
zmenu hrúbky čiar
        ax = gca %úprava popisu osí - farba, veľkosť, bold
        ax.YColor = 'k'; ax.XColor = 'k'; ax.FontSize = 12; ax.FontWeight =
'bold';
subplot(122); bode(F,{wmin,wmax},color), grid on
        title('Frekvenčná charakteristika','fontsize',16)
        xlabel('\rightarrow
\omega','FontSize',14), ylabel('\rightarrow\phi','FontSize',14)
        set(findall(gcf,'type','line'),'linewidth',1.5) % inštrukcia pre
zmenu hrúbky čiar
        ax = gca %úprava popisu osí - farba, veľkosť, bold
        ax.YColor = 'k'; ax.XColor = 'k'; ax.FontSize = 12; ax.FontWeight =
'bold';

```

## Príloha D: Najdenie\_TF\_MSP.m

```

% Program pre výpočet TF pomocou symb.MATLABu (MSP). I. Zeman, 27.3.2022
% Simulácia a znázornenie PrCH a LFCH viacslučkového obvodu HPF LCL
% Príklad: trojslučkový obvod - hornopriepustný LCL filter
% Zmeny veľkosti popisov osí, farby a hrúbky čiary
% Výpočet núl a pólov pre LCL filter
% Simulácia a znázornenie PrCH a LFCH z blok. modelu v Simulinku

clear, clc, clf, format compact
syms s R1 R2 L1 L2 C Uin Uoutsim %deklarácia symbolických premenných

% Zadanie vstupných hodnôt
disp('Hornopriepustný LCL filter so záťažou - riešenie obvodu MSP')
R1x=20; R2x=50; L1x=14e-3; L2x=7e-3; Cx=15e-6; Uinx=10;
Tstep=10e-3; wmin=1; wmax=1e5; % parametre pre Step a
Bode
Tchirp=0.04; wminchirp=1e1; wmaxchirp=1e3; % parametre pre Chirp
Tsim=0.02; % doba simulácie v
Simulinku (experimentálne určená)
color='r'; % farba grafu
b,r,y,m,c,

% Zápis systému a výpočet TF v symbolickom tvare
Z=[R1+s*L1 -s*L1 0 %matica impedancií
obvodu podľa MSP:
-s*L1 1/(s*C)+s*L2+s*L1 -s*L2
0 -s*L2 R2+s*L2 ];
u=[Uin; 0; 0]; %vektor napätí obvodu
ZI3=[Z(:,1) Z(:,2) u]; %submatica pre I3
I3=det(ZI3)/det(Z); %výpočet slučkového
prúdu I3 Cramerovým pravidlom
Uout=R2*I3; %výstupné napätie UR2
(OZ)
F=Uout/Uin %nájdanie TF F(s) =
Y/U v symbolickom tvare

% Spracovanie údajov TF v symbolickom tvare pre prechod do num. MATLABu
[cit,men]=numden(F); % oddelenie polynómov čitateľa a
menovateľa
cit=subs(cit,{R1,R2,L1,L2,C,Uin,Uoutsim},{R1x,R2x,L1x,L2x,Cx,Uinx,Uoutsim})
; % dosadenie hodnôt do polynómu čitateľa
men=subs(men,{R1,R2,L1,L2,C,Uin,Uoutsim},{R1x,R2x,L1x,L2x,Cx,Uinx,Uoutsim})
; % dosadenie do polynómu menovateľa

```

```

b=sym2poly(cit); % b - koeficienty polynómu
čitateľa b(s)
a=sym2poly(men); % a - koeficienty polynómu
menovateľa a(s)
b=double(b); % Prechod do numerickeho MATLABu
a=double(a);
F=tf(b,a) % Výsledná TF v numerickom MATLABe
F=tf(b/a(end),a/a(end)) % TF upravená pre a0=1 (normovanie TF)

figure(1) % Vykresľovanie a popis priebehov PrCh a LFCh
subplot(121); step(F,Tstep,color), grid on,
    title('Prechodová charakteristika','FontSize',16)
    xlabel('\rightarrow T','FontSize',14)
    ylabel('\rightarrow U_{out}/U_{in}','FontSize',14)
subplot(122); bode(F,{wmin,wmax},color), grid on
    title('Frekvenčná charakteristika','fontSize',16)
    xlabel('\rightarrow \omega','FontSize',14), ylabel('\rightarrow \phi','FontSize',14)
    set(findall(gcf,'type','line'),'linewidth',1.5) % inštrukcia pre zmenu hrúbky čiary

%výpočet núl a pólov pre TF
roots([2.94e-10]) %výpočet koreňov čitateľa
roots([3.234e-10 7.07e-07 0.00294 1]) %výpočet koreňov menovateľa

```

## Príloha E: Najdenie\_TF\_MUN.m

```

% Program pre výpočet TF pomocou symb.MATLABu (MUN). I. Zeman, 27.3.2022
% Znázornenie PrCH a LFCH viacsľučkového obvodu HPF LCL
% Príklad: trojsľučkový obvod - hornopriepustný LCL filter
% Zmeny veľkosti popisov osi, farby a hrúbky čiary

clear, clc, clf, format compact
syms s R1 R2 L1 L2 C Uin %deklarácia symbolických premenných

% Zadanie vstupných hodnôt
disp('Hornopriepustný LCL filter so záťažou - riešenie obvodu MSP')
R1x=20; R2x=50; L1x=14e-3; L2x=7e-3; Cx=15e-6; Uinx=10;
Tstep=10e-3; wmin=1; wmax=1e5; % parametre pre Step a Bode
color='r'; % farba grafu b,r,y,m,c,

% Zápis systému a výpočet TF v symbolickom tvare
Z=[(1/R1)+(s*C)+1/(s*L1) -s*C %matica
    -s*C (1/R2)+(s*C)+1/(s*L2)];
u=[Uin/R1; 0]; %vektor napätí obvodu
ZUA=[u Z(:,2)]; %submatica pre UA
UA=det(ZUA)/det(Z); %výpočet uzlového napätia UA
Cramerovým pravidlom
ZUB=[Z(:,1) u]; %submatica pre UB
UB=det(ZUB)/det(Z); %výpočet uzlového napätia UB
Cramerovým pravidlom
I4=UB/R2; %výpočet prúdu I4 (1.KZ)
Uout=R2*I4; %výstupné napätie R2 (OZ)
F=Uout/Uin %nájdanie TF F(s) = Y/U v symbolickom tvare

```

```

% Spracovanie údajov TF v symbolickom tvare pre prechod do num. MATLABu
[cit,men]=numden(F); % oddelenie polynómov čitateľa a
menovateľa
cit=subs(cit,{R1,R2,L1,L2,C,Uin},{R1x,R2x,L1x,L2x,Cx,Uinx}); %
dosadenie hodnôt do polynómu čitateľa
men=subs(men,{R1,R2,L1,L2,C,Uin},{R1x,R2x,L1x,L2x,Cx,Uinx}); %
dosadenie do polynómu menovateľa
b=sym2poly(cit); % b - koeficienty polynómu
čitateľa b(s)
a=sym2poly(men); % a - koeficienty polynómu
menovateľa a(s)
b=double(b); % Prechod do numerickeho MATLABu
a=double(a);
F=tf(b,a) % Výsledná TF v numerickom MATLABe
F=tf(b/a(end),a/a(end)) % TF upravená pre a0=1 (normovanie
TF)

%figure(1) % Vykresľovanie a popis priebehov PrCh a LFCh
subplot(121); step(F,Tstep,color), grid on,
    title('Prechodová charakteristika','FontSize',16)
    xlabel('\rightarrow T','FontSize',16)
    ylabel('\rightarrow U_{out}/U_{in}','FontSize',16)
    ax = gca %úprava popisu osí - farba, veľkosť, bold
    ax.YColor = 'k'; ax.XColor = 'k'; ax.FontSize = 12; ax.FontWeight =
'bold';

subplot(122); bode(F,{wmin,wmax},color), grid on
    title('Frekvenčná charakteristika','fontsize',16)
    xlabel('\rightarrow \omega','FontSize',16)
    ylabel('\rightarrow \phi','FontSize',16)
    set(findall(gcf,'type','line'),'linewidth',2) % inštrukcia pre zmenu
hrúbky čiary
    ax = gca %úprava popisu osí - farba, veľkosť, bold
    ax.YColor = 'k'; ax.XColor = 'k'; ax.FontSize = 12; ax.FontWeight =
'bold';

```

## Príloha F: Stavovy\_model\_M.m

```

% Program pre výpočet a zobrazenie TF pomocou stavového modelu el. obvodu.
I. Zeman, 25.4.202
% Príklad: trojslučkový obvod - hornopriepustný LCL filter
% Riešenie sústavy 3 lin.alg.rovnic v symb.MATLABe
% pre daný elektrický obvod:
%
%  $R1.x1 + L1.dx1 + R1.C.dx2 = Uin$ 
%  $x2 - L1.dx1 + L2.dx3 = 0$ 
%  $-R2.x3 + R2.C.dx2 - L2.dx3 = 0$ 
%
% Neznámymi sú premenné dx1, dx2, dx3 predstavujúce derivácie stavových
veličin
%  $dx1=dx1/dt$ ,  $dx2=dx2/dt$ ,  $dx3=dx3/dt$ 
%
% Znázornenie PrCH a LFCH viacslučkového obvodu
% Zmeny veľkosti popisov osí, farby a hrúbky čiary
clear, clc, clf, format compact

% parametre obvodu
syms x1 x2 x3 dx1 dx2 dx3;

```

```

syms R1 R2 L1 L2 C Uin
R1x=20; R2x=50; L1x=14e-3; L2x=7e-3; Cx=15e-6; Uinx=10;
Tstep=5e-3; wmin=1e1; wmax=1e5; % parametre pre Step a Bode
Tchirp=0.04; wminchirp=1e1; wmaxchirp=1e3; % parametre pre Chirp
Tsim=0.05 % doba simulácie v Simulinku
(experimentálne určená)
color='r'; % farba grafu b,r,y,m,c,

% Zápis rovníc obvodu
eq1 = x1*R1+L1*dx1+R1*C*dx2==Uin
eq2 = x2-L1*dx1+L2*dx3==0
eq3 = -R2*x3+R2*C*dx2-L2*dx3==0

disp('Riešenie')
[dx1,dx2,dx3] = solve(eq1,eq2,eq3,dx1,dx2,dx3)
pretty(dx1), pretty(dx2), pretty(dx3) % úprava výpisu zlomkov

%% Stavový model (prepísaný z výsledkov riešenia alg. rovníc a doplnený
výstupnou rovnicou
disp('Stavový model v symbolickom tvare:')

A=[ (-R1*R2)/(L1*R1+L1*R2) R2/(L1*R1+L1*R2) (-R1*R2)/(L1*R1+L1*R2)
-R1/(C*R1+C*R2) -1/(C*R1+C*R2) R2/(C*R1+C*R2)
(-R1*R2)/(L2*R1+L2*R2) -R2/(L2*R1+L2*R2) (-R1*R2)/(L2*R1+L2*R2) ]
b=[R2/(L1*R1+L1*R2); 1/(C*R1+C*R2); R2/(L2*R1+L2*R2)]
cT=[ (-R1*R2)/(R1+R2) (-R2)/(R1+R2) (-R1*R2)/(R1+R2) ]
d=[-R2/(R1+R2)]

%% Náhrada symb.premenných hodnotami
R1=R1x; R2=R2x; C=Cx; L1=L1x; L2=L2x; Uin=Uinx; %
disp('Stavový po dosadení hodnôt parametrov:')
A=[ (-R1*R2)/(L1*R1+L1*R2) R2/(L1*R1+L1*R2) (-R1*R2)/(L1*R1+L1*R2)
-R1/(C*R1+C*R2) -1/(C*R1+C*R2) R2/(C*R1+C*R2)
(-R1*R2)/(L2*R1+L2*R2) -R2/(L2*R1+L2*R2) (-R1*R2)/(L2*R1+L2*R2) ]
b=[R2/(L1*R1+L1*R2); 1/(C*R1+C*R2); R2/(L2*R1+L2*R2)]
cT=[ (-R1*R2)/(R1+R2) (-R2)/(R1+R2) (-R1*R2)/(R1+R2) ]
d=[R2/(R1+R2)]

%% Výstupy
disp('Výpis stavového modelu:')
printsys(A,b,cT,d)
disp('Výpis prenosovej funkcie:')
[num,den]=ss2tf(A,b,cT,d);
F=tf(num/den(end),den/den(end))
disp('Vlastné hodnoty matice A:')
format long
eig(A)
disp('Póly prenosovej funkcie:')
roots(den)
format short

%vykresľovanie priebehov
subplot(1,2,1),step(A,b,cT,d),grid on
title('Prechodová charakteristika','FontSize',16)
xlabel('\rightarrow T','FontSize',16)
ylabel('\rightarrow U_{out}/U_{in}','FontSize',14)
subplot(1,2,2),bode(A,b,cT,d),grid on
title('Frekvenčná charakteristika','fontsize',16)
xlabel('\rightarrow
\omega','FontSize',16),ylabel('\rightarrow\phi','FontSize',16)

```

```

    set(findall(gcf,'type','line'),'linewidth',2) % inštrukcia pre zmenu
    hrúbky čiar

sim('Stavovy_model_S')

```

## Príloha G: Vyšetrenie\_vplyvu\_zmeny\_parametrov.m

```

% Program pre vyšetrenie vplyvu zmeny parametrov jednotlivých prvkov
% obvodu. I. Zeman, 22.4.2022
% Simulácia a znázornenie PrCH a LFCH pri zmene parametrov obvodu
% Príklad: trojslučkový obvod - hornopriepustný LCL filter
% Zmeny veľkosti popisov osi, farby a hrúbky čiar

clear, clc, clf, format compact
syms s R1 R2 L1 L2 C Uin Uoutsim %deklarácia symbolických premenných

% Zadanie vstupných hodnôt
disp('Hornopriepustný LCL filter so záťažou - riešenie obvodu MSP')
R1x=20; R2x=50; L1x=14e-3; L2x=7e-3; Cx=15e-6; Uinx=10;
R1l=0.1*R1x; R12=10*R1x;
L1l=0.1*L1x; L12=100*L1x;
L2l=0.1*L2x; L22=100*L1x;
C1l=0.1*Cx; C12=10*Cx;

Tstep=10e-3; wmin=1; wmax=1e5; % parametre pre Step a
Bode
Tchirp=0.04; wminchirp=1e1; wmaxchirp=1e3; % parametre pre Chirp
Tsim=0.02; % doba simulácie v
Simulinku (experimentálne určená)
color='r'; % farba grafu
b,r,y,m,c,

%Nájdená TF v symbolickom tvare
F=(C*L1*L2*R2*s^3)/(R1*R2 + L1*R2*s + L2*R1*s + L1*L2*s^2 + C*L1*L2*R1*s^3
+ C*L1*L2*R2*s^3 + C*L1*R1*R2*s^2 + C*L2*R1*R2*s^2)

% Spracovanie údajov TF v symbolickom tvare pre prechod do num. MATLABu
[cit,men]=numden(F); % oddelenie polynómov čitateľa a
menovatela
cit=subs(cit,{R1,R2,L1,L2,C,Uin,Uoutsim},{R1x,R2x,L1x,L2x,Cx,Uinx,Uoutsim})
; % dosadenie hodnôt do polynómu čitateľa
men=subs(men,{R1,R2,L1,L2,C,Uin,Uoutsim},{R1x,R2x,L1x,L2x,Cx,Uinx,Uoutsim})
; % dosadenie do polynómu menovatela
b=sym2poly(cit); % b - koeficienty polynómu
čitateľa b(s)
a=sym2poly(men); % a - koeficienty polynómu
menovatela a(s)
b=double(b); % Prechod do numerickeho MATLABu
a=double(a);
F=tf(b,a) % Výsledná TF v numerickom MATLABe
F=tf(b/a(end),a/a(end)) % TF upravená pre a0=1 (normovanie
TF)

%Zmena parametra R1 za R1l
%Úprava TF v symbolickom tvare

```

```

FR11 = (C*L1*L2*R2*s^3) / (R11*R2 + L1*R2*s + L2*R11*s + L1*L2*s^2 +
C*L1*L2*R11*s^3 + C*L1*L2*R2*s^3 + C*L1*R11*R2*s^2 + C*L2*R11*R2*s^2)
[cit2,men2]=numden(FR11); % oddelenie polynómov
čitatela a menovateľa
cit2=subs(cit2,{R1,R2,L1,L2,C,Uin,Uoutsim},{R1x,R2x,L1x,L2x,Cx,Uinx,Uoutsim});
% dosadenie hodnôt do polynómu čitatela
men2=subs(men2,{R1,R2,L1,L2,C,Uin,Uoutsim},{R1x,R2x,L1x,L2x,Cx,Uinx,Uoutsim});
% dosadenie do polynómu menovateľa
b2=sym2poly(cit2); % b - koeficienty polynómu
čitatela b(s)
a2=sym2poly(men2); % a - koeficienty polynómu
menovateľa a(s)
b2=double(b2); % Prechod do numerickeho MATLABu
a2=double(a2);
FR11=tf(b2,a2) % Výsledná TF v numerickom
MATLABe
FR11=tf(b2/a2(end),a2/a2(end)) % Výsledná TF v numerickom
MATLABe

%Zmena parametra R1 za R12
%Úprava TF v symbolickom tvare
FR12=(C*L1*L2*R2*s^3)/(R12*R2 + L1*R2*s + L2*R12*s + L1*L2*s^2 +
C*L1*L2*R12*s^3 + C*L1*L2*R2*s^3 + C*L1*R12*R2*s^2 + C*L2*R12*R2*s^2)
[cit3,men3]=numden(FR12); % oddelenie polynómov
čitatela a menovateľa
cit3=subs(cit3,{R1,R2,L1,L2,C,Uin,Uoutsim},{R1x,R2x,L1x,L2x,Cx,Uinx,Uoutsim});
% dosadenie hodnôt do polynómu čitatela
men3=subs(men3,{R1,R2,L1,L2,C,Uin,Uoutsim},{R1x,R2x,L1x,L2x,Cx,Uinx,Uoutsim});
% dosadenie do polynómu menovateľa
b3=sym2poly(cit3); % b - koeficienty polynómu
čitatela b(s)
a3=sym2poly(men3); % a - koeficienty polynómu
menovateľa a(s)
b3=double(b3); % Prechod do numerickeho MATLABu
a3=double(a3);
FR12=tf(b3,a3) % Výsledná TF v numerickom
MATLABe
FR12=tf(b3/a3(end),a3/a3(end)) % Výsledná TF v numerickom
MATLABe

%PrCh a LFCh pre vplyv zmeny parametra R1
figure(1) % Vykresľovanie a popis priebehov PrCh a LFCh pre vplyv zmeny
parametra R1
subplot(1,2,1), step(FR11,Tstep,'r',F,'g',FR12,'b'),grid on,
title('PrCh pri zmene R1','FontSize',16)
xlabel('\rightarrow T','FontSize',16)
ylabel('\rightarrow U_{out}/U_{in}','FontSize',16)
legend('R1/10','R','10*R1')
ax = gca %úprava popisu osí - farba, veľkosť, bold
ax.YColor = 'k'; ax.XColor = 'k'; ax.FontSize = 12; ax.FontWeight =
'bold';
subplot(1,2,2), bode(FR11,{wmin,wmax},'r',F,'g',FR12,'b'),grid on,
title('LFCh pri zmene R1','fontSize',16)
xlabel('\rightarrow \omega','FontSize',16),ylabel('\rightarrow \phi','FontSize',16)
set(findall(gcf,'type','line'),'linewidth',1.5) % inštrukcia pre zmenu
hrúbky čiary
legend('R1/10','R1','10*R1')
ax = gca %úprava popisu osí - farba, veľkosť, bold

```

```

    ax.YColor = 'k'; ax.XColor = 'k'; ax.FontSize = 12; ax.FontWeight =
'bold';

%Zmena parametra L1 za L11
%Úprava TF v symbolickom tvare
FL11=(C*L11*L2*R2*s^3)/(R1*R2 + L11*R2*s + L2*R1*s + L11*L2*s^2 +
C*L11*L2*R1*s^3 + C*L11*L2*R2*s^3 + C*L11*R1*R2*s^2 + C*L2*R1*R2*s^2)
[cit3,men3]=numden(FL11); % oddelenie polynómov
čitateľa a menovateľa
cit3=subs(cit3,{R1,R2,L1,L2,C,Uin,Uoutsim},{R1x,R2x,L1x,L2x,Cx,Uinx,Uoutsim
}); % dosadenie hodnôt do polynómu čitateľa
men3=subs(men3,{R1,R2,L1,L2,C,Uin,Uoutsim},{R1x,R2x,L1x,L2x,Cx,Uinx,Uoutsim
}); % dosadenie do polynómu menovateľa
b3=sym2poly(cit3); % b - koeficienty polynómu
čitateľa b(s)
a3=sym2poly(men3); % a - koeficienty polynómu
menovateľa a(s)
b3=double(b3); % Prechod do numerickeho MATLABu
a3=double(a3);
FL11=tf(b3,a3) % Výsledná TF v numerickom
MATLABe
FL11=tf(b3/a3(end),a3/a3(end)) % Výsledná TF v numerickom
MATLABe

%Zmena parametra L1 za L12
%Úprava TF v symbolickom tvare
FL12=(C*L12*L2*R2*s^3)/(R1*R2 + L12*R2*s + L2*R1*s + L12*L2*s^2 +
C*L12*L2*R1*s^3 + C*L12*L2*R2*s^3 + C*L12*R1*R2*s^2 + C*L2*R1*R2*s^2)
[cit4,men4]=numden(FL12); % oddelenie polynómov
čitateľa a menovateľa
cit4=subs(cit4,{R1,R2,L1,L2,C,Uin,Uoutsim},{R1x,R2x,L1x,L2x,Cx,Uinx,Uoutsim
}); % dosadenie hodnôt do polynómu čitateľa
men4=subs(men4,{R1,R2,L1,L2,C,Uin,Uoutsim},{R1x,R2x,L1x,L2x,Cx,Uinx,Uoutsim
}); % dosadenie do polynómu menovateľa
b4=sym2poly(cit4); % b - koeficienty polynómu
čitateľa b(s)
a4=sym2poly(men4); % a - koeficienty polynómu
menovateľa a(s)
b4=double(b4); % Prechod do numerickeho MATLABu
a4=double(a4);
FL12=tf(b4,a4) % Výsledná TF v numerickom
MATLABe
FL12=tf(b4/a4(end),a4/a4(end)) % Výsledná TF v numerickom
MATLABe

%PrCh a LFCh pre vplyv zmeny parametra L1
figure(2) % Vykresľovanie a popis priebehov PrCh a LFCh pre vplyv zmeny
parametra L1
subplot(1,2,1), step(FL11,Tstep,'r',F,'g',FL12,'b'),grid on,
    title('PrCh pri zmene L1','FontSize',16)
    xlabel('\rightarrow T','FontSize',16)
    ylabel('\rightarrow U_{out}/U_{in}','FontSize',16)
    legend('L1/10','L1','100*L1')
    ax = gca %úprava popisu osí - farba, veľkosť, bold
    ax.YColor = 'k'; ax.XColor = 'k'; ax.FontSize = 12; ax.FontWeight =
'bold';
subplot(1,2,2), bode(FL11,{wmin,wmax},'r',F,'g',FL12,'b'),grid on,
    title('LFCh pri zmene L1','fontSize',16)
    xlabel('\rightarrow \omega','FontSize',16),ylabel('\rightarrow \phi','FontSize',16)

```



```

    set(findall(gcf,'type','line'),'linewidth',1.5) % inštrukcia pre zmenu
hrúbky čiary
    legend('L1/10','L1','100*L1')
    ax = gca %úprava popisu osí - farba, veľkosť, bold
    ax.YColor = 'k'; ax.XColor = 'k'; ax.FontSize = 12; ax.FontWeight =
'bold';

%Zmena parametra C za C11
%Úprava TF v symbolickom tvare
FC11=(C11*L1*L2*R2*s^3)/(R1*R2 + L1*R2*s + L2*R1*s + L1*L2*s^2 +
C11*L1*L2*R1*s^3 + C11*L1*L2*R2*s^3 + C11*L1*R1*R2*s^2 + C11*L2*R1*R2*s^2)
[cit5,men5]=numden(FC11); % oddelenie polynómov
čitatela a menovateľa
cit5=subs(cit5,{R1,R2,L1,L2,C,Uin,Uoutsim},{R1x,R2x,L1x,L2x,Cx,Uinx,Uoutsim
}); % dosadenie hodnôt do polynómu čitatela
men5=subs(men5,{R1,R2,L1,L2,C,Uin,Uoutsim},{R1x,R2x,L1x,L2x,Cx,Uinx,Uoutsim
}); % dosadenie do polynómu menovateľa
b5=sym2poly(cit5); % b - koeficienty polynómu
čitatela b(s)
a5=sym2poly(men5); % a - koeficienty polynómu
menovateľa a(s)
b5=double(b5); % Prechod do numerickeho MATLABu
a5=double(a5);
FC11=tf(b5,a5) % Výsledná TF v numerickom
MATLABe
FC11=tf(b5/a5(end),a5/a5(end)) % Výsledná TF v numerickom
MATLABe

%Zmena parametra C za C12
%Úprava TF v symbolickom tvare
FC12=(C12*L1*L2*R2*s^3)/(R1*R2 + L1*R2*s + L2*R1*s + L1*L2*s^2 +
C12*L1*L2*R1*s^3 + C12*L1*L2*R2*s^3 + C12*L1*R1*R2*s^2 + C12*L2*R1*R2*s^2)
[cit6,men6]=numden(FC12); % oddelenie polynómov
čitatela a menovateľa
cit6=subs(cit6,{R1,R2,L1,L2,C,Uin,Uoutsim},{R1x,R2x,L1x,L2x,Cx,Uinx,Uoutsim
}); % dosadenie hodnôt do polynómu čitatela
men6=subs(men6,{R1,R2,L1,L2,C,Uin,Uoutsim},{R1x,R2x,L1x,L2x,Cx,Uinx,Uoutsim
}); % dosadenie do polynómu menovateľa
b6=sym2poly(cit6); % b - koeficienty polynómu
čitatela b(s)
a6=sym2poly(men6); % a - koeficienty polynómu
menovateľa a(s)
b6=double(b6); % Prechod do numerickeho MATLABu
a6=double(a6);
FC12=tf(b6,a6) % Výsledná TF v numerickom
MATLABe
FC12=tf(b6/a6(end),a6/a6(end)) % Výsledná TF v numerickom
MATLABe

%PrCh a LFCh pre vplyv zmeny parametra C
figure(3) % Vykresľovanie a popis priebehov PrCh a LFCh pre vplyv zmeny
parametra C
subplot(1,2,1), step(FC11,Tstep,'r',F,'g',FC12,'b'),grid on,
title('PrCh pri zmene C','FontSize',16)
xlabel('\rightarrow T','FontSize',16)
ylabel('\rightarrow U_{out}/U_{in}','FontSize',16)
legend('C/10','C','10*C')
ax = gca %úprava popisu osí - farba, veľkosť, bold

```



```

    ax.YColor = 'k'; ax.XColor = 'k'; ax.FontSize = 12; ax.FontWeight =
'bold';
subplot(1,2,2), bode(FC11,{wmin,wmax},'r',F,'g',FC12,'b'),grid on,
    title('LFCh pri zmene C','fontsize',16)
    xlabel('\rightarrow
\omega','FontSize',16),ylabel('\rightarrow\phi','FontSize',16)
    set(findall(gcf,'type','line'),'linewidth',1.5) % inštrukcia pre zmenu
hrúbky čiary (2 body)
    legend('C/10','C','10*C')
    ax = gca %úprava popisu osí - farba, veľkosť, bold
    ax.YColor = 'k'; ax.XColor = 'k'; ax.FontSize = 12; ax.FontWeight =
'bold';

%Zmena parametra L2 za L21
%Úprava TF v symbolickom tvare
FL21=(C*L1*L21*R2*s^3)/(R1*R2 + L1*R2*s + L21*R1*s + L1*L21*s^2 +
C*L1*L21*R1*s^3 + C*L1*L21*R2*s^3 + C*L1*R1*R2*s^2 + C*L21*R1*R2*s^2)
[cit7,men7]=numden(FL21); % oddelenie polynómov
čitatela a menovateľa
cit7=subs(cit7,{R1,R2,L1,L2,C,Uin,Uoutsim},{R1x,R2x,L1x,L2x,Cx,Uinx,Uoutsim
}); % dosadenie hodnôt do polynómu čitatela
men7=subs(men7,{R1,R2,L1,L2,C,Uin,Uoutsim},{R1x,R2x,L1x,L2x,Cx,Uinx,Uoutsim
}); % dosadenie do polynómu menovateľa
b7=sym2poly(cit7); % b - koeficienty polynómu
čitatela b(s)
a7=sym2poly(men7); % a - koeficienty polynómu
menovateľa a(s)
b7=double(b7); % Prechod do numerickeho MATLABu
a7=double(a7);
FL21=tf(b7,a7) % Výsledná TF v numerickom
MATLABe
FL21=tf(b7/a7(end),a7/a7(end)) % Výsledná TF v numerickom
MATLABe

%Zmena parametra L2 za L22
%Úprava TF v symbolickom tvare
FL22=(C*L1*L22*R2*s^3)/(R1*R2 + L1*R2*s + L22*R1*s + L1*L22*s^2 +
C*L1*L22*R1*s^3 + C*L1*L22*R2*s^3 + C*L1*R1*R2*s^2 + C*L22*R1*R2*s^2)
[cit8,men8]=numden(FL22); % oddelenie polynómov
čitatela a menovateľa
cit8=subs(cit8,{R1,R2,L1,L2,C,Uin,Uoutsim},{R1x,R2x,L1x,L2x,Cx,Uinx,Uoutsim
}); % dosadenie hodnôt do polynómu čitatela
men8=subs(men8,{R1,R2,L1,L2,C,Uin,Uoutsim},{R1x,R2x,L1x,L2x,Cx,Uinx,Uoutsim
}); % dosadenie do polynómu menovateľa
b8=sym2poly(cit8); % b - koeficienty polynómu
čitatela b(s)
a8=sym2poly(men8); % a - koeficienty polynómu
menovateľa a(s)
b8=double(b8); % Prechod do numerickeho MATLABu
a8=double(a8);
FL22=tf(b8,a8) % Výsledná TF v numerickom
MATLABe
FL22=tf(b8/a8(end),a8/a8(end)) % Výsledná TF v numerickom
MATLABe

%PrCh a LFCh pre vplyv zmeny parametra L2
figure(4) % Vykresľovanie a popis priebehov PrCh a LFCh pre vplyv zmeny
parametra L2
subplot(1,2,1), step(FL21,Tstep,'r',F,'g',FL22,'b'),grid on,

```

```

title('PrCh pri zmene L2','FontSize',16)
xlabel('\rightarrow T','FontSize',16)
ylabel('\rightarrow U_{out}/U_{in}','FontSize',16)
legend('L2/10','L2','10*L2')
ax = gca %úprava popisu osí - farba, veľkosť, bold
ax.YColor = 'k'; ax.XColor = 'k'; ax.FontSize = 12; ax.FontWeight =
'bold';
subplot(1,2,2), bode(FL21,{wmin,wmax},'r',F,'g',FL22,'b'),grid on,
title('LFCh pri zmene L2','fontSize',16)
xlabel('\rightarrow
\omega','FontSize',16),ylabel('\rightarrow\phi','FontSize',16)
set(findall(gcf,'type','line'),'linewidth',1.5) % inštrukcia pre zmenu
hrúbky čiary (2 body)
legend('L2/10','L2','10*L2')
ax = gca %úprava popisu osí - farba, veľkosť, bold
ax.YColor = 'k'; ax.XColor = 'k'; ax.FontSize = 12; ax.FontWeight =
'bold';

```

## Príloha H: Vyšetrenie\_zmeny\_fazoveho\_posunu\_pri\_zmene\_frekvencie.m

```

% Program pre vyšetrenie zmeny fázového posunu pri zmene frekvencie. I.
Zeman, 24.4.2022
% Znázornenie PrCH a znázornenie LFCH viacslučkového obvodu pri 3 rôznych
frekvenciách
% Príklad: trojslúčkový obvod - hornopriepustný LCL filter
% Zmeny veľkosti popisov osí, farby a hrúbky čiary

clear, clc, clf, format compact
syms s R1 R2 L1 L2 C Uin Uoutsim %deklarácia symbolických premenných

% Zadanie vstupných hodnôt
disp('Hornopriepustný LCL filter so záťažou - riešenie obvodu MSP')
R1x=20; R2x=50; L1x=14e-3; L2x=7e-3; Cx=15e-6; Uinx=10;
Tstep=10e-3; wmin=1; wmax=1e5; % parametre pre Step a
Bode

%Nájdená TF v symbolickom tvare
F=(C*L1*L2*R2*s^3)/(R1*R2 + L1*R2*s + L2*R1*s + L1*L2*s^2 + C*L1*L2*R1*s^3
+ C*L1*L2*R2*s^3 + C*L1*R1*R2*s^2 + C*L2*R1*R2*s^2)

% Spracovanie údajov TF v symbolickom tvare pre prechod do num. MATLABu
[cit,men]=numden(F); % oddelenie polynómov čitateľa a
menovatela
cit=subs(cit,{R1,R2,L1,L2,C,Uin,Uoutsim},{R1x,R2x,L1x,L2x,Cx,Uinx,Uoutsim})
; % dosadenie hodnôt do polynómu čitateľa
men=subs(men,{R1,R2,L1,L2,C,Uinx,Uoutsim},{R1x,R2x,L1x,L2x,Cx,Uinx,Uoutsim})
); % dosadenie do polynómu menovatela
b=sym2poly(cit); % b - koeficienty polynómu
čitateľa b(s)
a=sym2poly(men); % a - koeficienty polynómu
menovatela a(s)
b=double(b); % Prechod do numerickeho MATLABu
a=double(a);
F=tf(b,a) % Výsledná TF v numerickeho MATLABe
F=tf(b/a(end),a/a(end)) % TF upravená pre a0=1 (normovanie
TF)

figure(1) % Vyšetrovanie fázového posunu pri rôznych frekvenciách
color='r';

```

```

n=3; % počet zobrazených periód ~ napätia
subplot(1,2,1), bode(F), grid % Kreslenie LFCh
title('Frekvenčná charakteristika','fontsize',16)
xlabel('\rightarrow
\omega','FontSize',14),ylabel('\rightarrow\phi','FontSize',14)
ax = gca %úprava popisu osí - farba, veľkosť, bold
ax.YColor = 'k'; ax.XColor = 'k'; ax.FontSize = 12; ax.FontWeight =
'bold';

%frekvencia w1
subplot(3,2,2)
set(findall(gcf,'type','line'),'linewidth',1.5) % inštrukcia pre zmenu
hrúbky čiary
w1=1e3; T1=2*pi/w1; Tkon1=n*T1; % pre zvolenú w1: doba periody T1,doba
kon.
Tkon1
[u1,t1]=gensig('sin',T1,Tkon1,1e-5);% doba periody, trvanie
signálu,vzorkovanie
lsim (F,u1,t1),grid
w1str=['w1 = ',num2str(w1),' rad/s']; w1text=join(w1str); title
(w1text)
ax = gca %úprava popisu osí - farba, veľkosť, bold
ax.YColor = 'k'; ax.XColor = 'k'; ax.FontSize = 12; ax.FontWeight =
'bold';

%frekvencia w2
subplot(3,2,4)
set(findall(gcf,'type','line'),'linewidth',1.5) % inštrukcia pre zmenu
hrúbky čiar
w2=5e3; T2=2*pi/w2; Tkon2=n*T2; % pre zvolenú w2: doba periody T2,
Tkon2
[u2,t2]=gensig('sin',T2,Tkon2,1e-5); % doba periody, trvanie
signálu,vzorkovanie
lsim (F,u2,t2), grid
w2str=['w2 = ',num2str(w2),' rad/s']; w2text=join(w2str); title
(w2text)
ax = gca %úprava popisu osí - farba, veľkosť, bold
ax.YColor = 'k'; ax.XColor = 'k'; ax.FontSize = 12; ax.FontWeight =
'bold';

%frekvencia w3
subplot(3,2,6)
w3=15e3 ; T3=2*pi/w3; Tkon3=n*T3; % pre zvolenú w3: doba periody T3,
Tkon3
[u3,t3]=gensig('sin',T3,Tkon3,1e-6); % doba periody, trvanie
signálu,vzorkovanie
lsim (F,u3,t3), grid,
w3str=['w3 = ',num2str(w3),' rad/s']; w3text=join(w3str); title
(w3text)
set(findall(gcf,'type','line'),'linewidth',1.5) % inštrukcia pre zmenu
hrúbky čiar
ax = gca %úprava popisu osí - farba, veľkosť, bold
ax.YColor = 'k'; ax.XColor = 'k'; ax.FontSize = 12; ax.FontWeight =
'bold';

```