

# OBSAH

|   |           |
|---|-----------|
| <b>OBSAH</b> .....  | <b>1</b>  |
| <b>ÚVOD</b> .....   | <b>3</b>  |
| <b>1 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI KMITOČTOVÝCH FILTRŮ</b> .....                                  | <b>4</b>  |
| 1.1 KMITOČTOVÉ FILTRY A JEJICH POUŽITÍ .....  | 4         |
| 1.2 ZÁKLADNÍ TYPY FILTRŮ .....  | 4         |
| 1.3 TYPY FILTRŮ DLE POUŽITÉ APROXIMACE.....   | 6         |
| 1.4 PRINCIP FILTRŮ.....   | 7         |
| 1.5 PASIVNÍ FILTRY PRVNÍHO ŘÁDU .....   | 7         |
| 1.6 PASIVNÍ FILTRY DRUHÉHO ŘÁDU .....   | 8         |
| 1.7 ÚČEL A POUŽITÍ FILTRŮ RLC VYŠŠÍCH ŘÁDŮ.....   | 9         |
| 1.8 OBECNÝ POSTUP PŘI NÁVRHU KMITOČTOVÝCH FILTRŮ .....                                  | 9         |
| 1.9 EKVIVALENTNÍ ÚPRAVY OBVODŮ.....   | 10        |
| 1.10 FILTRY ARC 1. A 2. ŘÁDU .....  | 11        |
| 1.10.1 Základní principy funkce filtrů ARC .....  | 11        |
| 1.10.2 Obvody ARC s přenosovou funkcí 1. řádu .....                                     | 11        |
| 1.10.3 Obvody ARC s přenosovou funkcí 2. řádu .....                                     | 12        |
| 1.10.4 Základní vlastnosti z hlediska hodnot $F_0$ a $Q$ .....                          | 12        |
| <b>2 ZVLÁŠTNÍ TYPY A APLIKACE KMITOČTOVÝCH FILTRŮ</b> .....                             | <b>14</b> |
| 2.1 PŘELADITELNÉ A ŘÍZENÉ FILTRY .....  | 14        |
| 2.2 FILTRY 2. ŘÁDU S NASTAVITELNÝMI PARAMETRY .....                                     | 14        |
| 2.3 MOŽNOSTI REALIZACE SOUBĚŽNÉ ZMĚNY ODPORŮ.....                                       | 15        |
| 2.3.1 Digitální potenciometr.....   | 16        |
| 2.4 PŘELADITELNÉ FILTRY VYŠŠÍCH ŘÁDŮ .....  | 17        |
| <b>3 ACKERBERGOVO – MOSSBERGOVO ZAPOJENÍ FILTRU 2. ŘÁDU</b> .....                       | <b>18</b> |
| 3.1 POPIS NÁVRHU UNIVERZÁLNÍHO FILTRU 2.ŘÁDU.....                                       | 19        |
| 3.2 REÁLNÝ NÁVRH A SIMULACE V PROGRAMU SPICE.....                                       | 22        |
| 3.3 ZHODNOCENÍ PRŮBĚHŮ FILTRU ACKERBERG – MOSSBERG .....                                | 25        |
| 3.4 ELEKTRONICKÉ LADĚNÍ AKTIVNÍCH FILTRŮ TYPU ACKERBERG –<br>MOSSBERG .....             | 26        |
| 3.4.1 Simulace obvodu v programu Spice.....   | 26        |
| 3.5 UNIVERSÁLNÍ DIGITÁLNĚ ŘÍZENÝ FILTR.....   | 50        |
| <b>4 FINÁLNÍ REALIZACE OBVODU</b> .....   | <b>53</b> |
| 4.1 NÁVRH A REALIZACE DESKY OBVODU FILTRU ACKERBERG -<br>MOSSBERG V PROGRAMU EAGLE..... | 53        |
| 4.2 OSAZENÍ DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ VHODNÝMI SOUČÁSTKAMI .....                             | 55        |
| 4.3 NÁVRH A REALIZACE DESKY PRO DIGITÁLNÍ ŘÍZENÍ FILTRU A-M<br>V PROGRAMU EAGLE .....   | 57        |
| 4.4 SEZNAM POUŽITÝCH SOUČÁSTEK .....  | 60        |
| <b>5 OVĚŘENÍ CHOVÁNÍ A VLASTNOSTÍ OBVODU</b> .....                                      | <b>61</b> |
| 5.1 VLASTNOSTI OBVODU S ANALOGOVÝM ŘÍZENÍM .....  | 61        |
| 5.1.1 Testování vlastností obvodu s OZ TL072 .....                                      | 62        |
| 5.1.2 Testování vlastností obvodu s OZ LM318.....                                       | 63        |
| 5.1.3 Srovnání parametrů filtru s digitálním a analogovým řízením.....                  | 70        |
| 5.1.4 Zobrazení průběhů pro filtr Ackerberg – Mossberg pomocí osciloskopu.....          | 70        |
| 5.1.5 Ukázka programu pro mikroprocesor ATMEGA32 .....                                  | 72        |
| <b>ZÁVĚR</b> .....  | <b>73</b> |

|                            |           |
|----------------------------|-----------|
| <b>LITERATURA .....</b>    | <b>75</b> |
| <b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b> | <b>76</b> |
| <b>PŘÍLOHY .....</b>       | <b>79</b> |

# ÚVOD

Diplomová práce s názvem „*Adaptivní kmitočtový filtr*“ se zabývá návrhem a realizací universálního přeladitelného kmitočtového filtru.

Kmitočtové filtry jsou lineární elektrické obvody, jejichž hlavním úkolem je propouštět harmonické složky spektra zpracovávaných signálů v určitém pásmu kmitočtů, které nazýváme propustné pásmo. Mimo propustné pásmo jsou harmonické složky naopak silně utlumovány- tzv. nepropustné pásmo.

Ve své diplomové práci jsem si kladl za cíl vhodně popsat vlastnosti kmitočtových filtrů a to zejména vlastnosti selektivních funkčních bloků 1. a 2. řádu ARC filtrů. Dále jsem také uvedl přehled možností analogového a číslicového řízení jejich parametrů. U selektivního bloku 2. řádu jsem se zaměřil na univerzální funkční blok realizující více typů přenosových funkcí. Na základě teoretického rozboru jsem zrealizoval funkční blok a ověřil jsem jeho skutečné parametry.

Diplomová práce je rozdělena do čtyř větších celků. První část se věnovala obecné charakteristice a vlastnostem filtrů.

Druhá část se zabývá řízením kmitočtových filtrů a s tím spjatou problematikou. V této části jsem také popsal různé možnosti řízení a přeladování kmitočtových filtrů.

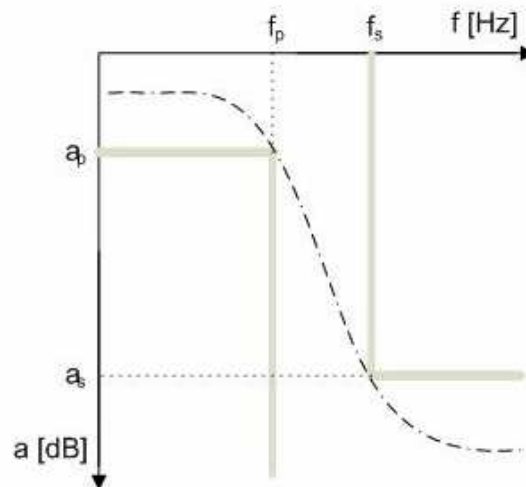
Ve třetí části jsem se věnoval návrhu universálního funkčního bloku typu Ackerberg – Mossberg a simulacemi tohoto filtru.

V poslední části jsem zrealizoval tento universální funkční blok s vhodným řízením a ověřil jsem jeho skutečné vlastnosti.

# 1 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI KMITOČTOVÝCH FILTRŮ

## 1.1 KMITOČTOVÉ FILTRY A JEJICH POUŽITÍ

Kmitočtové filtry jsou dvojbrany (převážně lineární), které propustí (bez a nebo s malým útlumem) harmonické složky spektra zpracovávaných signálů v určitém pásmu kmitočtů, které nazýváme propustné pásmo. Mimo propustné pásmo jsou harmonické složky naopak silně utlumovány – tzv. nepropustné pásmo. Tyto vlastnosti se nejčastěji vyjadřují modulovou (amplitudovou) charakteristikou. Průchod signálu filtrem vede nejčastěji k časovému zpoždění signálu, nebo-li k fázovým posuvům (zpoždění) procházejících harmonických kmitočtových složek signálu. Tento vliv vyjadřujeme fázovou kmitočtovou charakteristikou.



**Obr.1.1** Příklad závislosti modulové kmitočtové charakteristiky filtru typu dolní propust

Kmitočtové filtry jsou součástí mnoha obvodů a systémů. Např. v radiotechnice najde největší využití pásmová propust pro výběr přijímaných signálů, (vstupní obvody přijímačů, mezifrekvenční filtry), také se ovšem neztratí horní a dolní propust, které nacházejí uplatnění v kmitočtových výhybkách pro rozdělení kmitočtových pásem v předzesilovačích atd. Zadrž se např. používá pro potlačení rušících signálů. Kromě radiotechniky nacházejí filtry uplatnění i v elektroakustice v oblasti měřicí techniky v silnoproudé elektrotechnice. Takto bychom mohli jmenovat další odvětví.

Kmitočtové filtry můžeme v praxi realizovat mnoha odlišnými způsoby, které do určité míry určují i některé podstatné provozní vlastnosti filtru. Způsoby realizací lze rozdělit orientačně do tří hlavních skupin:

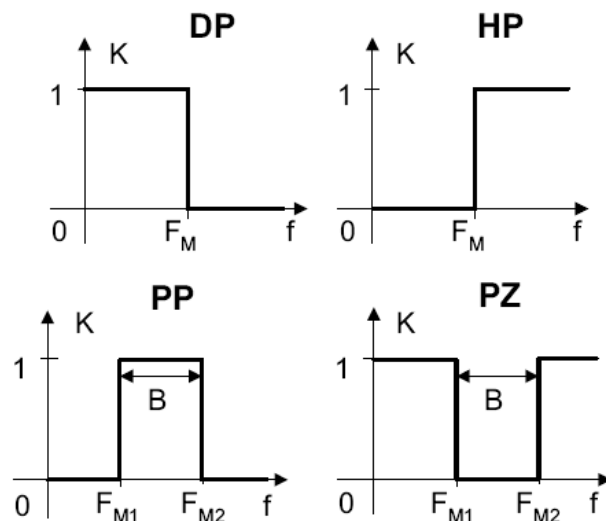
- realizace z diskrétních prvků (odpory, kondenzátory, cívky, OZ, ..., )
- realizace v podobě integrovaného bloku (menší, levnější, nelze upravit, ..., )
- realizace s číslicovými filtry

## 1.2 ZÁKLADNÍ TYPY FILTRŮ

Rozdělení filtrů lze provést z různých hledisek a vlastností, nejdůležitějším dělením je však dle přenášeného kmitočtového spektra – které dělíme do tří základních skupin:

- a) selektivní filtry
- b) fázovací (zpožďovací) obvody
- c) korekční filtry

- a) **selektivní filtry** – tyto filtry mají za úkol potlačení přenosu kmitočtových složek signálu v nepropustném pásmu. Podle rozložení propustného a nepropustného pásma to jsou:
- **dolní propust:** propouští složky signálu s kmitočty nižšími než mezní kmitočet
  - **horní propust:** propouští složky signálu s kmitočtem vyšším než mezní kmitočet
  - **pásmová propust:** propouští složky signálu mezi mezním dolním a horním kmitočtem
  - **pásmová zadrž:** nepropouští složky signálu mezi mezním dolním a horním kmitočtem



**Obr.1.2** Ideální modulové charakteristiky základních typů selektivních filtrů

Dle použitých prvků dělíme:

- pasivní filtry RC (RLC)
- pasivní filtry LC
- aktivní filtry RC
- filtry RC s funkčními bloky
- filtry se syntetickými prvky
- filtry se spínanými kapacitami
- filtry s povrchovou vlnou
- filtry s piezoelektrickými rezonátory
- a další

- b) **fázovací (zpožd'ovací) obvody** – pro tyto obvody je nejdůležitější kmitočtová závislá fázová charakteristika, jejich modulová charakteristika je kmitočtově nezávislá
- c) **korekční filtry** – hlavním cílem těchto filtrů je taková kmitočtová závislost přenosu  $K_2$ , která koriguje přenos některých bloků přenosového řetězce  $K_1$  tak, aby modul přenosu celé soustavy  $K$  byl konstantní

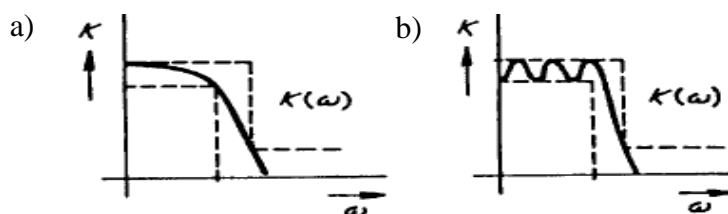
### 1.3 TYPY FILTRŮ DLE POUŽITÉ APROXIMACE

Při návrhu filtrů vycházíme ze zadaného tolerančního schématu (pole). Pro zadané toleranční pole vybereme určitou aproximující funkci, která musí probíhat ve vymezeném kanálu. Podle způsobu aproximace pak rozlišujeme různé typy filtrů. Nejčastěji se lze setkat s následujícími druhy standardních aproximací:

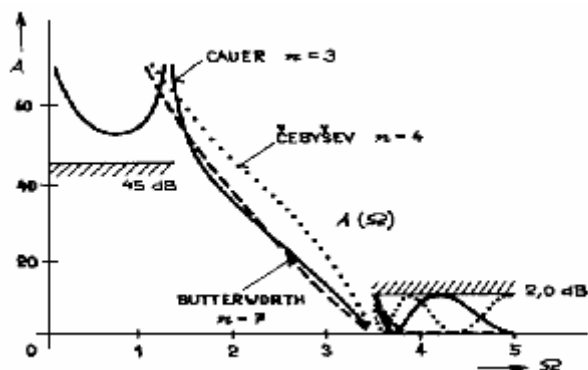
- Besselova: (často uváděná též jako Thomsonova) a strmější Butterworthova aproximace jsou v propustném pásmu monotónní a ploché
- Čebyševova: aproximace má v propustném pásmu modulovou charakteristiku zvlněnou – izoextremální
- Cauerova: aproximace je kombinací Čebyševovy a inverzní Čebyševovy aproximace
- Feistelova-Unbehauenova: obdobně strmější inverzní Čebyševova aproximace jsou v propustném pásmu monotónní a ploché a v nepropustném pásmu mají zvlnění s výraznými nulami přenosu s určitým minimálním potlačením

Další typy aproximací:

- Gaussova aproximace
- Legendrova aproximace
- Tranzitní Besselova-Butterworthova aproximace
- Tranzitní aproximace TICFU
- Kasteleinova aproximace



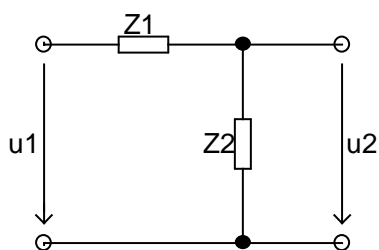
**Obr.1.3** Kmitočtové charakteristiky filtrů: a) Butterworthův filtr, b) Čebyševův filtr



**Obr.1.4** Porovnání typů aproximací při různých řádech horních propustí

### 1.4 PRINCIP FILTRŮ

Základním principiálním podobvodem filtrů, nazývaným někdy také půlčlánkem, je kmitočtově závislý dělič, jehož přenos bude kmitočtově závislý, je-li alespoň jedna z impedancí kmitočtově závislá.



$$K(\omega) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (1.1)$$

**Obr.1.5** Kmitočtově závislý dělič napětí

### 1.5 PASIVNÍ FILTRY PRVNÍHO ŘÁDU

Filtry s přenosovou funkcí 1. řádu obsahují mimo rezistor R obvykle jeden akumulční prvek. Filtry 1. řádu realizují pouze filtry typu dolní a horní propusti, korekční a fázovací články. Tyto filtry nerealizují žádný typ standardní aproximace a mají také omezenou dosažitelnou hodnotu činitele jakosti.

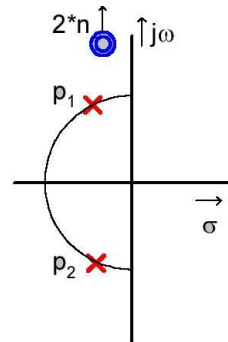
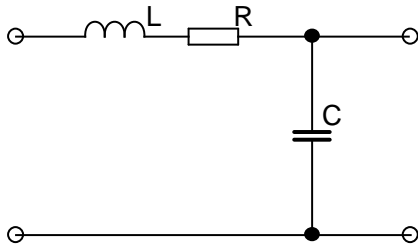


**Obr.1.6** Filtry typu dolní a horní propust

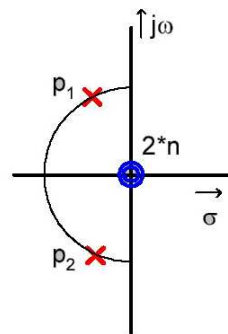
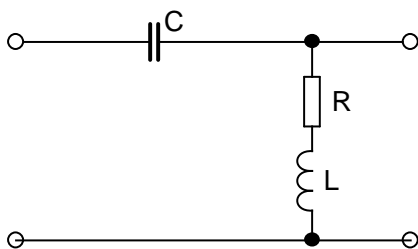
## 1.6 PASIVNÍ FILTRY DRUHÉHO ŘÁDU

Tyto filtry musí obsahovat při realizaci s diskrétními prvky mimo rezistoru nejméně dva akumulací prvky. Nejčastěji je využívána kombinace prvků R,L,C. Předností těchto filtrů je, že umožňují realizaci všech základních typů filtrů. Filtry 2. řádu jsou velmi často využívány pro různé méně náročné aplikace a jako základní stavební bloky pro filtry vyšších řádů.

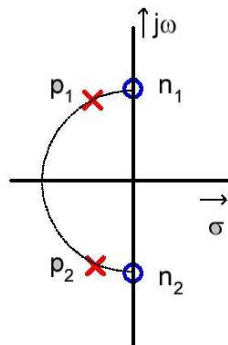
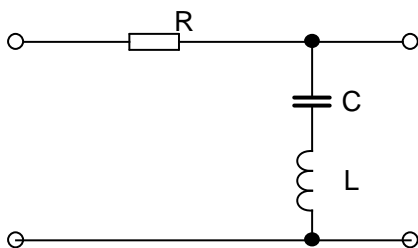
### a) dolní propust (DP)



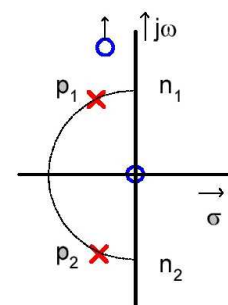
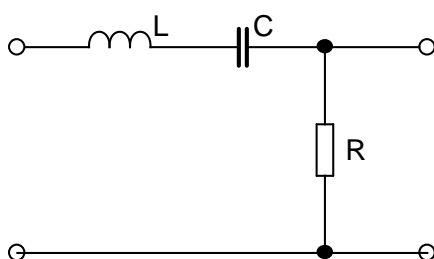
### b) horní propust (HP)



### c) pásmová zadrž (PZ)



### d) pásmová propust (PP)

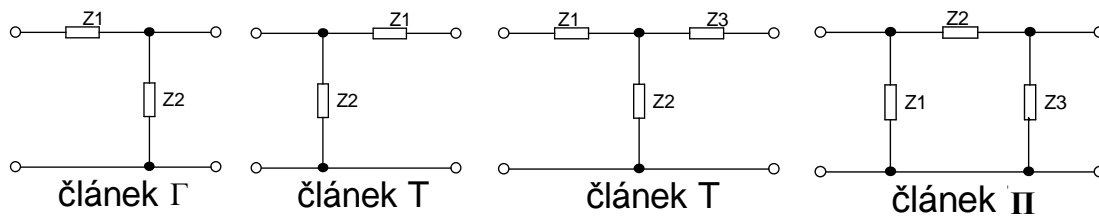


**Obr.1.7** Pasivní filtry druhého řádu, se zobrazením nul a pólů [2]

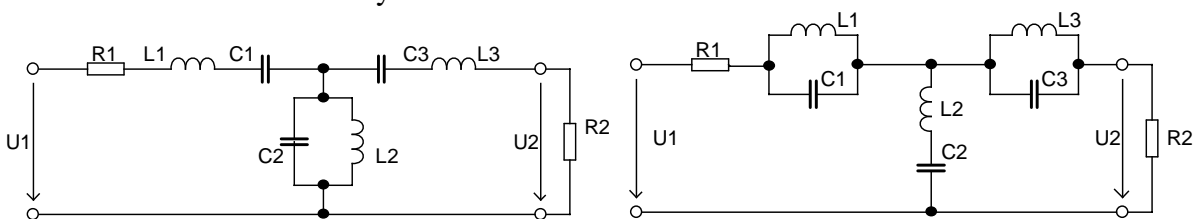
## 1.7 ÚČEL A POUŽITÍ FILTRŮ RLC VYŠŠÍCH ŘÁDŮ

Obecně platí, že strmost filtru je dána jeho řádem ( $n \cdot 20 \text{ dB/dek}$ ). Důraznější oddělení propustného a nepropustného pásma dosáhneme u filtrů RLC vyšších řádů, které můžeme získat jednoduše kaskádním nebo složitým řazením již uvedených obvodů 1. a 2. řádů nebo jiných podobvodů. Syntéza poté není jednoduchá, protože podobvody se vzájemně ovlivňují. Nejčastěji se tyto filtry vyskytují ve formě příčkové struktury, vhodně složené z článků LC a zakončené stejnými zatěžovacími rezistory, někdy tato shodnost není možná nebo požadována.

Charakteristickými rysy filtrů RLC jsou poměrně jednoduchý návrh z hodnot tabelovaných pro standardní aproximace, jednoduchá realizace a také velmi malé citlivosti příčkových struktur filtrů na změny parametrů prvků, které umožnily jejich široké použití v praxi. Filtry RLC jsou používány jako konečná realizace pro vysokofrekvenční pásma, ale často jsou využívány i jako prototypy RLC pro jiné formy realizací (filtry ARC, ASC, krystalové, mikrovlnné apod.). Pojem prototyp RLC se používá pro označení základního normovaného filtru typu dolní propust, který je východiskem jak pro návrh konečných pasivních realizací filtrů RLC všech základních typů, tak i pro návrh již zmíněných filtrů jiných typů realizací.



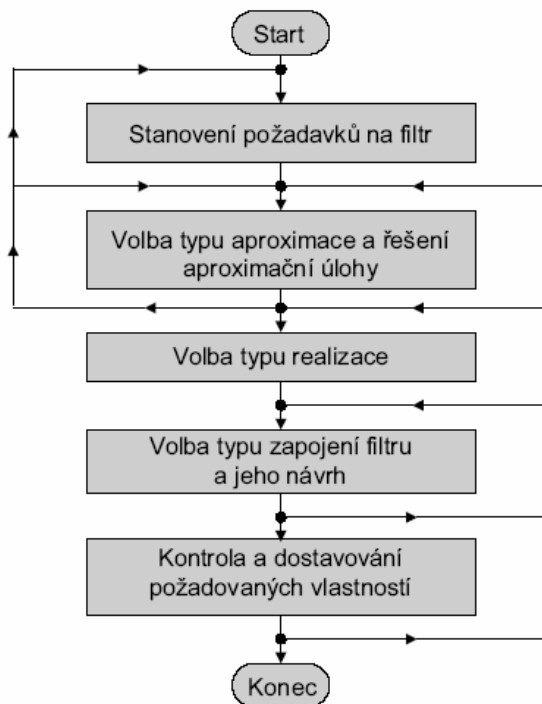
**Obr.1.8** Základní články RLC filtrů



**Obr.1.9** Příklady RLC filtrů: PP 6.řádu a PZ 6.řádu

## 1.8 OBECNÝ POSTUP PŘI NÁVRHU KMITOČTOVÝCH FILTRŮ

Návrh kmitočtových filtrů může být značně různorodý, počínaje triviálním použitím standardního integrovaného filtru pro standardní úlohy, až po velmi komplikovaný postup. Obecně lze, ale postup při návrhu filtru vyjádřit tímto diagramem, který je patrný na obr.1.10. Je zřejmé, že některé kroky návrhu (typ aproximace, realizace), můžeme řešit při znalosti jednoduchým rozhodnutím. Ovšem některé výpočetní návrhy, mohou být složité a značně náročné. Na obr.1.10 je patrná přímá posloupnost kroků návrhu, např. při jednoduchém standardním řešení [1]. Je ale běžné, že při složitějších řešeních nestandardních problémů se musíme při návrhu vracet, protože zjistíme, že řešení problému v předchozím kroku není dobře realizovatelné v následujícím kroku (vysoký činitel jakosti cívek atd.). Proto se musíme vrátit a změnit řešení na jinou volbu.



**Obr.1.10** Diagram možného postupu při návrhu kmitočtových filtrů

## 1.9 EKVIVALENTNÍ ÚPRAVY OBVODŮ

V závěrečné etapě návrhu filtru obvykle optimalizujeme výsledné hodnoty jednotlivých stavebních prvků filtru z hlediska jeho technické realizace. Často je potřeba optimalizovat i výslednou strukturu předběžně navrženého obvodu RLC filtru. Nejčastěji se tyto úpravy provádějí u pásmových propustí (vyšší kmitočty- parazitní kapacity cívek, při úzkopásmových propustí - zvětšení rozsahu hodnot stavebních prvků ).

### Cíle ekvivalentních úprav

- Eliminace nerealizovatelných součástí (záporné kapacity, ideální transformátory... )
- Minimalizace počtu stavebních prvků (např. induktorů)
- Úprava hodnot prvků na vhodnou velikost
  - Zmenšení hodnot kapacitorů nebo induktorů
  - Minimalizace poměru maximálních, minimálních hodnot prvků
  - Minimalizace souhrnné hodnoty některých prvků
  - Změna zatěžovací impedance
- Optimalizace struktury z hlediska snadné realizovatelnosti
  - vytvoření struktury realizovatelné např. piezorezonátory
  - vytvoření struktury eliminující parazitní prvky
  - paralelní kapacity k induktorům v příčkovém článku pro absorpci parazitní kapacity cívek

- kapacitor mezi živou svorkou podélného LC článku a zem
  - rozdělení laděných obvodů z hlediska minimalizace citlivosti ke změnám zátěže
- Optimalizace struktury z hlediska minimalizace citlivostí

#### Možnosti provedení ekvivalentních úprav

- Dvojpólové transformace
- Trojpólové transformace
- Dvojbranové transformace
  - Transformace filtru na symetrické zapojení
  - Transformace s využitím Bartletovy věty
- Nortonovy transformace

## 1.10 FILTRY ARC 1. A 2. ŘÁDU

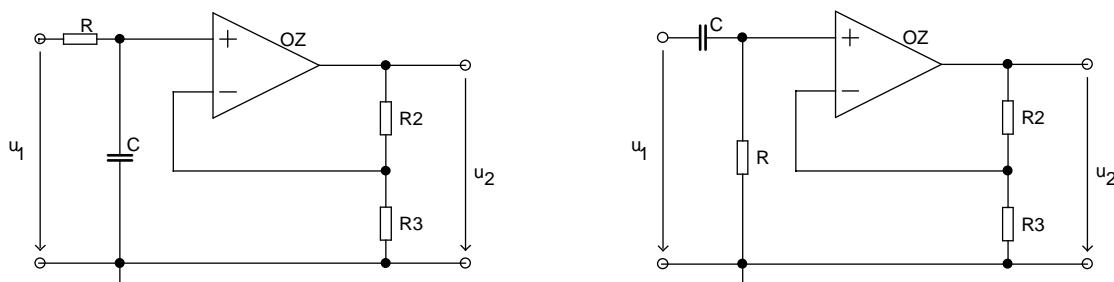
### 1.10.1 Základní principy funkce filtrů ARC

Při realizaci filtrů RLC pro nízké kmitočty nastávají největší problémy s kvalitou, rozměry a cenou cívek. Tedy pro nízké kmitočty se filtry RLC nahrazují aktivními filtry ARC. Princip spočívá v náhradě cívky pomocí zapojení aktivního prvku se dvěma rezistory a kapacitorem. Tyto filtry mají velké množství různých variant zapojení.

Nahradit cívku můžeme dvěma základními způsoby. První princip spočívá v použití obvodu, který přímo nahrazuje cívku jako dvojpól a vykazuje mezi určitými svorkami příslušnou indukčnost. Druhý princip nahrazuje cívku nepřímo, pomocí transformace výchozího LCR obvodu na ekvivalentně se chovající strukturu RCD. Toto zapojení poté neobsahuje indukční prvek, ale na druhou stranu potřebuje syntetický prvek D – dvojný kapacitor.

### 1.10.2 Obvody ARC s přenosovou funkcí 1. řádu

Tyto filtry slouží jako základní stavební blok pro kaskádní i jinou syntézu složitějších filtrů. U těchto obvodů s přenosovou funkcí 1. řádu, lze pouze nastavovat rezonanční kmitočet  $f_0$  a realizovat pouze filtry typu DP, HP, korekční a fázovací článek, ovšem nelze realizovat filtry typu PP a PZ.



**Obr.1.11** Aktivní dolní a horní propust RC 1.řádu

### 1.10.3 Obvody ARC s přenosovou funkcí 2. řádu

U těchto filtrů je velice důležité, že umožňují realizaci všech základních typů filtrů, tedy DP, HP, PP, PZ, DPN, HPN, korekční a fázovací článek. Filtry 2. řádu jsou velice často využívány pro různé méně náročné aplikace a jako základní stavební bloky pro filtry vyšších řádů. Tyto filtry umožňují kromě nastavení rezonančního kmitočtu  $F_0$  také nastavení činitele jakosti  $Q$ .

V různých parametrech se lze setkat s různými způsoby klasifikace realizací filtrů ARC 2. řádu. Můžeme je dělit podle zapojení s invertujícími, či neinvertujícími zesilovači nebo lépe s kladnou či zápornou zpětnou vazbou, podle výchozího blokového zapojení, typu aktivního prvku apod. Ovšem jako nepraktičtější se ukázalo dělení z hlediska počtu aktivních prvků, tedy podle počtu OZ. Jako zvláštní skupinu lze chápat filtry 2. řádu s jinými typy aktivních prvků (s konvejory, OTA zesilovači apod.).

#### Dělení těchto filtrů:

- podle počtu OZ:
  - s jedním operačním zesilovačem
  - s dvěma operačními zesilovači
  - s třemi a více operačními zesilovači
- podle typu zpětnovazebního článku RC:
  - Wienův článek
  - Přemostěný článek T – se spojenými rezistory
  - Přemostěný článek T – se spojenými kapacitami

### 1.10.4 Základní vlastnosti z hlediska hodnot $F_0$ a $Q$

Obvody s jedním operačním zesilovačem mají určen rezonanční kmitočet  $F_0$  shodně pro všechny základní varianty filtrů z obrázku 1.11 i 1.12 a to podle následujícího vztahu

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}. \quad (1.2)$$

Činitel jakosti  $Q$  má omezenou hodnotu, obvody s jedním operačním zesilovačem simulují z principu ztrátový rezonanční obvod. Zvyšování zesílení zesilovače umožňuje zmenšování ztrát neboli zvyšování  $Q$ . Další zvyšování hodnoty  $Q$  je možné dosáhnout dvěma způsoby. První cesta – již uvedené zvyšování zesílení „A“ vede pro vyšší hodnoty  $Q$  k velkým citlivostem činitele jakosti na tolerance hodnot prvků a k nestabilitě obvodu. Proto je lepší využít druhou cestu, zvyšování poměru hodnot prvků.

Obvody s jedním operačním zesilovačem i přes minimalizaci citlivostí nejsou vhodné pro realizaci filtrů s vysokým činitelem jakosti. Prakticky dosažitelné maximum  $Q$  je asi 10 až 30 podle typu zapojení.

Protože hodnotu  $Q$  určují poměry hodnot kapacitorů či rezistorů, je vhodné si tyto poměry vyjádřit zjednodušeně:

$$\alpha = \frac{R_2}{R_1} \qquad \beta = \frac{C_2}{C_1} \qquad \gamma = \frac{R_4}{R_3} \qquad (1.3)$$

Činitel jakosti pak bude mít v obecné podobě pro zapojení článku T se spojenými a shodnými rezistory R tento tvar:

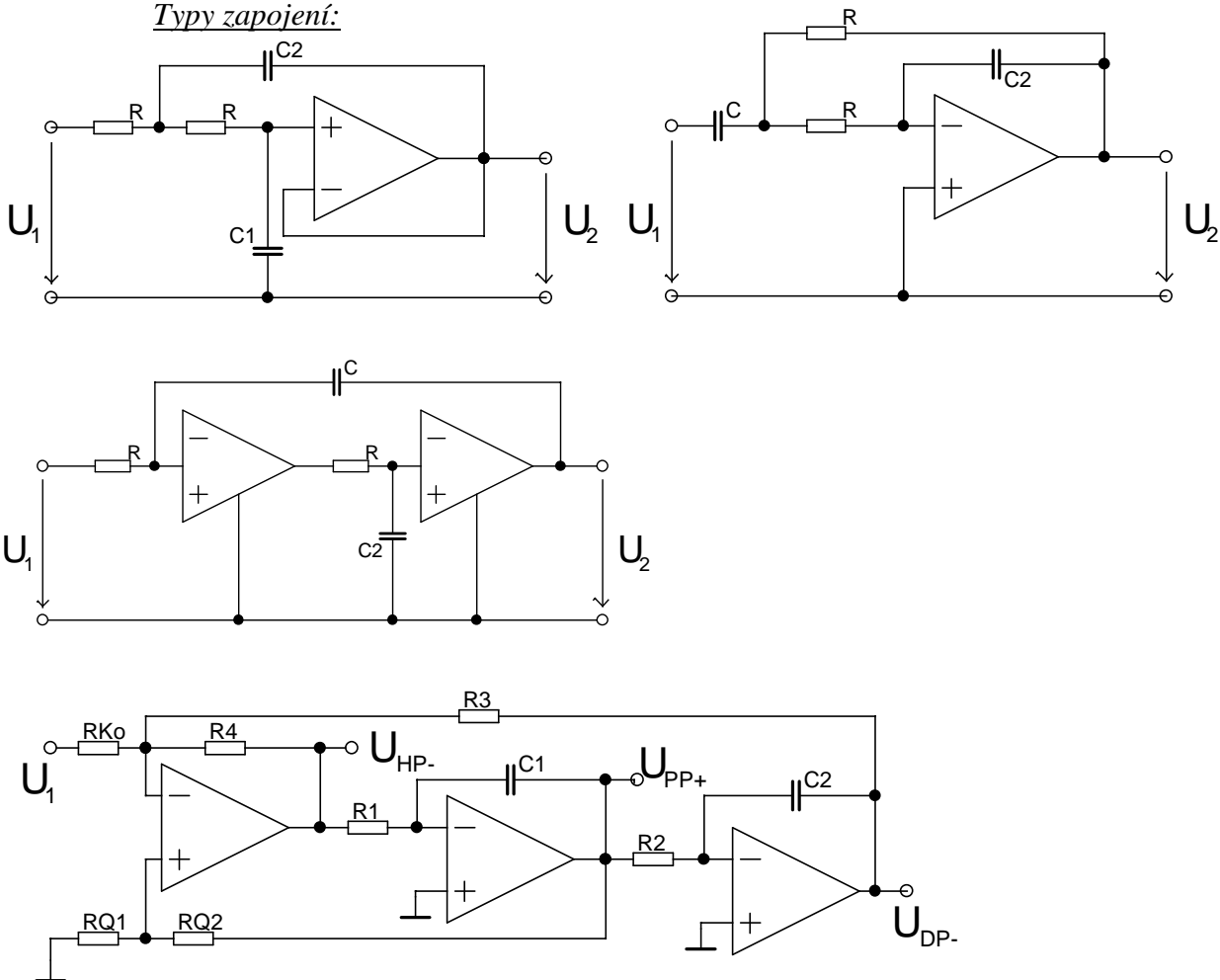
$$Q = \frac{\sqrt{\alpha\beta}}{\alpha(1-\beta\gamma)+1} \qquad (1.4)$$

resp. pro zapojení se spojenými C:

$$Q = \frac{\sqrt{\alpha\beta}}{\beta(1-\alpha\gamma)+1} \qquad (1.5)$$

Uvedené vztahy pro  $F_0$  a pro  $Q$  nám umožňují posoudit laditelnost těchto filtrů. Je tedy zřejmé, že všechny základní typy filtrů lze ladit jak souběžnou změnou odporů, tak i souběžnou změnou kapacit kondenzátorů. Většinou je výhodné plynule ladit kmitočty tandemovým potenciometrem či nějakým elektronicky řízeným ekvivalentním obvodem a skokově přepínat kapacity kondenzátorů.

*Typy zapojení:*



**Obr.1.12** Základní zapojení typů filtrů: a) dolní propust, b) pásmová propust, c) dolní propust s dvěma OZ, d) zapojení univerzálních filtrů s třemi OZ a s třemi výstupy

## 2 ZVLÁŠTNÍ TYPY A APLIKACE KMITOČTOVÝCH FILTRŮ

Někdy se vyskytnou problémy, které nelze řešit běžnými a standardními typy filtrů. Většinou jsou tyto problémy různorodé a musí se řešit individuálně. I při jejich návrhu je však možné využít některé dílčí poznatky z řešení standardních filtrů. Příklady zvláštních typů a aplikací filtrů lze uvést řízené a přeladitelné filtry, amplitudové a fázové korektory, fázovací obvody atd.

### 2.1 PŘELADITELNÉ A ŘÍZENÉ FILTRY

Ladění kmitočtových filtrů je velmi častým problémem, přičemž je stále více vyžadováno ladění elektrické. Laděním obvykle rozumíme změnu mezního kmitočtu  $F_M$  u dolní a horní propusti a změnu středního nebo-li rezonančního kmitočtu  $F_0$  u pásmové zadržky a propusti, a to při zachování tvaru modulové charakteristiky. Častým problémem při přeladování pásmové propusti a zadržky je se šířkou pásma  $B/F_0$ . Jednodušší je zachování relativní šířky pásma  $B/F_0$ . Zachování absolutní šířky pásma  $B$  je dosti obtížné.

Řízením filtrů rozumíme nastavování některých dalších parametrů filtrů, čímž lze měnit i tvar modulové charakteristiky. Např. u obvodu 2. řádu lze mimo  $F_0$  řídit obvykle nezávisle i další parametry, jako  $Q$ ,  $F_N$ ,  $K_0$  apod. U obvodů s přenosovou funkcí vyšších řádů je vhodné využít digitální řízení některým typem procesoru či počítačem.

Způsob realizace přeladění závisí na typu a zapojení filtru. Filtry RLC je obtížné přeladovat, z tohoto hlediska jsou výhodnější filtry ARC, či ASR. Přeladování filtru lze realizovat buď mechanicky (potenciometry, proměnné kondenzátory), nebo elektronicky (změnou řídicího napětí nebo spínacího kmitočtu, digitálně řízených zesilovačů, potenciometrů a převodníků A/D).

### 2.2 FILTRY 2. ŘÁDU S NASTAVITELNÝMI PARAMETRY

Filtry 2.řádu umožňují mimo přeladění změnou  $F_0$  i nezávislé nastavení dalších parametrů, především  $Q$  a tím i šířky pásma. Dále se u filtrů s nulou přenosu obvykle souběžně se změnou  $F_0$  nastavuje i kmitočet nulového přenosu  $F_N$ . Ovšem pro DPN a HPN lze většinou nastavovat i poměr hodnot  $F_0/F_N$ . V některých případech lze nezávisle nastavovat i hodnotu přenosu  $K_0$ , ale to je problém, který lze řešit i mimo filtr řízením zesílení běžného zesilovače.

- Ladění rezonančního obvodu RLC je obvykle realizováno jedním proměnným prvkem, nejčastěji otočným kondenzátorem či varikapem, ale používá se i proměnný induktor.
- Filtry ARC 2. řádu je obvykle výhodné přeladovat změnou hodnot odporů vzhledem k velikosti hodnot kapacit v nízkofrekvenčním kmitočtovém pásmu.
- Řízení hodnoty  $Q$  je možné realizovat u obvodů s jedním OZ, jednoduše změnou hodnoty  $R_3$  nebo  $R_4$ . Hodnotu  $Q$  ale nelze regulovat v širokém rozsahu, protože zvyšováním  $\gamma$  rostou značně citlivosti. Též se mění hodnota přenosu  $K_0$ .
- Způsob řízení kmitočtu nulového přenosu  $F_N$  záleží na typu filtru a zapojení. Pro PZ hodnota  $F_N$  vždy přímo souvisí s nastavením kmitočtu  $F_0$ , ale nemusí být vždy přímo

totožná s hodnotou  $F_0$  nezávisle na hodnotách prvků. V takovém případě pak při chybných hodnotách prvků přechází v DPN či HPN.

- Při přeladování DPN či HPN vznikají obdobné problémy, ale navíc je zde potřeba nastavení změny poměru  $F_N/F_0$ .

### 2.3 MOŽNOSTI REALIZACE SOUBĚŽNÉ ZMĚNY ODPORŮ

Jak již víme nejčastějším požadavkem je ladění filtru beze změny tvaru jeho modulové charakteristiky. Toho dosáhneme u filtrů ARC nejnadhěji souběžnou změnou dvou či více odporů beze změny poměru jejich hodnot.

Souběžné řízení lze realizovat:

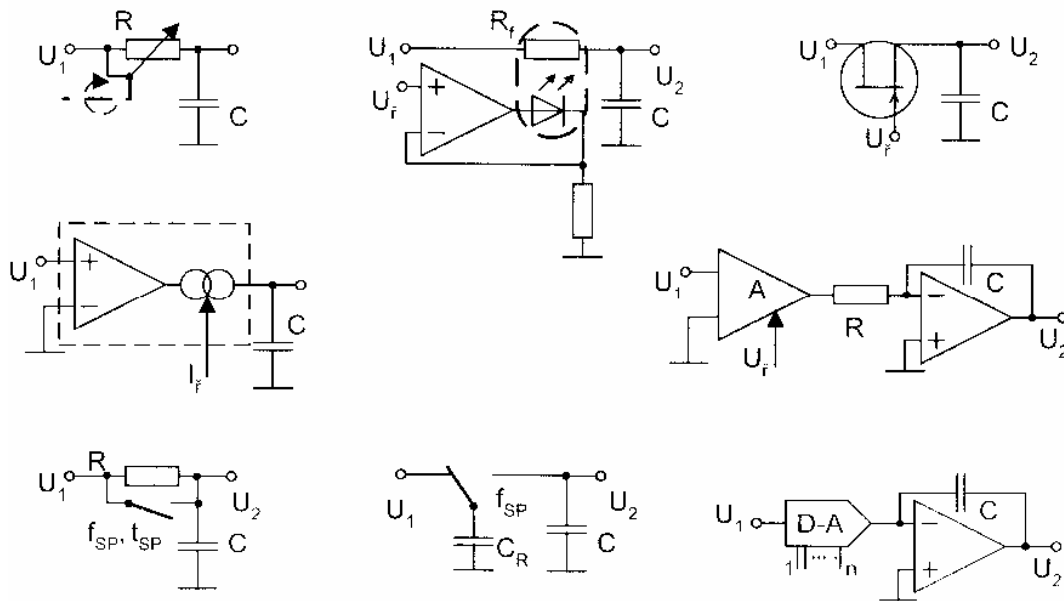
a) **mechanicky**

b) **elektronicky**

- analogové řízení napětím či proudem
- digitální řízení – převodníky AD
- spojité řízení spínacím kmitočtem

Běžně dostupné metody používané pro řízení obvodů:

- ✓ mechanicky ovládaný potenciometry
- ✓ optočleny s fotoodpory a diodami LED
- ✓ polem řízený tranzistor FET
- ✓ řízených OTA zesilovačů
- ✓ řízené napěťové zesilovače
- ✓ spínaný odpor
- ✓ simulace odporu přepínaných kondenzátorem
- ✓ použití D-A převodníku
- ✓ digitální potenciometry



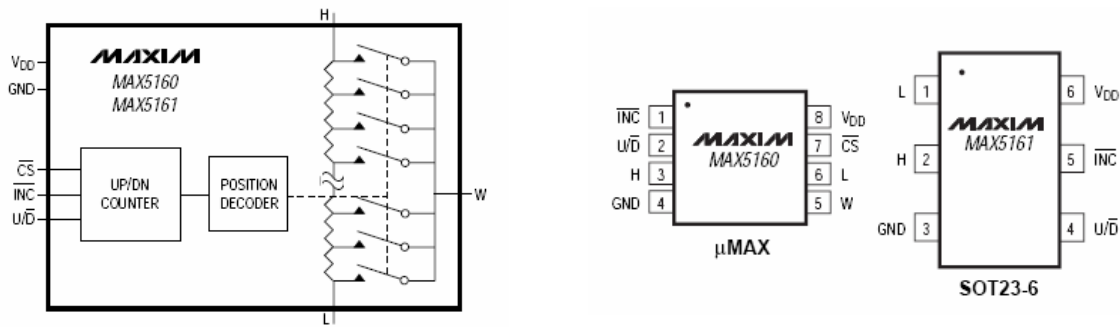
**Obr.2.1** Příklady realizace řízeného odporu v dolní propusti 1. řádu: a) potenciometr, b) optočlen s fotoodporem, c) polem řízený tranzistor, d) realizace řízeného integrátoru s OTA zesilovačem, e) realizace řízeného integrátoru s napěťovým zesilovačem, f) spínaný odpor se změnou střídý spínání, g) spínaný kapacitor, h) realizace řízeného integrátoru s D-A převodníkem

### 2.3.1 Digitální potenciometr

Uvnitř obvodu v šestipinovém SOT23, nebo osmipinovém  $\mu$ MAX tvoří 32 rezistorů odporovou síť ve které je elektronikou přepínán společný jezdec. Potenciometry se vyrábějí ve třech ohmických hodnotách mezi konci odporové dráhy. Jedná se o 50k, 100k a 200k verze těchto obvodů, které mohou lišit maximálně  $\pm 25\%$  od nominální hodnoty a o 50ppm/ $^{\circ}$ C podle závislosti na teplotě. Maximální hodnota odporu na společném přepínaném vývodu (označeném W) je 400 ohmů. Po startu napájení je automaticky nastavena prostřední 16. pozice jezdc. Obvod funguje v rozsahu napájení od 2,7 do 5,5 V se spotřebou 100 nA. Skrz odporové piny může protékat  $\pm 1$ mA. Obvod je předurčen pro jednoduché aplikace, jako je například regulace jasu a kontrastu. Ovládání se provádí pomocí tří drátů:

- /CS – aktivuje ovládání obvodu
- /INC – posunuje jezdec
- U//D – nastavuje směr posunu

Ovládání je zcela standardní. Okraje rozsahu jsou pevné s dorazy - to znamená, že při dosažení sepnutí poslední 32. pozice nebude obvod na další impuls pro posun nahoru reagovat. Díky tomu lze snadno definovat po vyslání více kroků, na jaké hodnotě se právě digitální potenciometr nastaví. Potenciometr se nastaví podle řídicí logiky na jednu  $\mu$ s, ale maximální možná frekvence pro přenos impulsů na /INC je 7 MHz.



**Obr.2.2** Obvodové schéma digitálního potenciometru

## 2.4 PŘELADITELNÉ FILTRY VYŠŠÍCH ŘÁDŮ

Teoreticky je možné realizovat ladění filtrů vyšších řádů všemi běžnými typy realizací ARC filtrů. Je ovšem zřejmé, že jednotlivé typy realizací se budou lišit svými vlastnostmi:

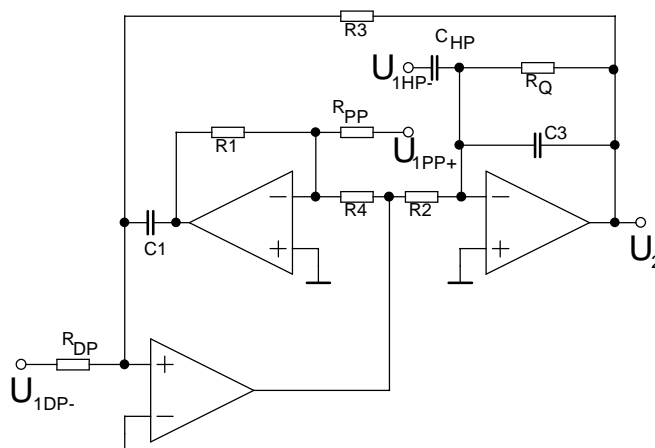
- kaskádní a nekaskádní spojení bloků – má výhodu v impedanční nezávislosti bloků a tedy hodnot ladících prvků
- přímá simulace RLC – má naopak nevýhodu v této závislosti a rozdílných hodnotách ladících prvků
- leap-frog – má v principu stejné vlastnosti jako přímá simulace RLC filtrů, ale umožňuje určité přeformování hodnot, což při realizaci ASC nečiní problémy

Prakticky je ladění filtrů vyšších řádů velmi obtížným technologickým problémem, především vzhledem k nutnosti zajištění potřebného souběhu většího počtu proměnných prvků.

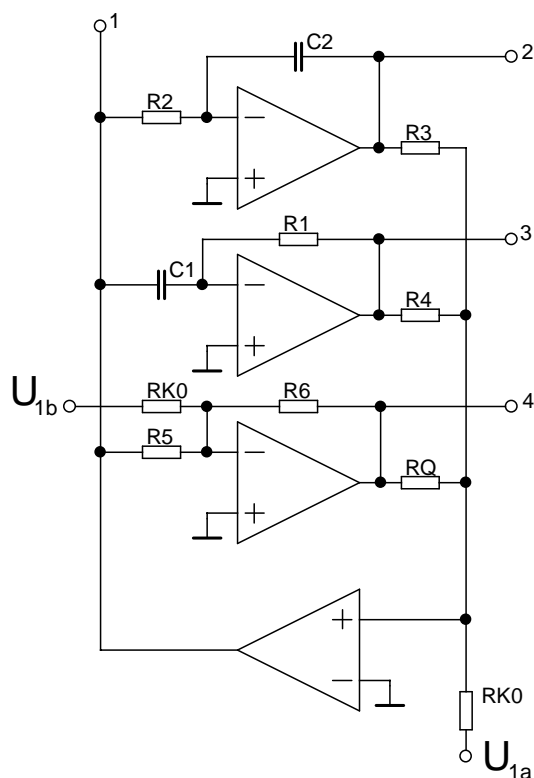
### 3 ACKERBERGOVO – MOSSBERGOVO ZAPOJENÍ FILTRU 2. ŘÁDU

Silný vliv negativního projevu  $F_T$  u zapojení s třemi OZ ve smyčce je eliminován v Ackerbergově – Mossbergově zapojení. Neinvertující integrátor je zde vytvořen zapojením integračního kapacitoru s invertorem v kladné zpětné vazbě neinvertujícího OZ. Tak jsou v základní smyčce spojeny pouze dva OZ. Tento obvod se dá použít do rezonančního kmitočtu  $0,1 F_T$ , což je s Antoniovým GIC prakticky nejvýše. Nevýhodou tohoto obvodu je ale ztráta univerzálnosti a laditelnosti souběžnou změnou dvou rezistorů. Obvod umožňuje současně realizovat jen dva základní typy filtrů ( např. DP + PP ). Jiné typy filtrů jsou realizovatelné formou více vstupů a jejich spojováním, popř. citlivou rozdílovou realizací pomocí diferenciálního zesilovače odečítajícího signály výstupu od vstupu. Laditelnost změnou odporů není vhodná jak vzhledem ke změně dynamických poměrů na jednom z výstupů OZ, tak i vzhledem k závislosti  $Q$  na jejich hodnotách.

Modifikací tohoto zapojení vznikl nový typ univerzálního obvodu 2. řádu, který odstraňuje uvedené nevýhody s velmi obdobnými kmitočtovými vlastnostmi jako původní zapojení. Pro vstup  $U_{1a}$  poskytuje současnou realizaci filtrů typu DP, HP a PP, a po připojení sumačního diferenčního zesilovače i PZ, DPN, HPN a FČ. Ladění je realizovatelné souběžnou změnou  $R_1 - R_2$  a  $C_1 - C_2$ . Hodnota  $Q$  je snadno nastavitelná změnou hodnoty  $R_Q$  a hodnota celkového přenosu hodnotou  $R_{K0}$ . Lze zde využít i druhý vstup  $U_{1b}$ , pro který je na výstupu č.4 filtr PZ s dobrými dynamickými vlastnostmi, protože maximální přenosy na ostatní výstupy je 0dB. U tohoto zapojení ovšem musíme říci, že vychází ze zapojení neinvertujícího integrátoru s invertorem v kladné zpětné vazbě, mají tendenci k parazitním oscilacím s malou amplitudou přibližně na kmitočtu  $F_T/2$ . Tyto oscilace nemusí omezovat zásadně funkci filtru, mohou však působit negativně a rušivě. V praxi je možné potlačit je vhodnou volbou zapojení, hodnot prvků a případných korekcí.



**Obr.3.1** Ackerbergovo – Mossbergovo zapojení



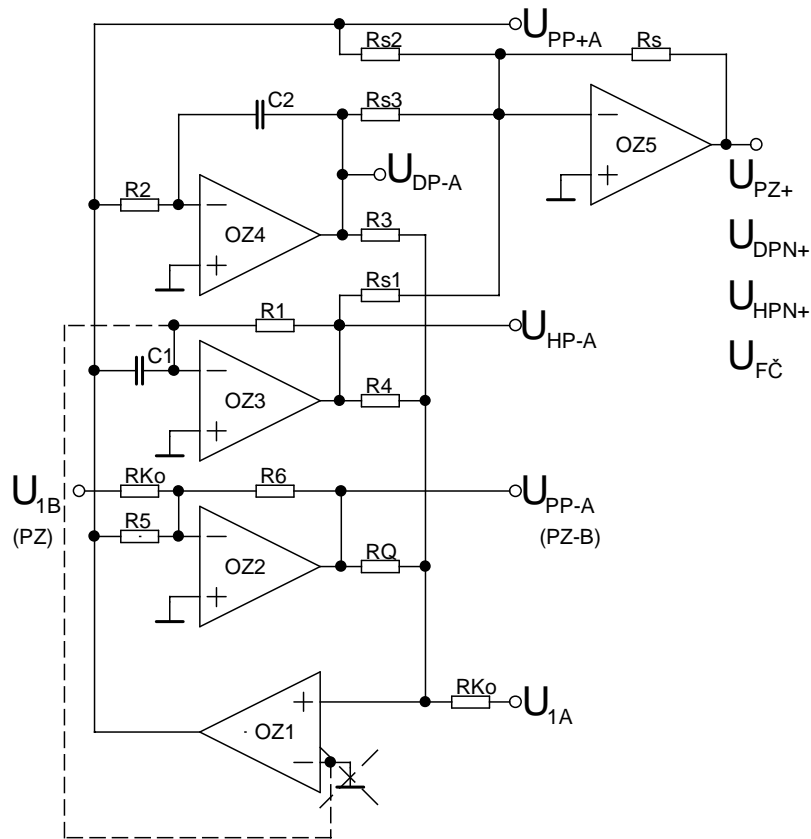
| výstup   | 1         | 2         | 3         | 4         |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $U_{1a}$ | $U_{PP+}$ | $U_{DP-}$ | $U_{HP-}$ | $U_{PP-}$ |
| $U_{1b}$ | $U_{PP-}$ | $U_{DP+}$ | $U_{HP+}$ | $U_{PZ-}$ |

**Obr.3.2** Univerzální laditelná varianta

### 3.1 POPIS NÁVRHU UNIVERZÁLNÍHO FILTRU 2.ŘÁDU

Obvod z obr.3.3 umožňuje současnou realizaci všech základních typů filtrů (DP, HP, PP, PZ, DPN, HPN, FČ). Jeho výhodou je nezávislé a lineární nastavení hodnoty jakosti  $Q$  a přenosu  $K_0$ . Druhou výhodou je vyšší použitelný kmitočtový rozsah (nižší hodnota  $FT$ ). Na druhou stranu je zde nebezpečí parazitních oscilací na kmitočtu přibližně  $FT/2$ . Tuto nevýhodu je možné kompenzovat čárkovane naznačeným přepojováním na virtuální zem.

Varianta vstupní svorky  $U_{1B}$  umožňuje realizovat přímo filtr typu PZ, jehož dynamický rozsah není pro vyšší hodnoty  $Q$  omezován maximálními přenosy na ostatní výstupy OZ (DP, HP, PP), jejich hodnota je 0dB. Postup návrhu je zcela shodný, liší se pouze umístění rezistoru  $RK_0$  a vstupní svorky.



**Obr.3.3** Návrh univerzálního filtru Ackerberg – Mossberg pro  $Q < 100$

Návrh univerzálního filtru:

✓ **Vstupní údaje:**  $F_0, Q, F_N, K \neq 1$

✓ **Volba  $C_1$  a  $C_2$ :**

$$C_1 = C_2 = C = 2 \cdot 10^{-7} / \sqrt{F_0} \quad [\text{F, Hz}] \quad (3.1)$$

Skutečnou hodnotu  $C_2$  volíme z dostupných hodnot, např. řada E6.

✓ **Výběr  $R_1$  a  $R_2$ :**

$$R_1 = R_2 = R = 1 / (2\pi F_0 C) \quad (3.2)$$

✓ **Volba hodnot  $R_3, R_4, R_5, R_6$ :**

Volíme  $R_3 = R_4 = R_5 = R_6$  v rozmezí 300Ω až 100kΩ, s výhodou z řady E12 tak, aby jejich hodnota byla blízká hodnotě  $R$ .

✓ **Výpočet  $R_{K0}$ :**

$$R_{K0} = R_4 / K = R_6 / K \quad (3.3)$$

✓ **Volba a výpočet  $R_Q$ :**

$$R_Q = R_5 \cdot Q \quad (3.4)$$

✓ **Volba a výpočet  $R_S, R_{S1}$  až  $R_{S2}$  pro PZ, DPN, HPN a FČ:**

|             |                            |                   |                            |
|-------------|----------------------------|-------------------|----------------------------|
|             | $R_S = 10 \text{ k}\Omega$ | $R_{S2} = \infty$ |                            |
| <b>PZ:</b>  | $R_{S1} = R_{S3} = R_S$    | $R_{S2} = \infty$ |                            |
| <b>HPN:</b> | $R_{S1} = R_S$             | $R_{S2} = \infty$ | $R_{S3} = R_S (F_0/F_N)^2$ |
| <b>DPN:</b> | $R_{S3} = R_S$             | $R_{S2} = \infty$ | $R_{S1} = R_S (F_N/F_0)^2$ |
| <b>FČ:</b>  | $R_{S1} = R_{S3} = R_S$    | $R_{S2} = R_S Q$  |                            |

(3.5)

✓ **Základní výpočty:**

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{R_4}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2}} \quad (3.6)$$

$$Q = \frac{R_Q}{\sqrt{R_3 R_4}} \sqrt{\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2}} \quad (3.7)$$

$$F_N = F_0 \sqrt{\frac{R_{S1}}{R_{S3}}} = F_0 k_F \quad (3.8)$$

Optimum:  $C_1=C_2$       $R_1=R_2$

$R_3=R_4=R_5=R_6$

Minimální  $F_T$  pro volbu OZ:

$F_T \geq 10F_0Q$

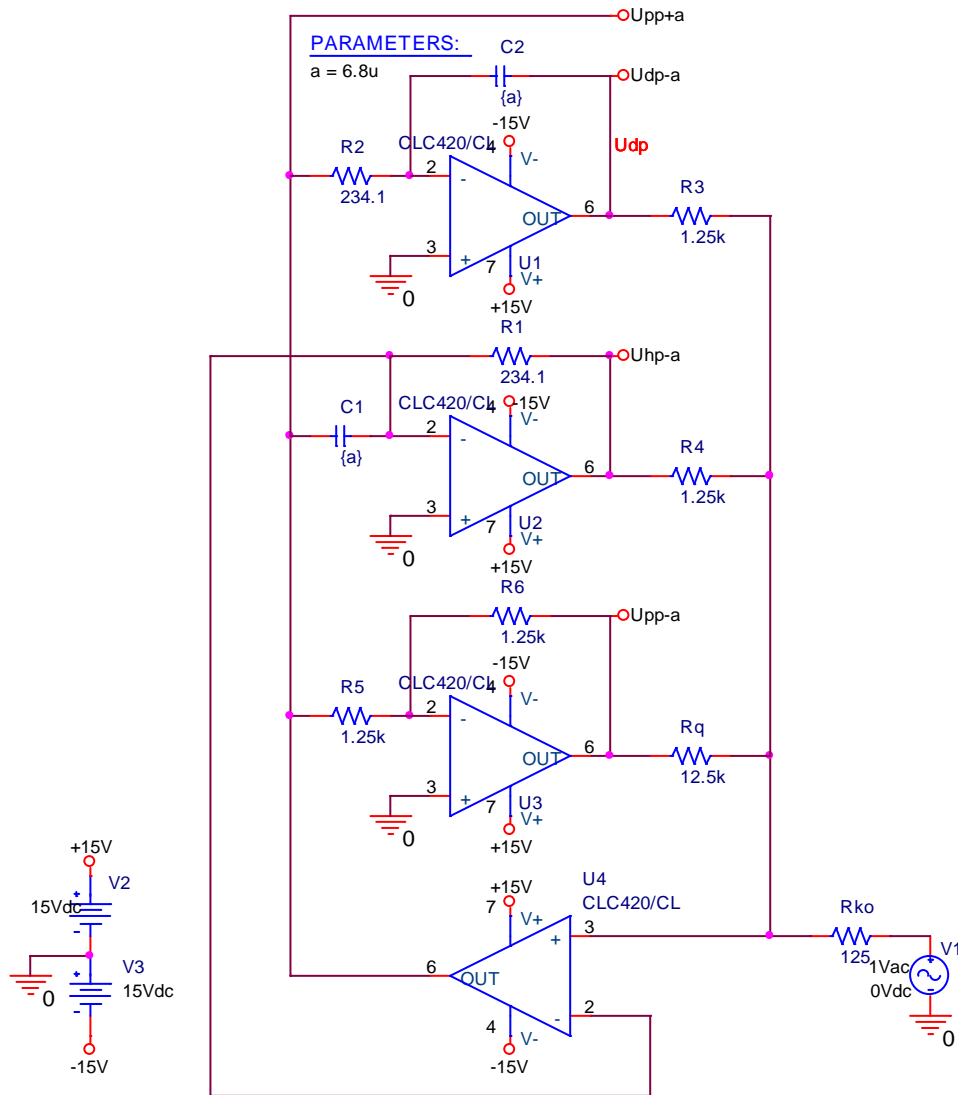
### 3.2 REÁLNÝ NÁVRH A SIMULACE V PROGRAMU SPICE

| R <sub>uhit</sub> =20 kΩ |                     |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |
|--------------------------|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| f [Hz]                   | 10                  | 100                    | 100                    | 1000                   | 1000                   | 10000                  | 10000                  | 100000                 | 100000                 | 1000000                | 10000000               |
| C <sub>12</sub> [F]      | 820n                | 820n                   | 82n                    | 82n                    | 8.2n                   | 820p                   | 820p                   | 82p                    | 82p                    | 8.2p                   | 820p                   |
| R <sub>12</sub> [Ω]      | 19409,10            | 1940,9                 | 19409,1                | 1940,9                 | 19409,10               | 1940,9                 | 19409,10               | 1940,9                 | 19409,10               | 1940,9                 | 19409,10               |
| R <sub>3,4,5,6</sub> [Ω] | 10k                 | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    |
| K=10                     | R <sub>10</sub> [Ω] | 1k                     | 1k                     | 1k                     | 1k                     | 1k                     | 1k                     | 1k                     | 1k                     | 1k                     | 1k                     |
| Q=10                     | R <sub>0</sub> [Ω]  | 100k                   | 100k                   | 100k                   | 100k                   | 100k                   | 100k                   | 100k                   | 100k                   | 100k                   | 100k                   |
| Q=20                     | R <sub>0</sub> [Ω]  | 200k                   | 200k                   | 200k                   | 200k                   | 200k                   | 200k                   | 200k                   | 200k                   | 200k                   | 200k                   |
| Q=30                     | R <sub>0</sub> [Ω]  | 300k                   | 300k                   | 300k                   | 300k                   | 300k                   | 300k                   | 300k                   | 300k                   | 300k                   | 300k                   |
| Q=50                     | R <sub>0</sub> [Ω]  | 500k                   | 500k                   | 500k                   | 500k                   | 500k                   | 500k                   | 500k                   | 500k                   | 500k                   | 500k                   |
| PZ                       | R <sub>e1</sub> [Ω] | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    |
|                          | R <sub>e2</sub> [Ω] | *                      | *                      | *                      | *                      | *                      | *                      | *                      | *                      | *                      | *                      |
| DPN                      | R <sub>s</sub> [Ω]  | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    |
|                          | R <sub>e1</sub> [Ω] | 27k                    | 27k                    | 27k                    | 27k                    | 27k                    | 27k                    | 27k                    | 27k                    | 27k                    | 27k                    |
|                          | R <sub>e2</sub> [Ω] | *                      | *                      | *                      | *                      | *                      | *                      | *                      | *                      | *                      | *                      |
| HPN                      | R <sub>e1</sub> [Ω] | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    |
|                          | R <sub>e2</sub> [Ω] | 3,8k                   | 3,8k                   | 3,8k                   | 3,8k                   | 3,8k                   | 3,8k                   | 3,8k                   | 3,8k                   | 3,8k                   | 3,8k                   |
| FČ                       | R <sub>e1</sub> [Ω] | 100k, 200k, 300k, 500k | 100k, 200k, 300k, 500k | 100k, 200k, 300k, 500k | 100k, 200k, 300k, 500k | 100k, 200k, 300k, 500k | 100k, 200k, 300k, 500k | 100k, 200k, 300k, 500k | 100k, 200k, 300k, 500k | 100k, 200k, 300k, 500k | 100k, 200k, 300k, 500k |
|                          | R <sub>e2</sub> [Ω] | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    | 10k                    |

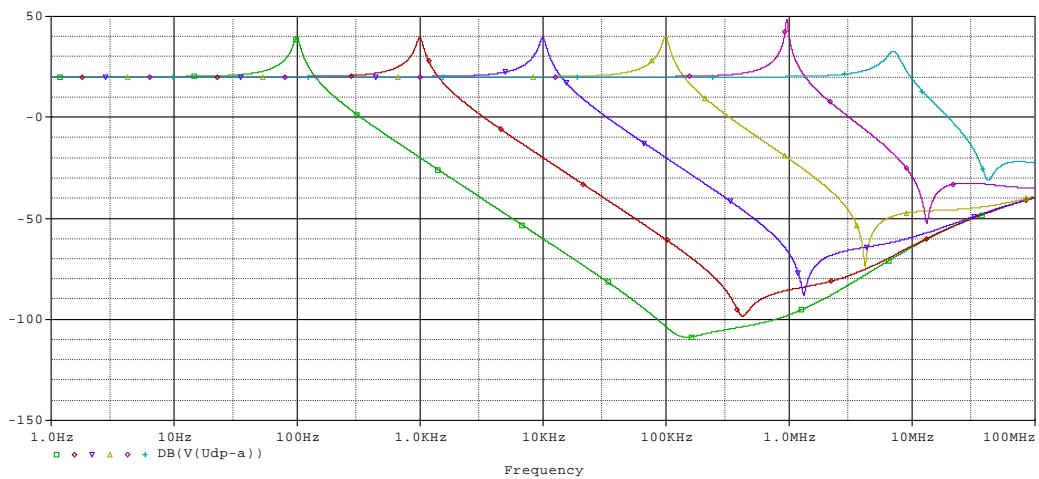
  

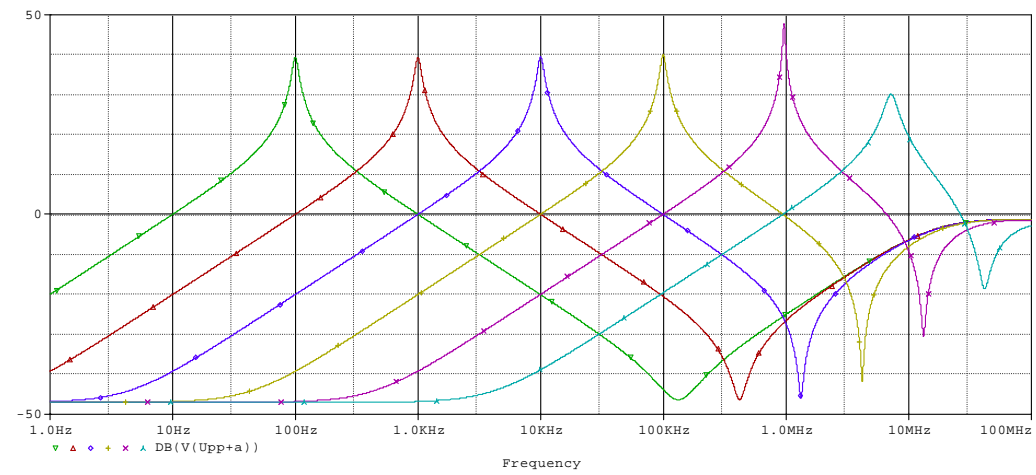
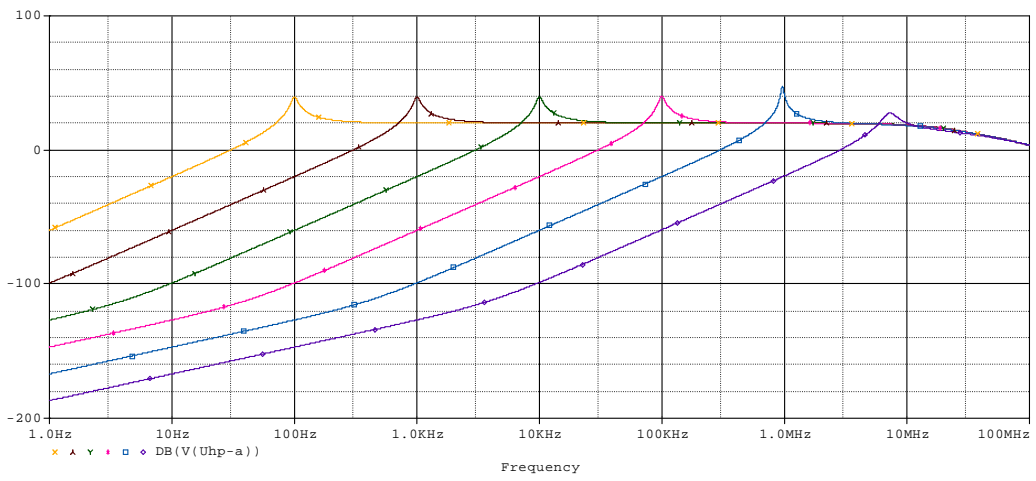
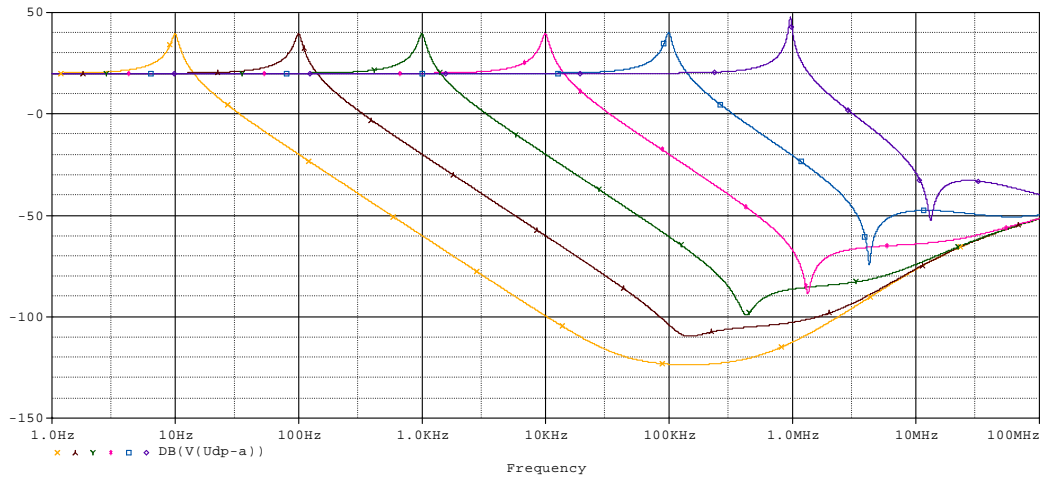
| R <sub>uhit</sub> =10 kΩ |                     |       |        |       |        |       |        |        |        |         |          |
|--------------------------|---------------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|---------|----------|
| f [Hz]                   | 10                  | 100   | 100    | 1000  | 1000   | 10000 | 10000  | 100000 | 100000 | 1000000 | 10000000 |
| C <sub>12</sub> [F]      | 1,8u                | 180n  | 180n   | 180n  | 18n    | 1,8n  | 180p   | 180p   | 180p   | 18p     | 1,8p     |
| R <sub>12</sub> [Ω]      | 9947,2              | 994,7 | 9947,2 | 994,7 | 9947,2 | 994,7 | 9947,2 | 994,7  | 9947,2 | 994,7   | 9947,2   |
| R <sub>3,4,5,6</sub> [Ω] | 5k                  | 5k    | 5k     | 5k    | 5k     | 5k    | 5k     | 5k     | 5k     | 5k      | 5k       |
| K=10                     | R <sub>10</sub> [Ω] | 500   | 500    | 500   | 500    | 500   | 500    | 500    | 500    | 500     | 500      |
| Q=10                     | R <sub>0</sub> [Ω]  | 50k   | 50k    | 50k   | 50k    | 50k   | 50k    | 50k    | 50k    | 50k     | 50k      |
| Q=20                     | R <sub>0</sub> [Ω]  | 100k  | 100k   | 100k  | 100k   | 100k  | 100k   | 100k   | 100k   | 100k    | 100k     |
| Q=30                     | R <sub>0</sub> [Ω]  | 150k  | 150k   | 150k  | 150k   | 150k  | 150k   | 150k   | 150k   | 150k    | 150k     |
| Q=50                     | R <sub>0</sub> [Ω]  | 250k  | 250k   | 250k  | 250k   | 250k  | 250k   | 250k   | 250k   | 250k    | 250k     |

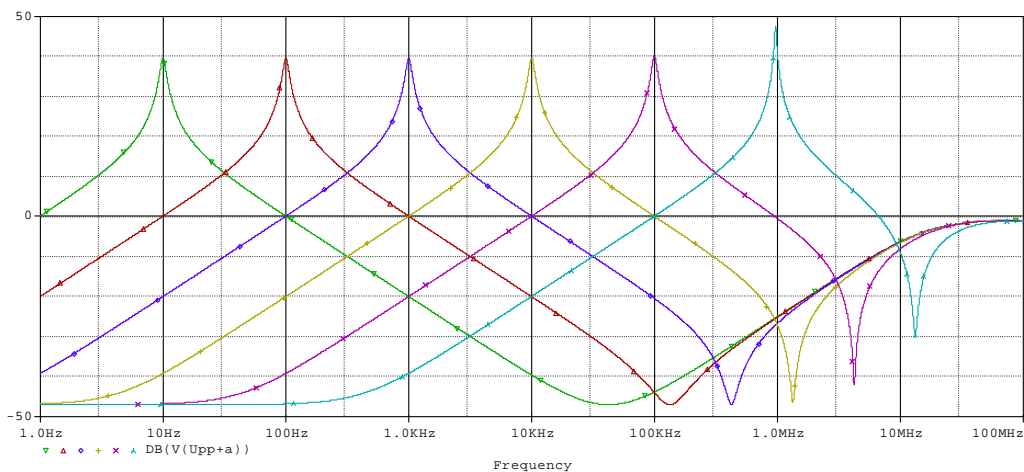
**Obr.3.4** Tabulky s hodnotami prvků pro návrh uváděný v kapitole 3.1 filtru Ackerberg-Mossberg



**Obr.3.5** Schéma univerzálního filtru Akerberg-Mossberg v programu Spice se skutečnými hodnotami jednotlivých prvků







**Obr.3.6** Simulace obvodu na obr.3.5 pro tabulku s  $R_{\text{digit}} = 2.5\text{k}\Omega$ , při  $R_{1,2}=234.1\Omega$  a  $R_{1,2}=2340.5\Omega$

### 3.3 ZHODNOCENÍ PRŮBĚHŮ FILTRU ACKERBERG – MOSSBERG

Obrázek 3.6 zachycuje průběhy simulací obvodu Akerberg – Mossberg, který je zobrazený na obrázku 3.5. Na prvních dvou obrázcích můžeme vidět průběhy dolní propusti která zobrazuje možnosti přeladování průběhů v kmitočtovém pásmu pomocí změny odporů  $R_{1,2}$  a kondenzátorů  $C_{1,2}$ .

Při zvolení určitých kondenzátorů  $C_{1,2}$  nastavíme některou z dekád ( 10Hz – 100Hz, 100Hz – 1000Hz, 1000Hz – 10000Hz, atd. ) ve které můžeme přeladovat střední kmitočet pomocí změny odporů  $R_{1,2}$ . Když si uvedeme nějaký příklad: jestliže se budeme chtít pohybovat „průběhem“ tedy středním kmitočtem v kmitočtovém pásmu 10Hz – 100Hz musíme zvolit hodnotu  $C_{1,2} = 6,8\mu\text{F}$  (viz. obr.č.3.4) a volbou hodnoty odporů  $R_{1,2}$  budeme přeladovat střední kmitočet v tomto pásmu. Jestliže si zvolíme hodnotu  $R_{1,2} = 2340,5\text{k}\Omega$  dostaneme se středním kmitočtem na 10Hz v případě hodnoty  $R_{1,2} = 234,1\Omega$  se budeme nacházet středním kmitočtem na 100Hz.

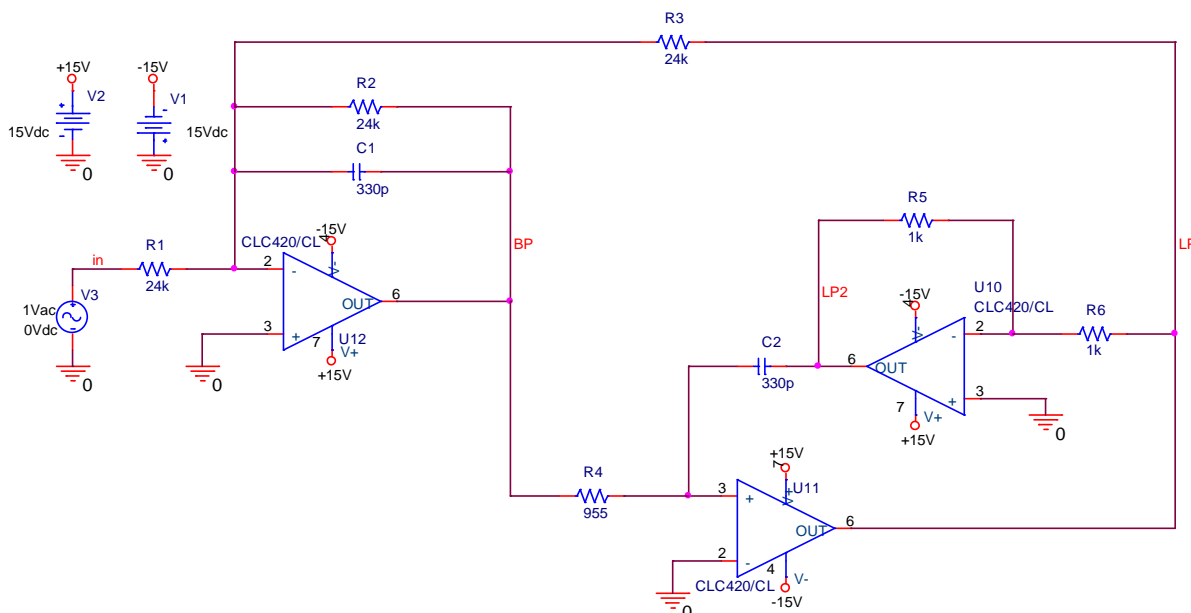
Pomocí těchto simulací jsem si mohl ověřit správnou funkci filtru Akerberg – Mossberg, správných výpočtů jednotlivých parametrů a možnosti jednotlivých operčních zesilovačů.

### 3.4 ELEKTRONICKÉ LADĚNÍ AKTIVNÍCH FILTRŮ TYPU ACKERBERG – MOSSBERG

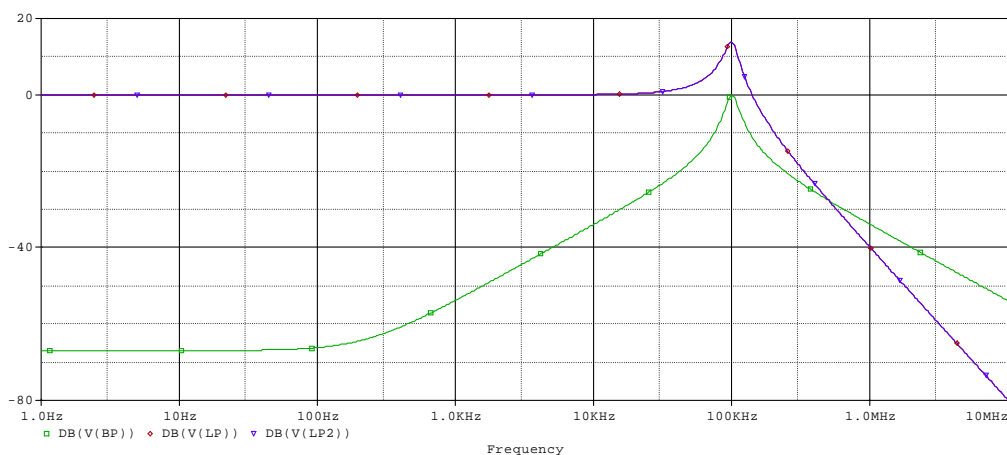
#### 3.4.1 Simulace obvodu v programu Spice

Vývoj velmi rychlých operačních zesilovačů a dalších aktivních prvků umožňuje konstrukci aktivních filtrů v kmitočtovém pásmu nad 1MHz, u kterých je možné elektronicky řídit parametry. Rychlý filtr 2.řádu který může reprezentovat základní stavební blok kaskádní syntézy lze realizovat strukturou typu Ackerberg – Mossberg. Toto zapojení vykazuje v uvažovaném kmitočtovém pásmu velmi dobré reálné vlastnosti.

Provedeme-li analýzu ideálního modelu který máme nakreslen na obr.č.3.7, poté z něj můžeme vysledovat všechny možné způsoby přeladování filtru při konstantním Q, resp. při konstantní šířce pásma B, jakož i všechny způsoby regulace šířky pásma při konstantním kmitočtu  $\omega_0$ . Ve všech případech jde o současně řízení parametrů N-tice součástek podle určitého zákona.



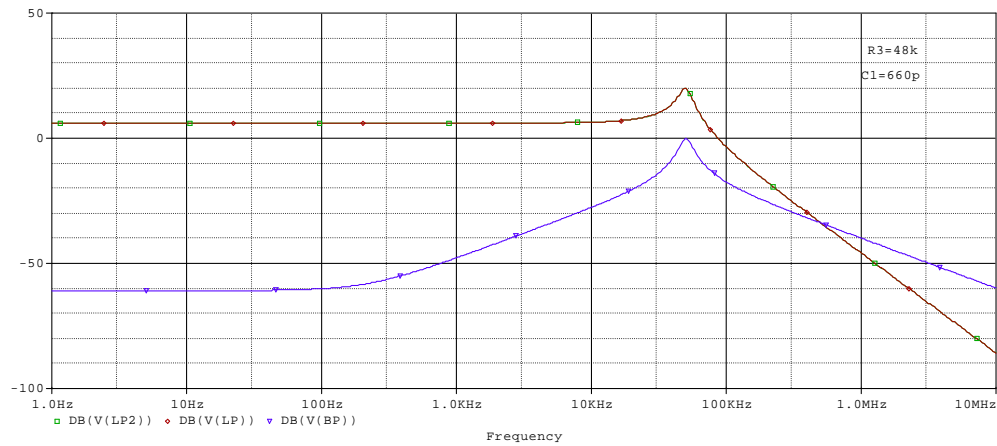
Obr.3.7 Základní struktura filtru 2. řádu typu Ackerberg - Mossberg



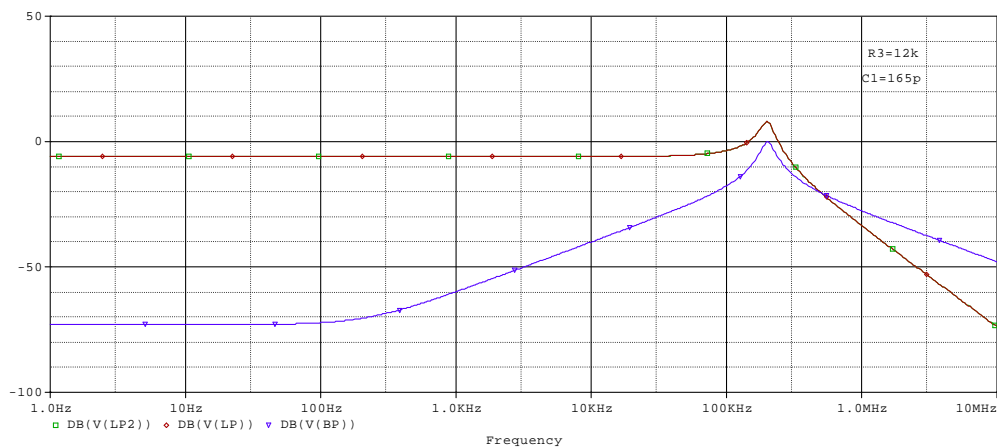
Obr.3.8 Základní simulace obvodu na obr.č.3.7

✓ Nastavování  $\omega_0$  při pevném činiteli jakosti (mění se B)

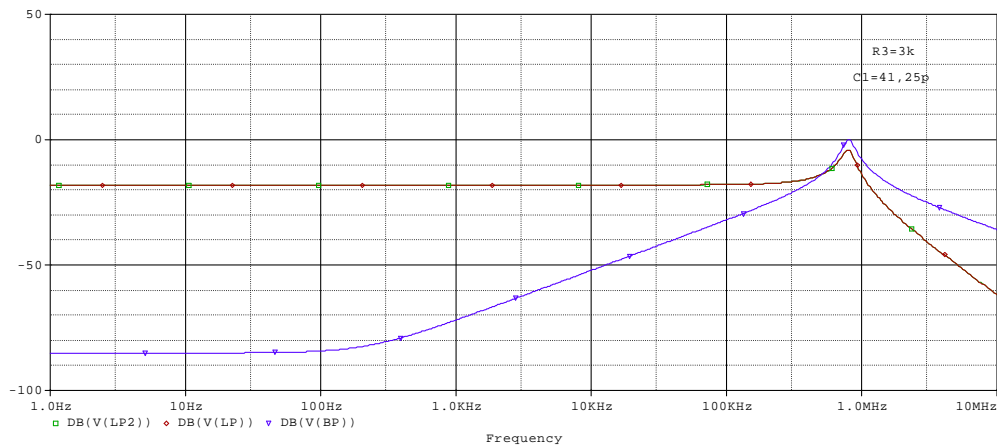
➤ Změnou  $R_3$  a  $C_1$  tak, aby jejich poměr zůstal konstantní.



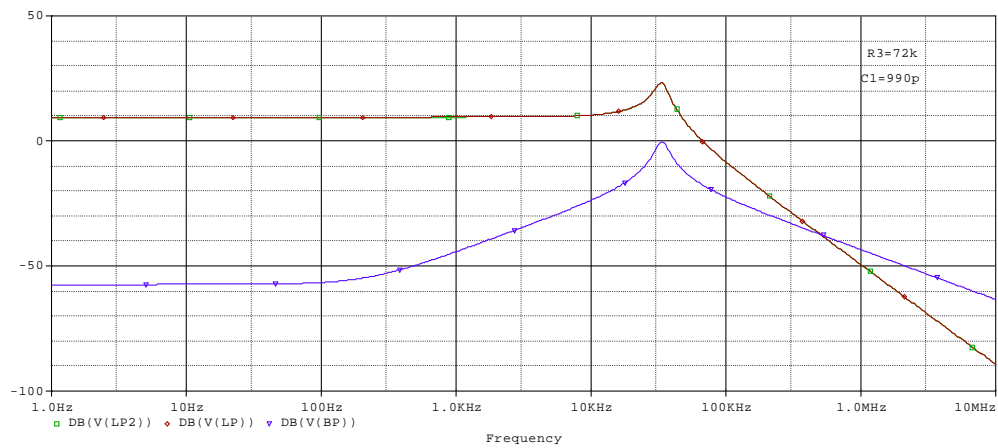
Obr.3.9 Simulace obvodu při  $R_3=48k\Omega$  a  $C_1=660pF$



Obr.3.10 Simulace obvodu při  $R_3=12k\Omega$  a  $C_1=165pF$

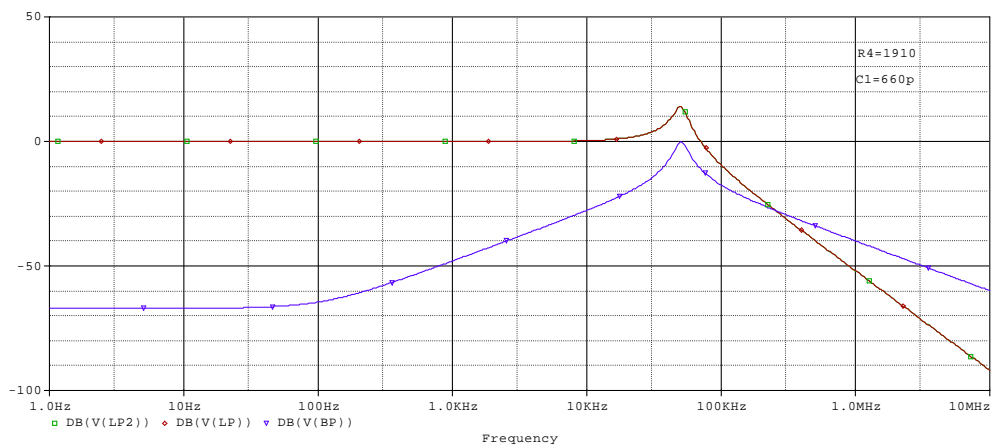


Obr.3.11 Simulace obvodu při  $R_3=3k\Omega$  a  $C_1=41,25pF$

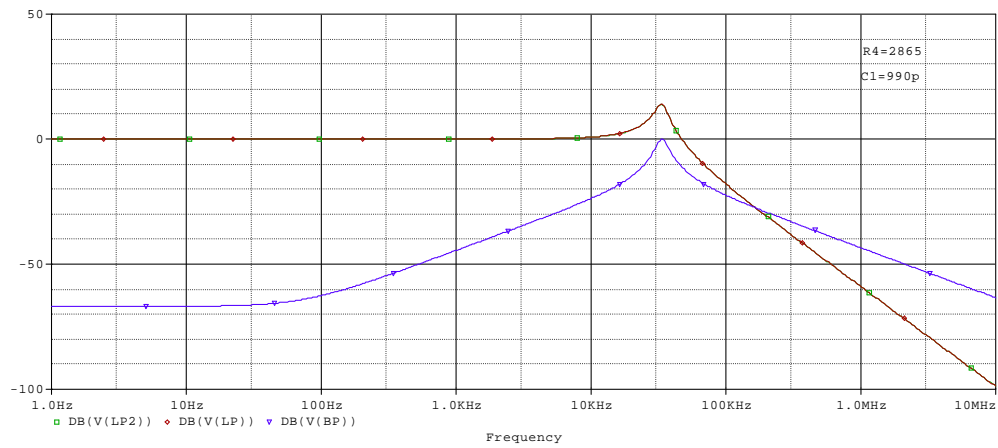


Obr.3.12 Simulace obvodu při  $R_3=72\text{k}\Omega$  a  $C_1=990\text{pF}$

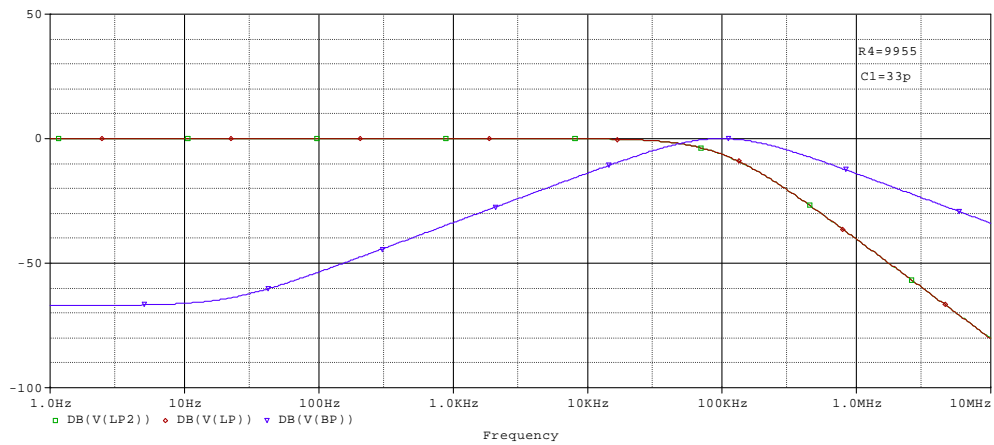
➤ **Změnou  $R_4$  a  $C_1$  tak, aby jejich poměr zůstal konstantní.**



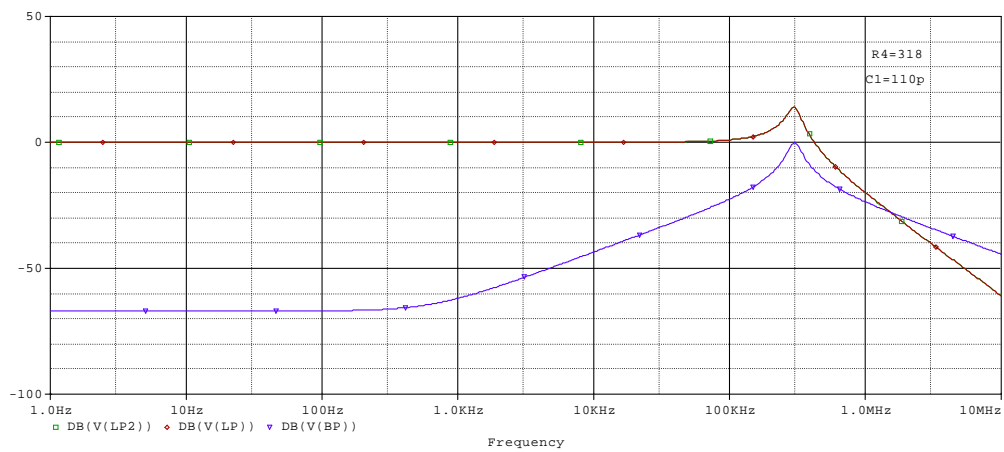
Obr.3.13 Simulace obvodu při  $R_4=1910\Omega$  a  $C_1=660\text{pF}$



Obr.3.14 Simulace obvodu při  $R_4=2865\Omega$  a  $C_1=990\text{pF}$

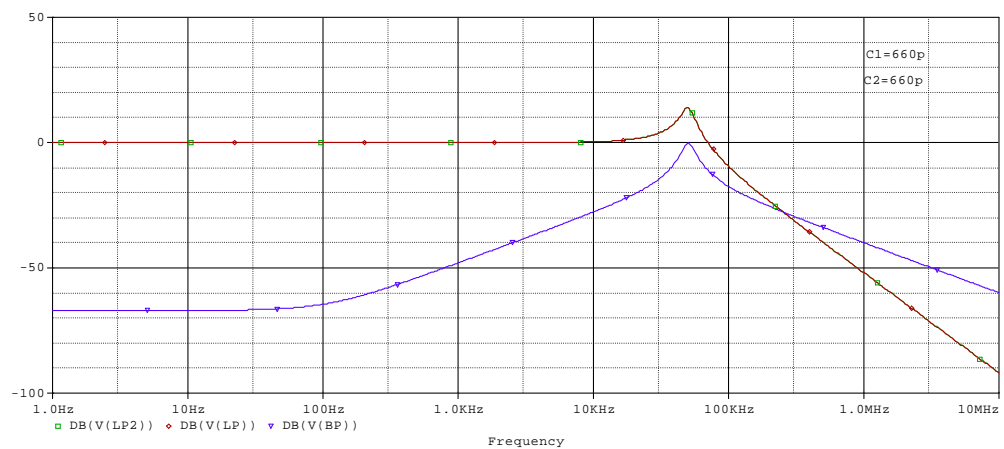


**Obr.3.15** Simulace obvodu při  $R_4 = 9950\Omega$  a  $C_1 = 33\text{pF}$

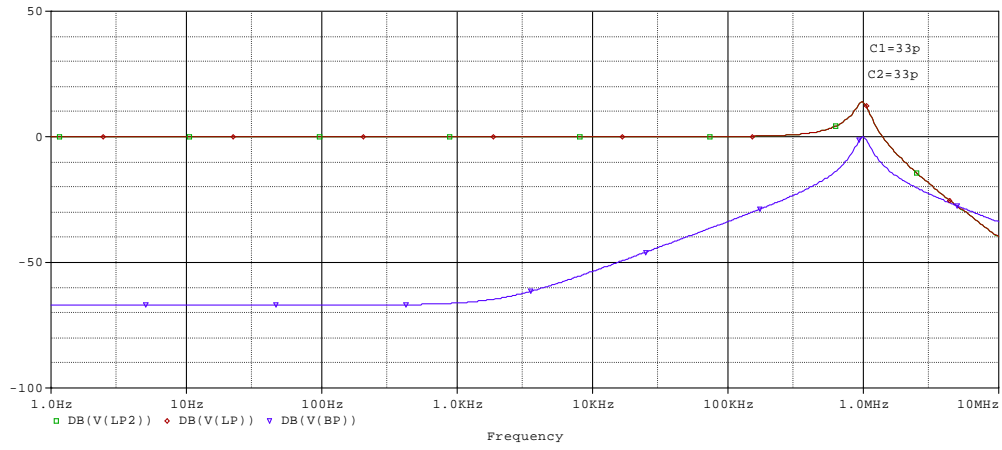


**Obr.3.16** Simulace obvodu při  $R_4 = 318\Omega$  a  $C_1 = 110\text{pF}$

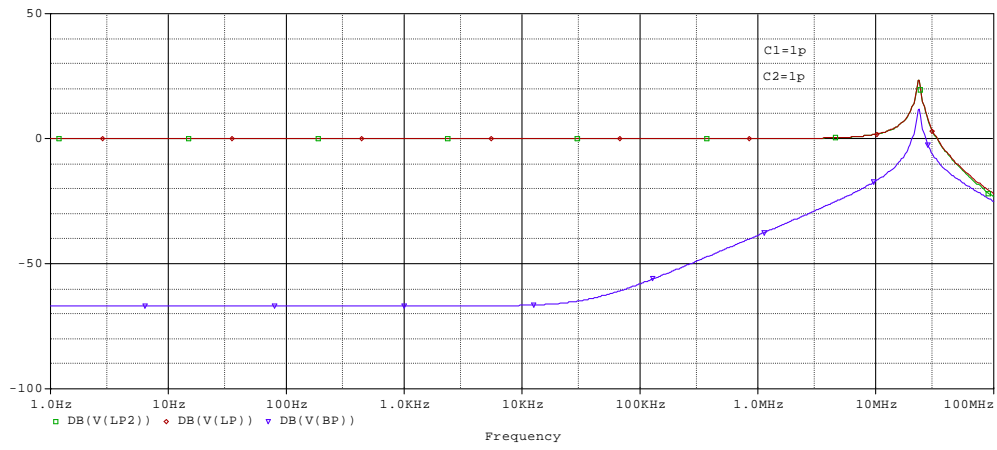
➤ **Změnou  $C_1$  a  $C_2$  tak, aby jejich poměr zůstal konstantní.**



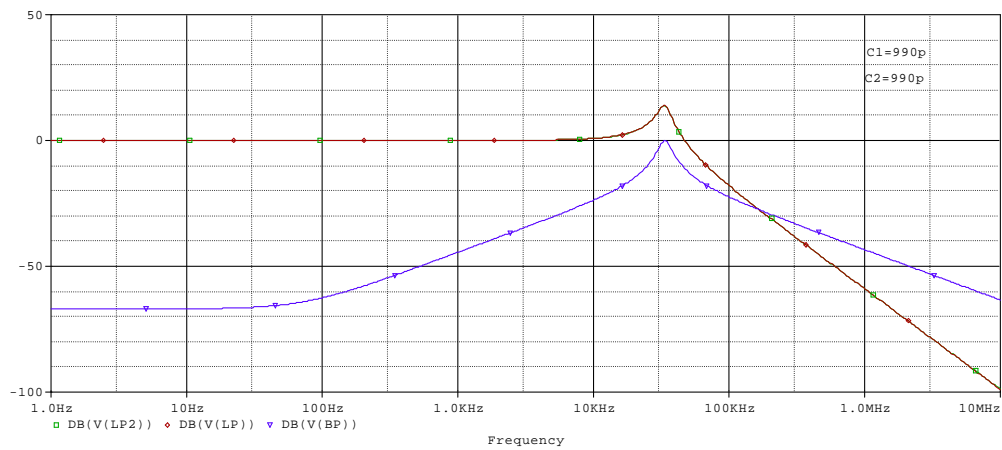
**Obr.3.17** Simulace obvodu při  $C_1 = 660\text{pF}$  a  $C_2 = 660\text{pF}$



**Obr.3.18** Simulace obvodu při  $C_1 = 33\text{pF}$  a  $C_2 = 33\text{pF}$



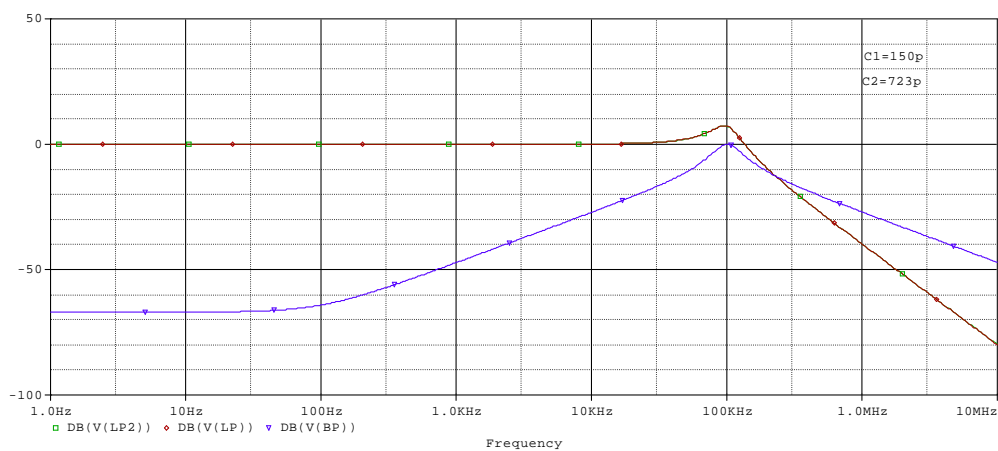
**Obr.3.19** Simulace obvodu při  $C_1 = 1\text{pF}$  a  $C_2 = 1\text{pF}$



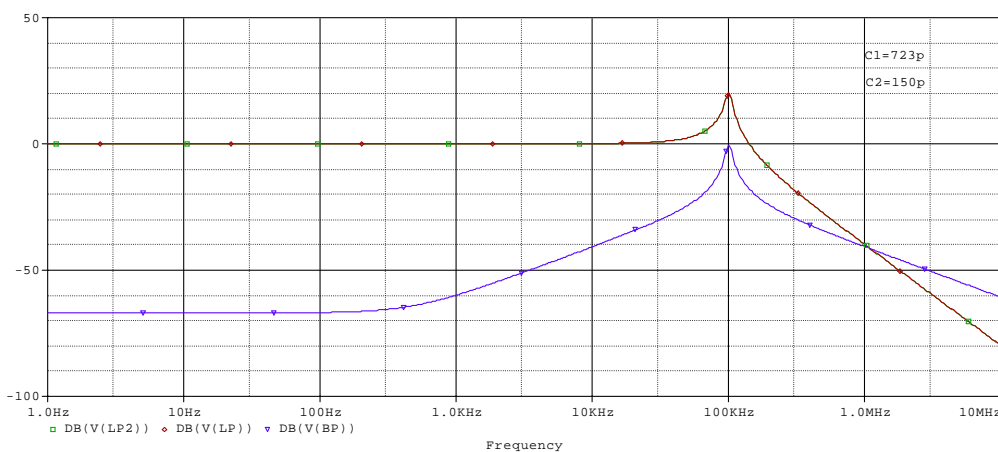
**Obr.3.20** Simulace obvodu při  $C_1 = 990\text{pF}$  a  $C_2 = 990\text{pF}$

✓ Nastavování  $Q$  resp.  $B$  při konstantním  $\omega_0$

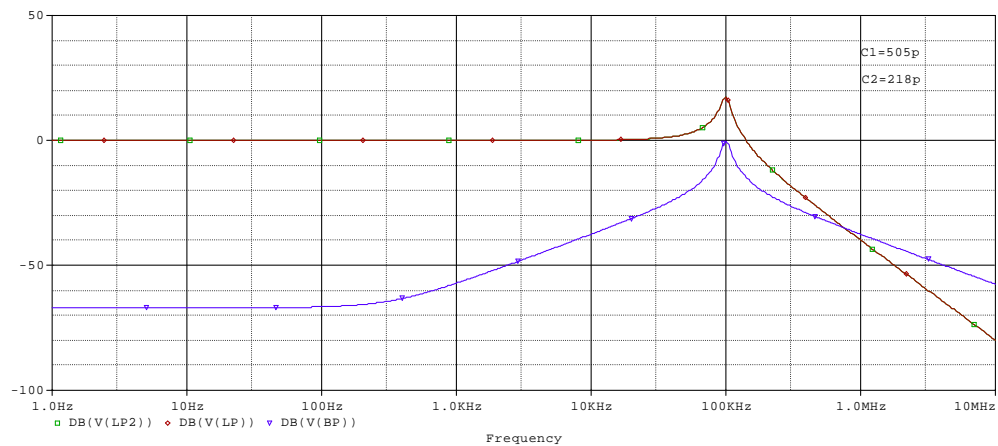
➤ Změnou  $C_1$  a  $C_2$  tak, aby jejich součin zůstal konstantní.



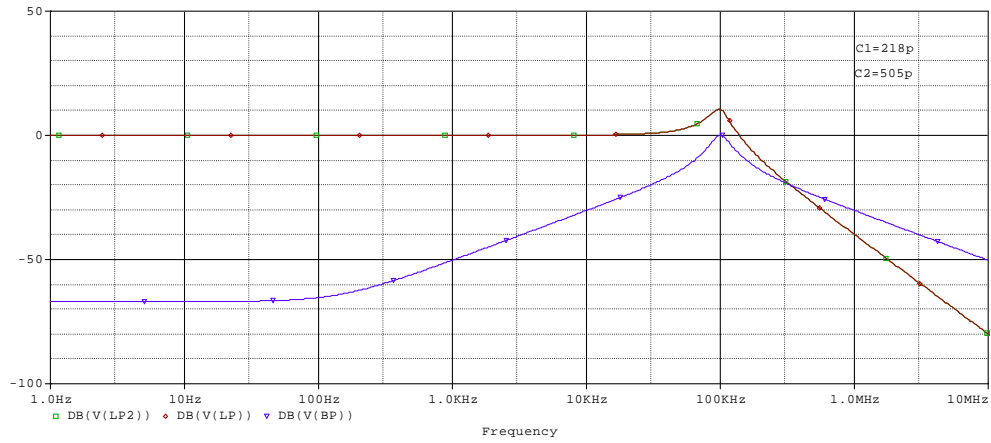
Obr.3.21 Simulace obvodu při  $C_1=150\text{pF}$  a  $C_2=723\text{pF}$



Obr.3.22 Simulace obvodu při  $C_1=723\text{pF}$  a  $C_2=150\text{pF}$

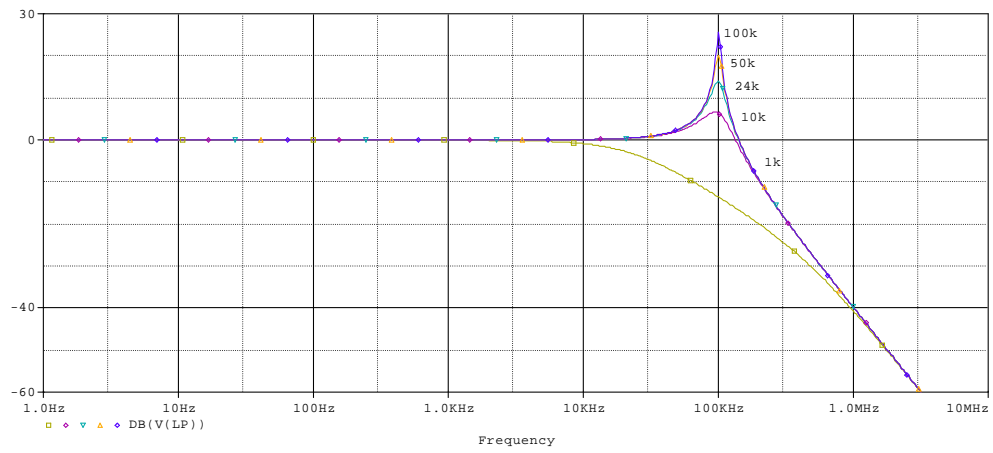


Obr.3.23 Simulace obvodu při  $C_1=505\text{pF}$  a  $C_2=218\text{pF}$

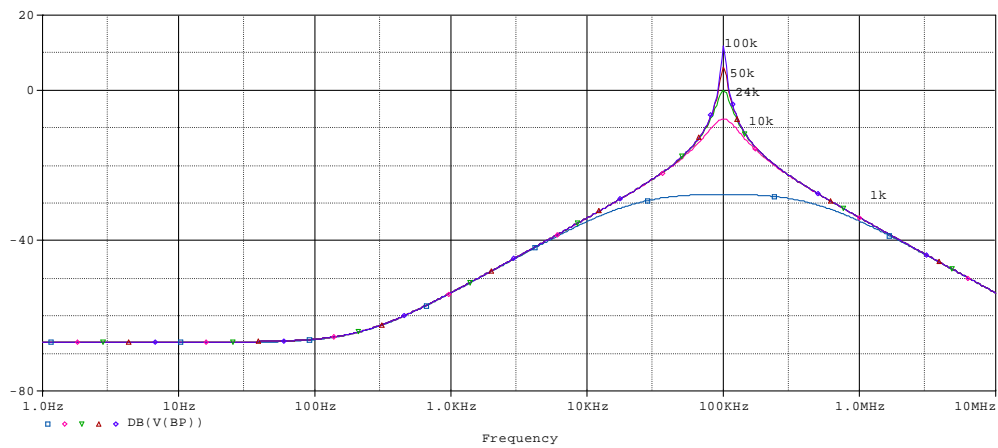


Obr.3.24 Simulace obvodu při  $C_1=218\text{pF}$  a  $C_2=505\text{pF}$

➤ **Změnou  $R_2$ .**

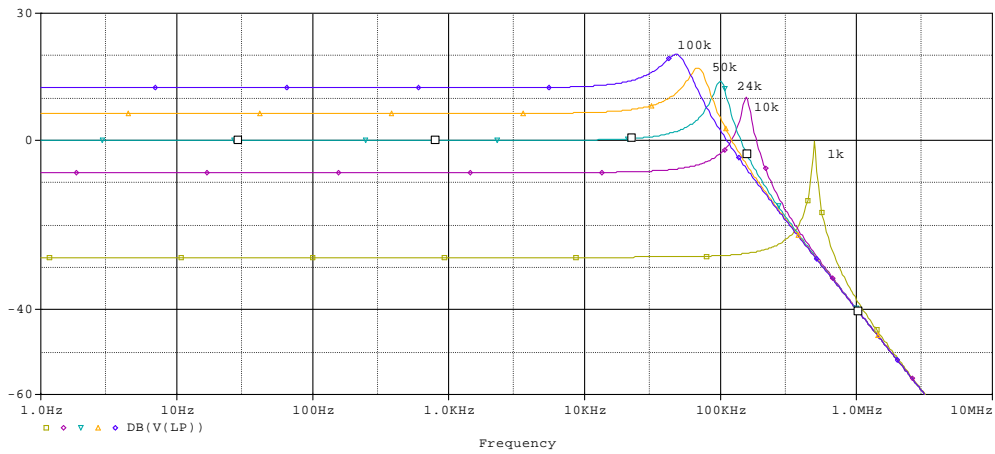


Obr.3.25 Simulace obvodu při změně  $R_2$

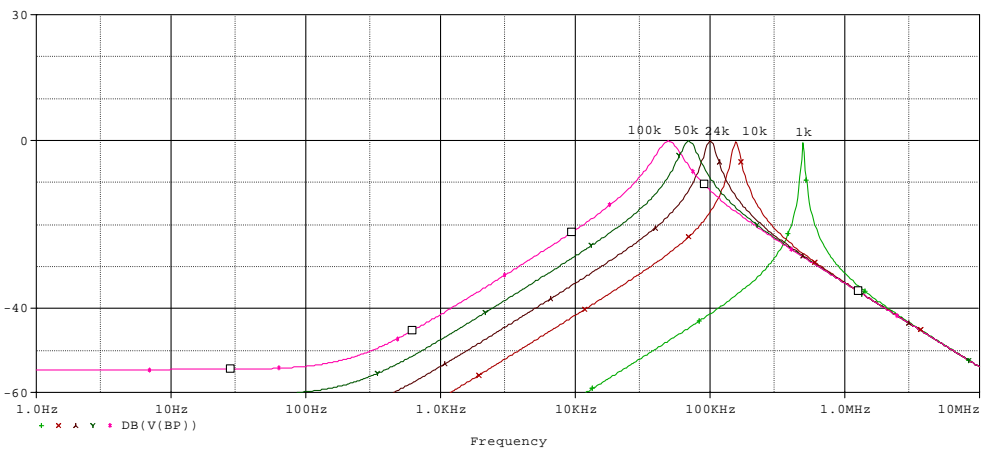


Obr.3.26 Simulace obvodu při změně  $R_2$

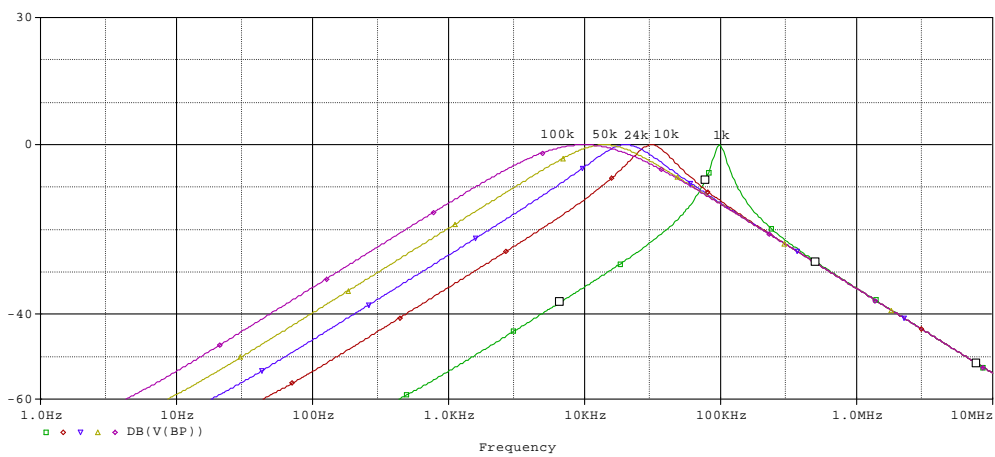
✓ Nastavování  $\omega_0$  při pevné šířce pásma (mění se  $Q$ )



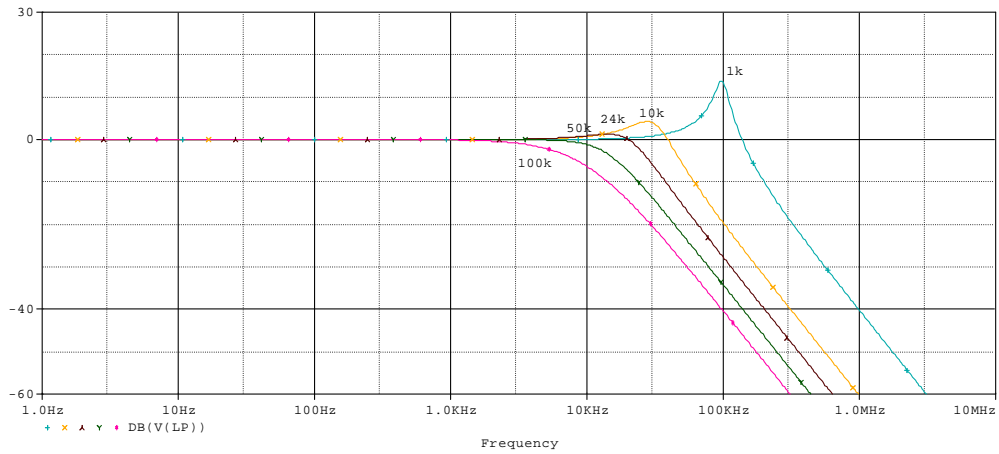
Obr.3.27 Simulace obvodu při změně  $R_3$



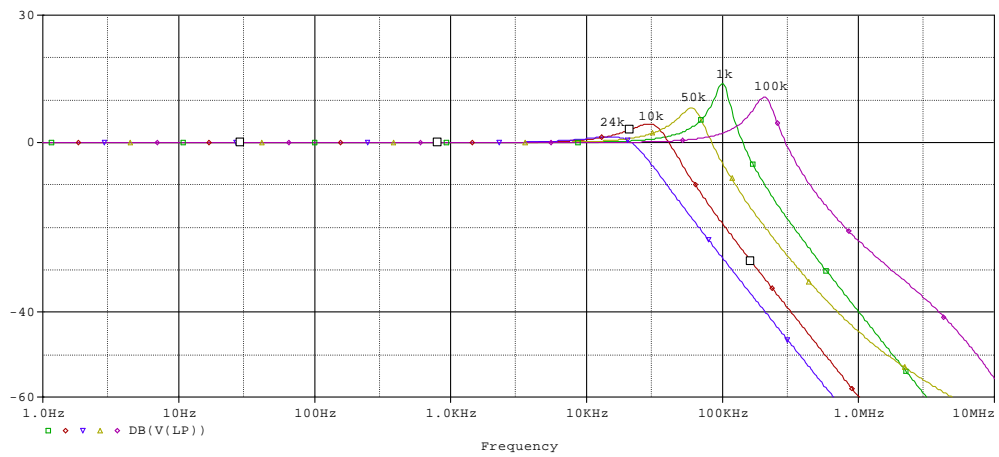
Obr.3.28 Simulace obvodu při změně  $R_3$



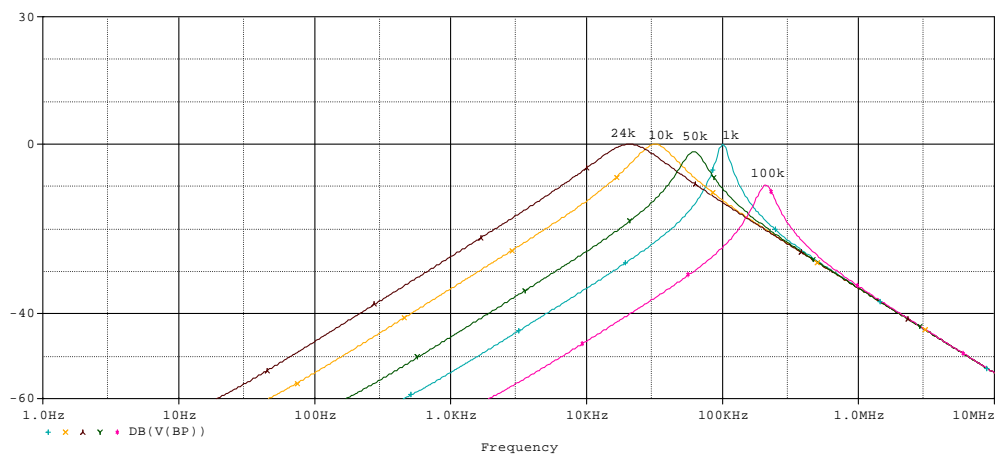
Obr.3.29 Simulace obvodu při změně  $R_4$



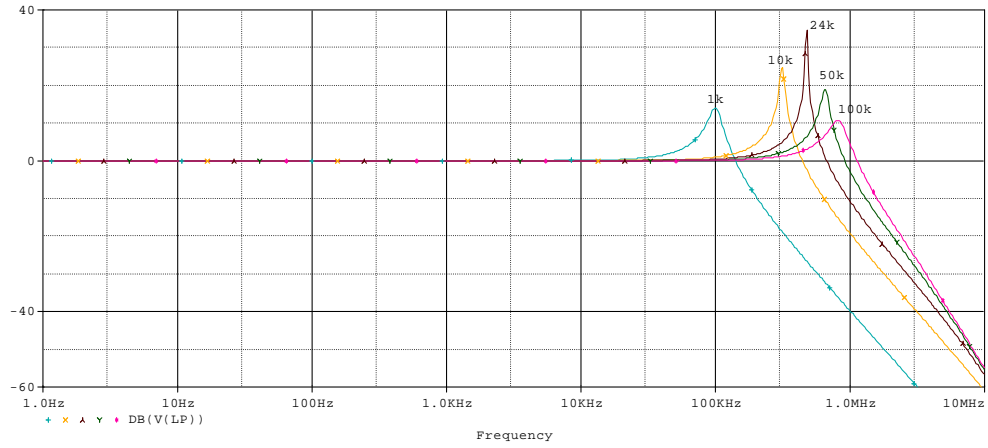
**Obr.3.30** Simulace obvodu při změně  $R_4$



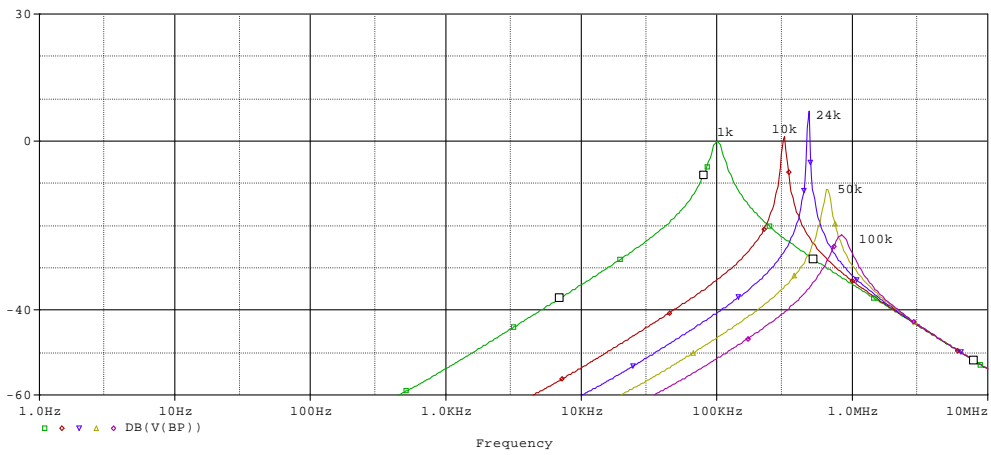
**Obr.3.31** Simulace obvodu při změně  $R_5$



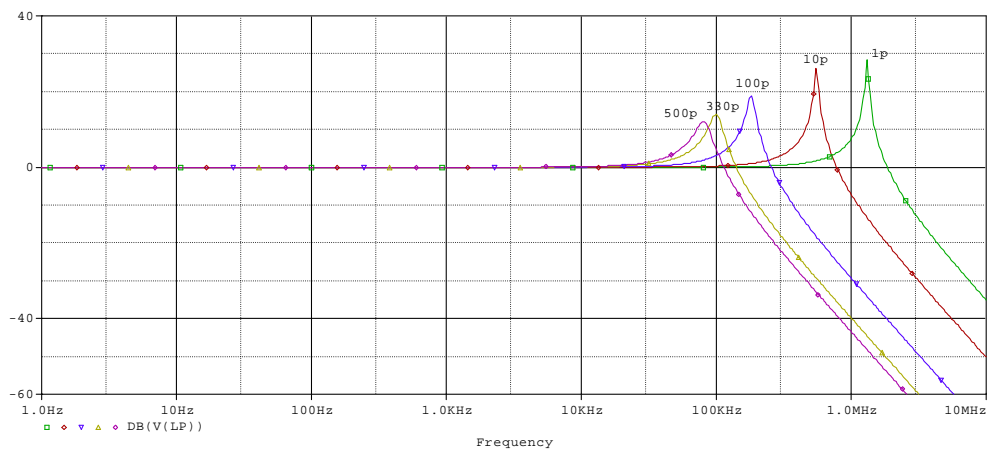
**Obr.3.32** Simulace obvodu při změně  $R_5$



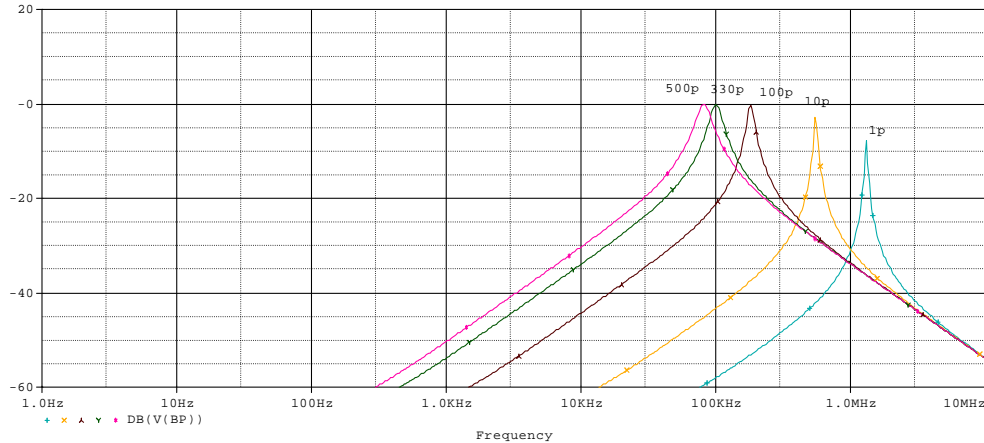
Obr.3.32 Simulace obvodu při změně  $R_6$



Obr.3.33 Simulace obvodu při změně  $R_6$



Obr.3.34 Simulace obvodu při změně  $C_2$



**Obr.3.35** Simulace obvodu při změně  $C_2$

Plynulé elektronické změny impedance součástek ve filtru je možné realizovat s využitím principu napěťového bootstrapu. Poté mají všechny součástky společnou vlastnost a to takovou, že jeden z vývodů je vždy připojen k virtuální zemi operačního zesilovače. Podložíme-li druhý z vývodů řízeným zdrojem napětí, dojde k transformaci skutečné impedance na virtuální hodnotu, která je závislá na napěťovém zisku řízeného zdroje.

Metody modifikace impedance pomocí ZNŘN s proměnným ziskem

Nyní můžeme provést analýzu obvodu který je nakreslen na obr.č.3.36. Obvod je popsán těmito rovnicemi:

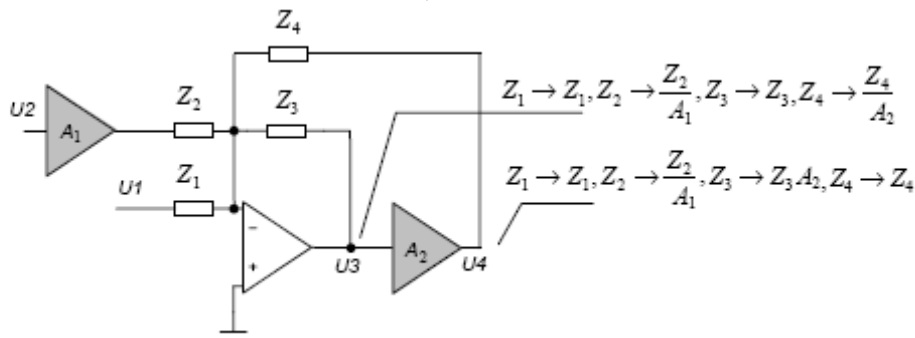
$$U_3 = -\frac{Z_3 + Z_4 / A_2}{Z_1} U_1 - \frac{Z_3 + Z_4 / A_2}{Z_2 / A_1} U_2 \quad (3.9)$$

$$U_4 = -\frac{Z_4 + Z_3 A_2}{Z_1} U_1 - \frac{Z_4 + Z_3 A_2}{Z_2 / A_1} U_2 \quad (3.10)$$

Jestliže chceme popisovat napěťové poměry, pak z hlediska vstupně-výstupního chování působí zesilovač A jako transformátor impedancí  $Z$  podle následujících vzorců:

$$Z \rightarrow \frac{Z}{A} \quad (3.11)$$

$$Z \rightarrow Z \cdot A$$



**Obr.3.36** Princip transformace impedancí působením VCVS

Výsledky těchto transformací se projeví podle toho, které napětí využíváme jako výstupní. Z obr.3.36 plyne, že pokud se týká transformace impedancí  $Z_3$  a  $Z_4$ , bude záviset na tom, zda uvažujeme-li výstupní napětí  $U_3$ , nebo zda využíváme k dalšímu zpracování výstup  $U_4$ .

Těmito způsoby lze zařazováním řízených zesilovačů napětí do různých větví filtru dělit a nebo násobit konkrétní impedance zesílením a tím způsobem dosáhnout požadovaného řízení parametrů filtru. Nyní si můžeme naznačit implementaci metod řízení označených v úvodu jako 1 a,b,c, 2 a,b,c, 3 a,b.

### Nastavování $\omega_0$ při pevném činiteli jakosti – metoda 1

Na obr.3.37 jsou uvedeny všechny tři varianty. Varianty a) a b) se liší jen umístěním řízeného zesilovače ve smyčce celkové zpětné vazby. Při synchronním řízení obou zesilovačů získáme přeladovanou pásmovou, resp. dolní propust s konstantním maximem přenosu, využíváme-li u varianty a) výstupy BP2 a LP2, u varianty b) BP a LP2. U varianty c) je přímo použit řízený zesilovač ve funkci zpětnovazebního zesilovače OPA3. Proto je toto zapojení ze všech uvedených nejekonomičtější. Využívané výstupy jsou BP2 a LP2.

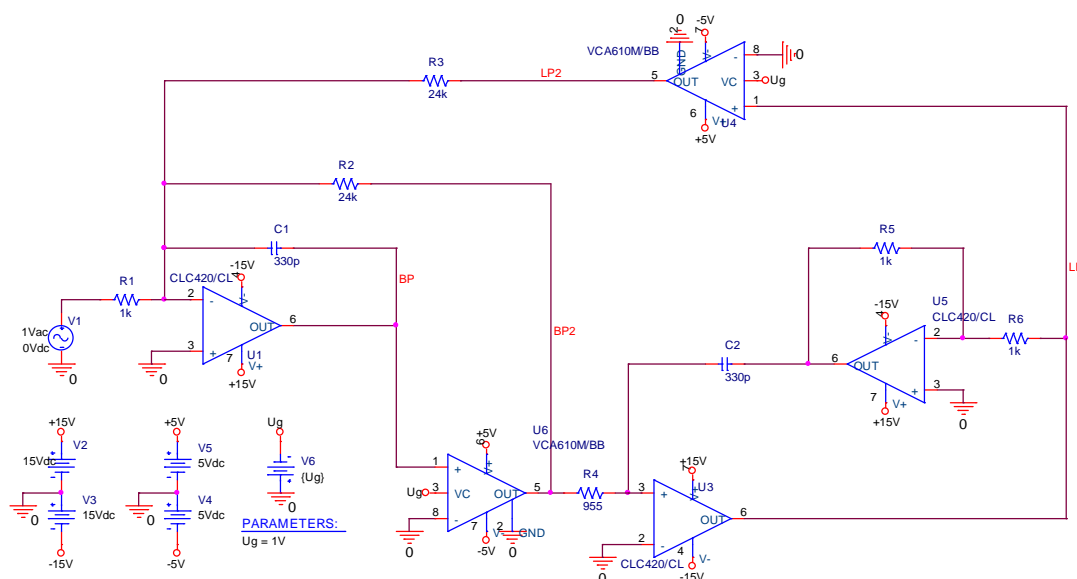
### Nastavování $\omega_0$ při pevné šířce pásma – metoda 2

Všechny varianty jsou opět uvedeny na obr.3.38. Varianta a) využívá modifikaci integrační kapacity  $C_2$ . Pak se kmitočet přeladuje s druhou odmocninou zesílení  $A$ . Pomocné zesilovače se získkem  $1/A$  transformují  $R_3$  a  $R_4$  tak, že se zvětšuje dynamika přeladění. Varianta b) využívá jediného řízeného zesilovače, ovšem rovněž s malou dynamikou přeladění. Varianta c) představuje její rozšíření, kdy větší dynamiky se dosáhne náhradou zesilovače OPA3 řízeným zesilovačem.

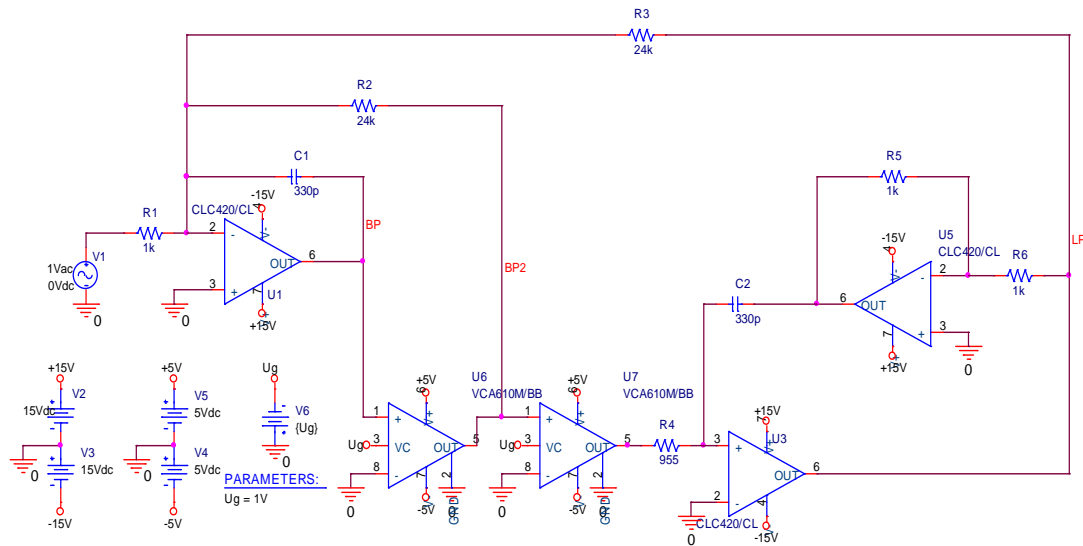
### Nastavování $Q$ , resp. $B$ při konstantním $\omega_0$ – metoda 3

Dvě varianty jsou na obr.3.39. Varianta a) je úspornější, protože vyžaduje jediný řízený zesilovač.

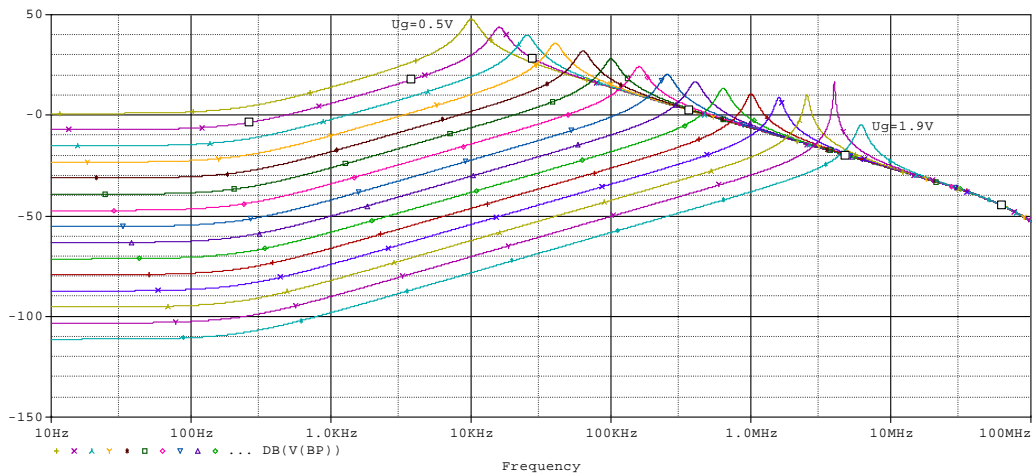
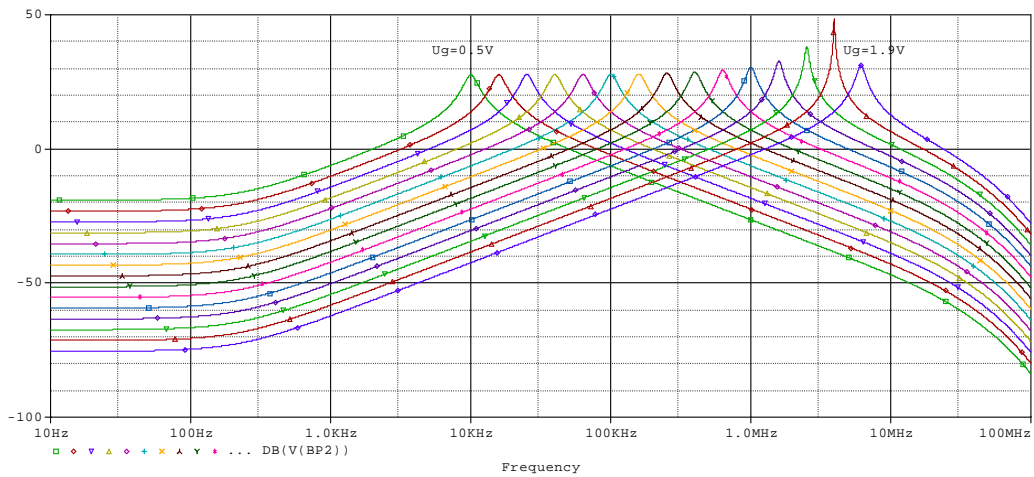
#### ➤ Přeladování $\omega_0$ při konstantním činiteli jakosti metodami 1a, b, c

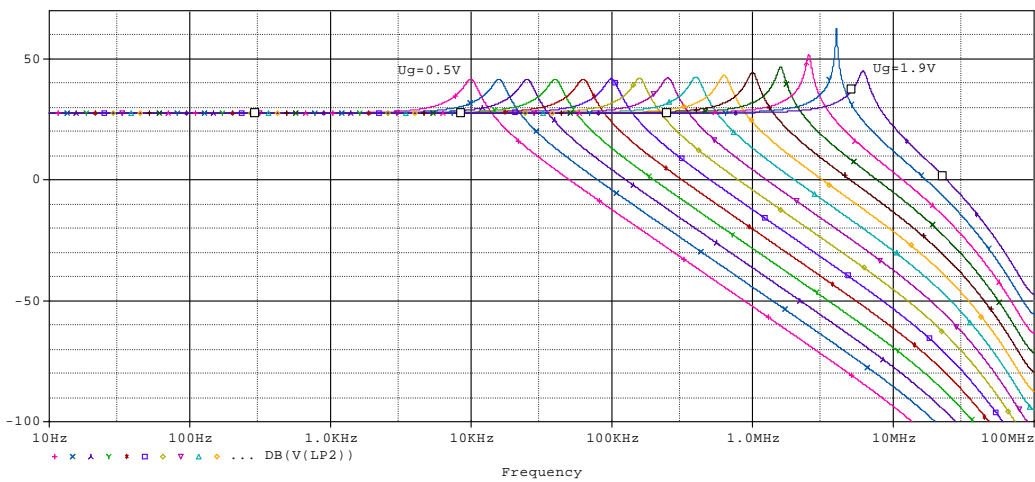
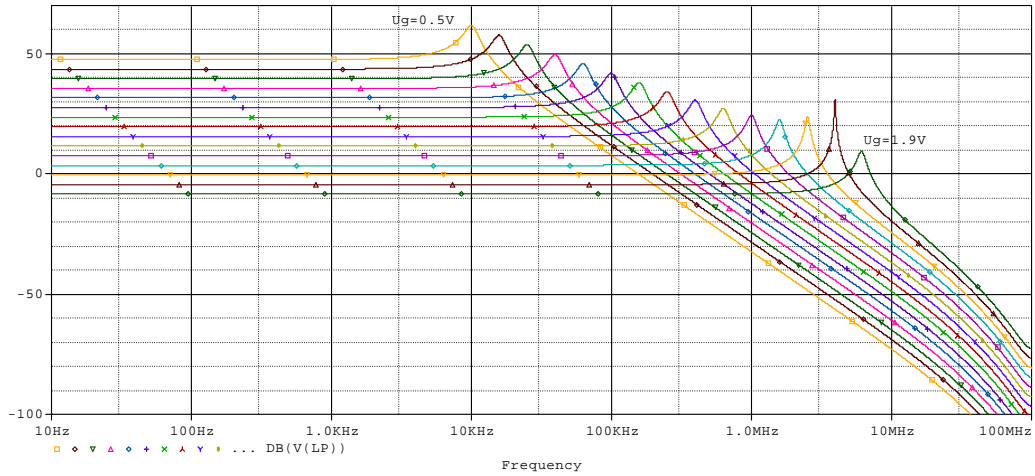


**Obr.3.37** Schéma zapojení struktury Ackerberg-Mossberg, přeladování  $\omega_0$  při konstantním činiteli jakosti metoda 1a

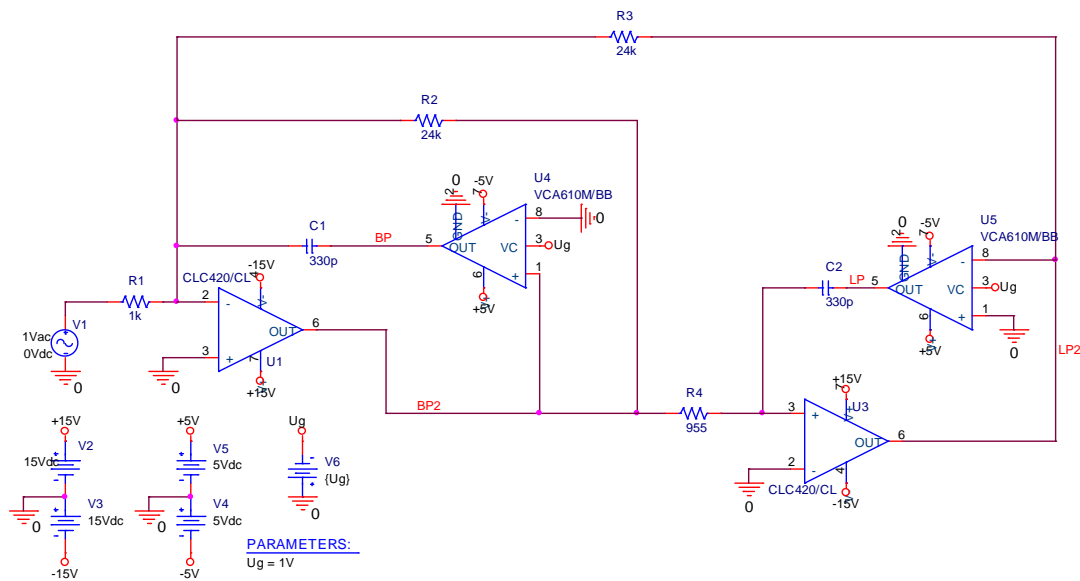


**Obr.3.38** Schéma zapojení struktury Ackerberg-Mossberg, přeladování  $\omega_0$  při konstantním činiteli jakosti metoda 1b

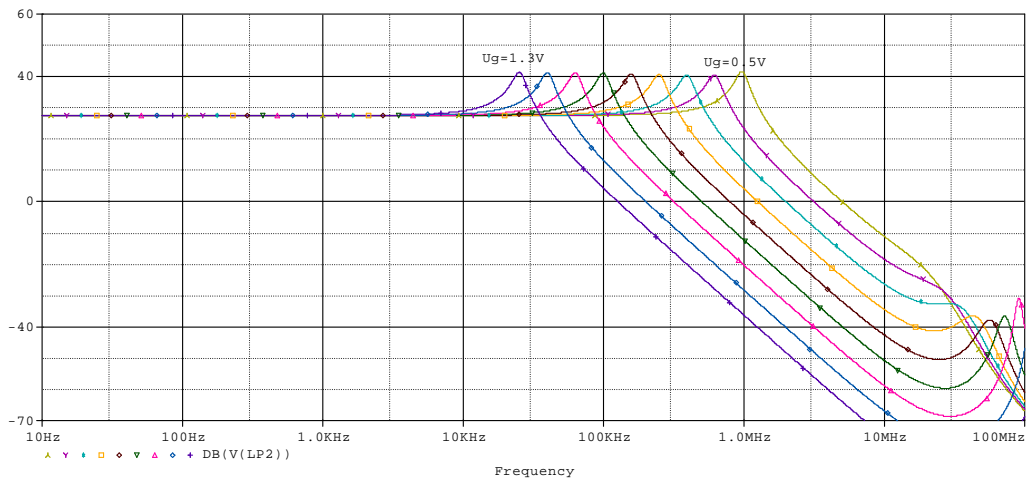
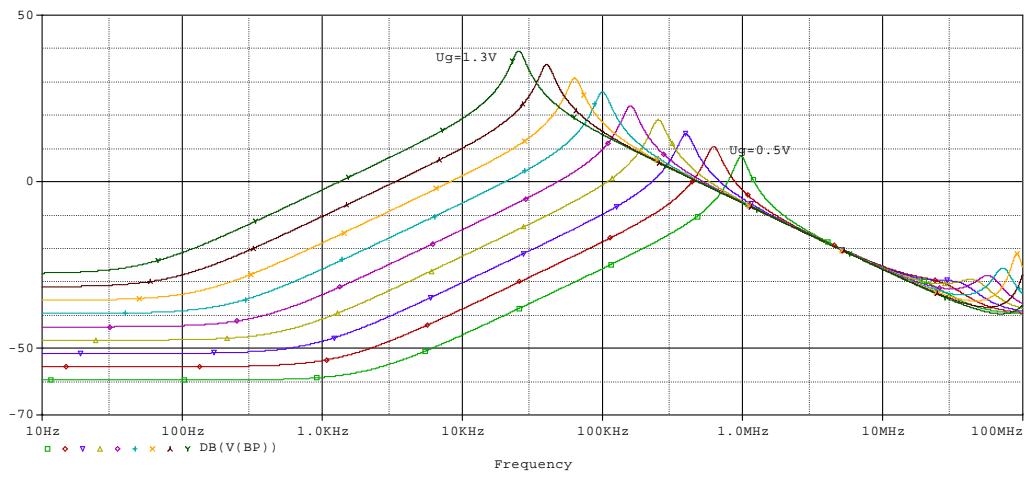
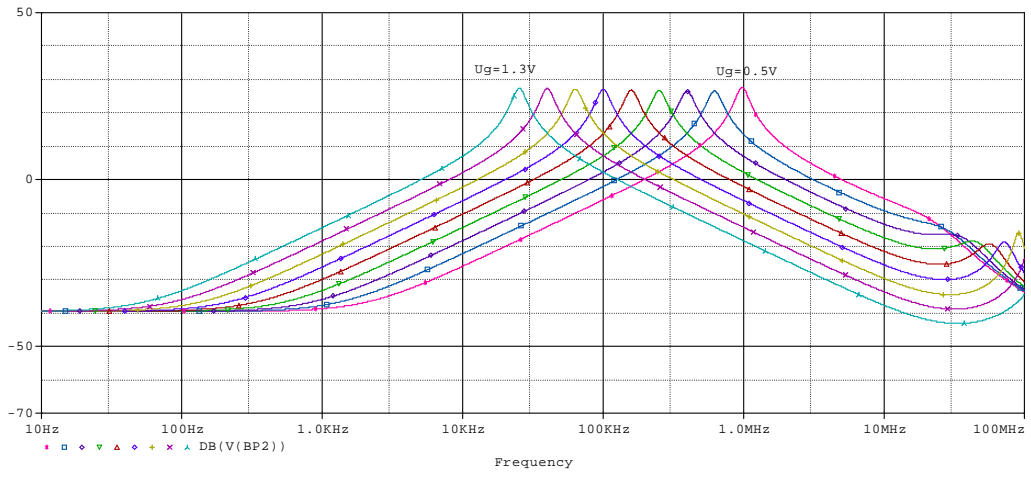


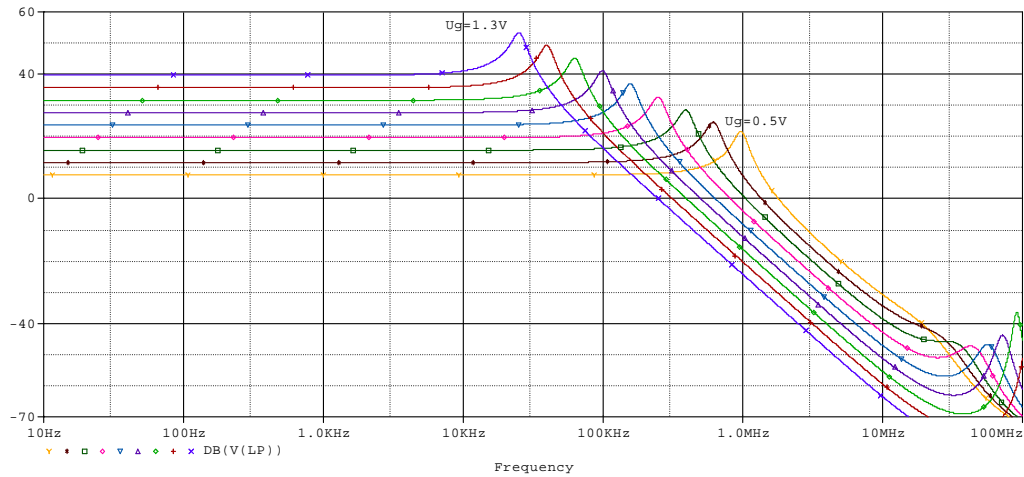


Obr.3.39 Simulace obvodů na obrázcích 3.37 a 3.38 programem Spice



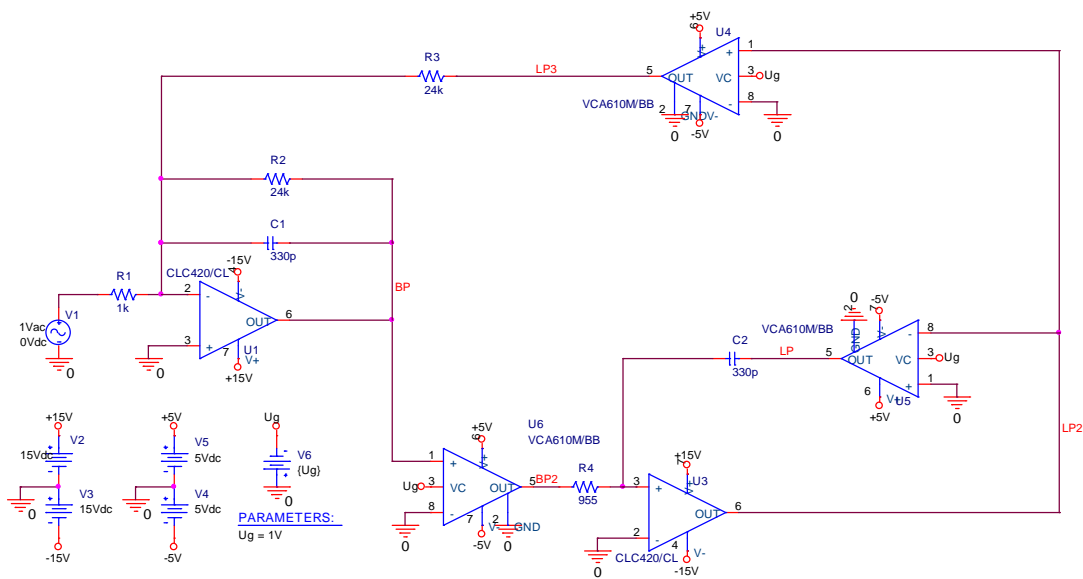
Obr.3.40 Schéma zapojení struktury Ackerberg-Mossberg, přeladování  $\omega_0$  při konstantním činiteli jakosti metoda 1c



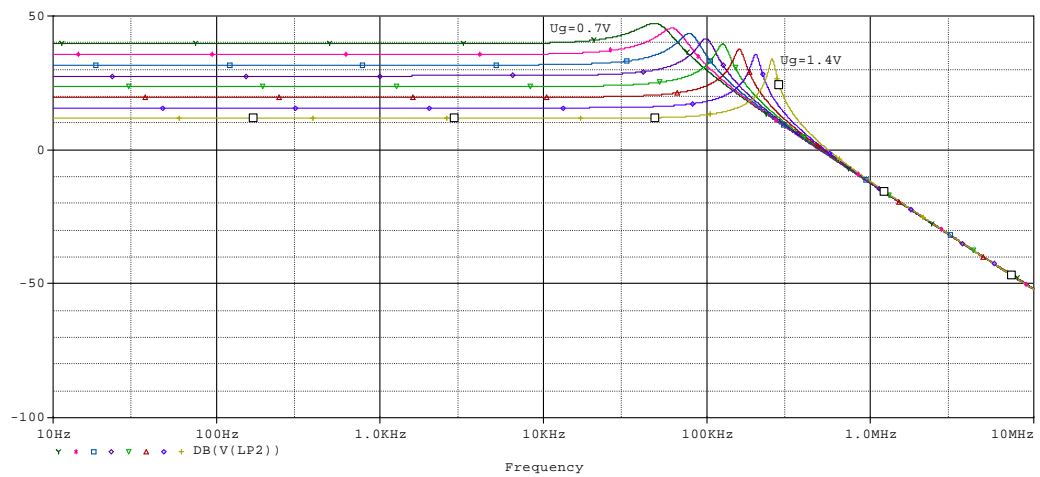
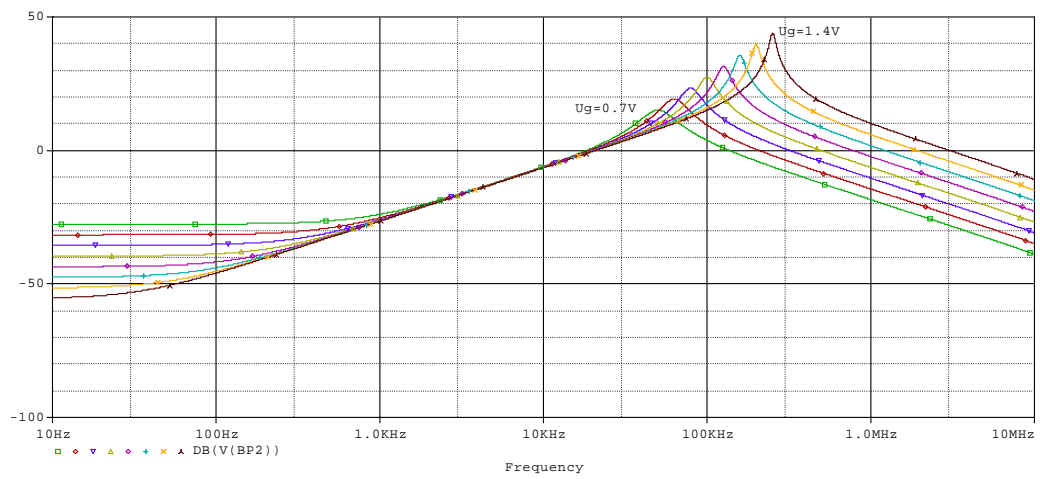
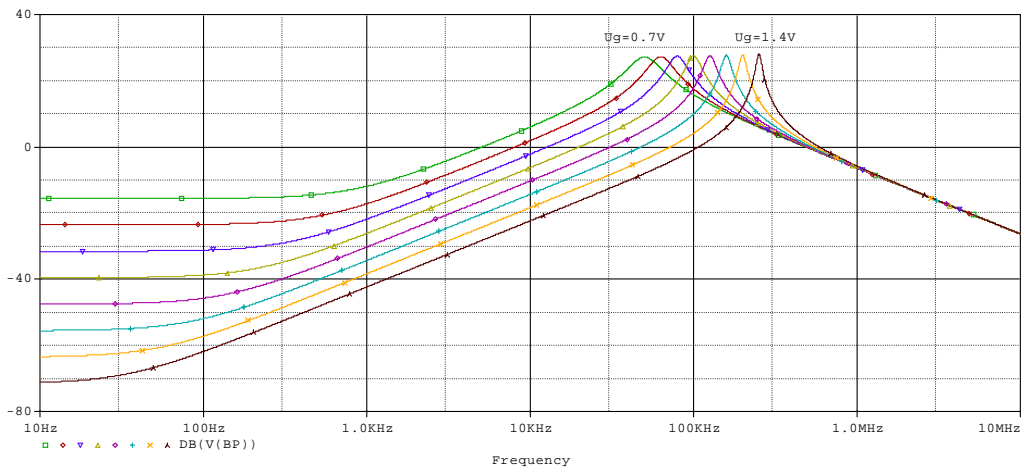


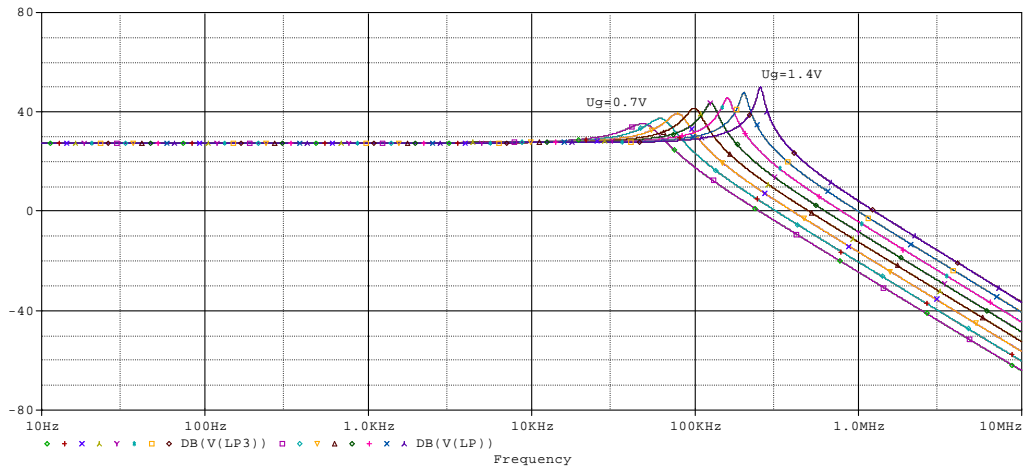
**Obr.3.41** Simulace obvodu na obrázku 3.40 programem Spice

➤ Přeladování  $\omega_0$  při konstantní šířce pásma metodami 2a, b, c

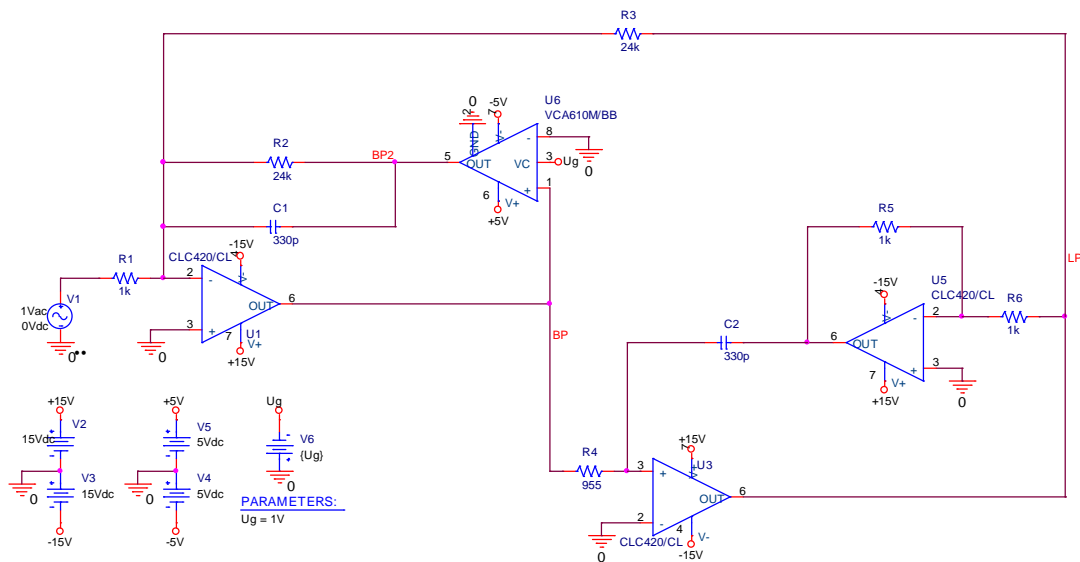


**Obr.3.42** Schéma zapojení struktury Ackerberg-Mossberg, přeladování  $\omega_0$  při konstantní šířce pásma metoda 2a

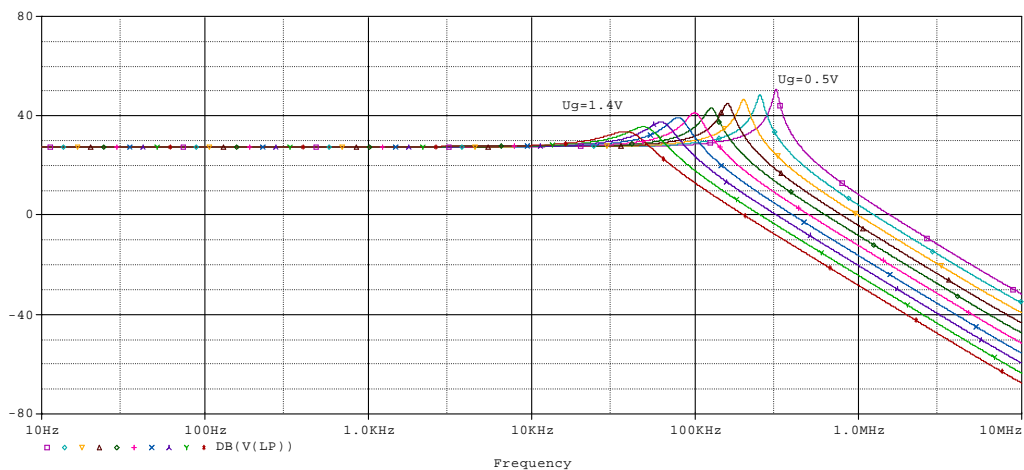


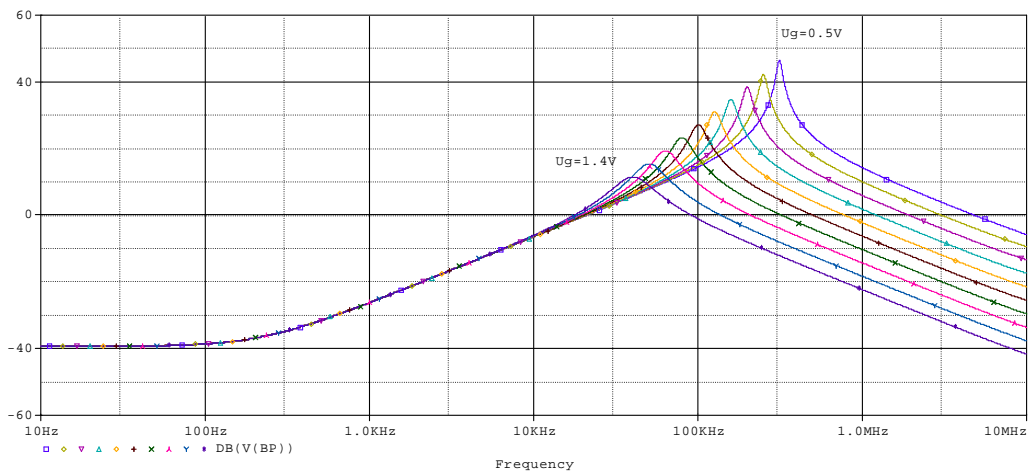
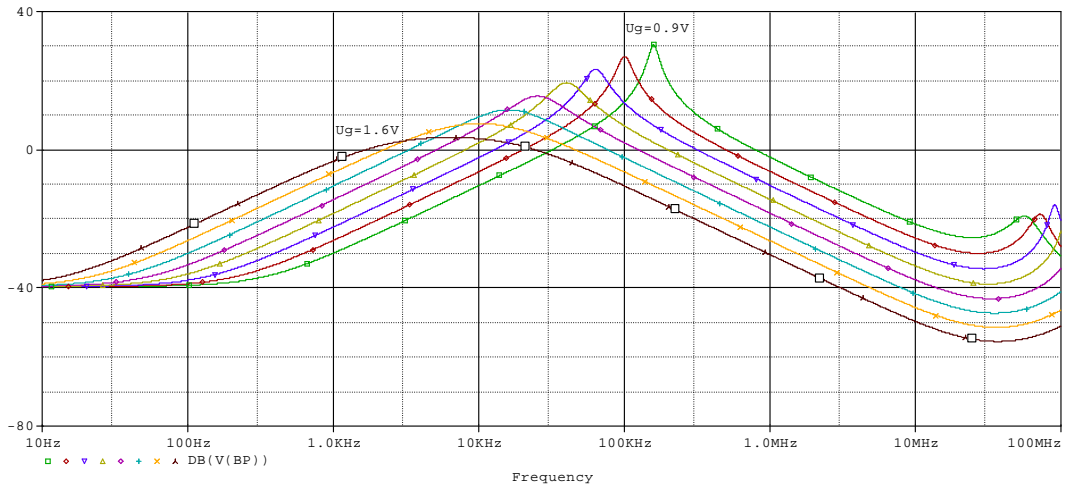
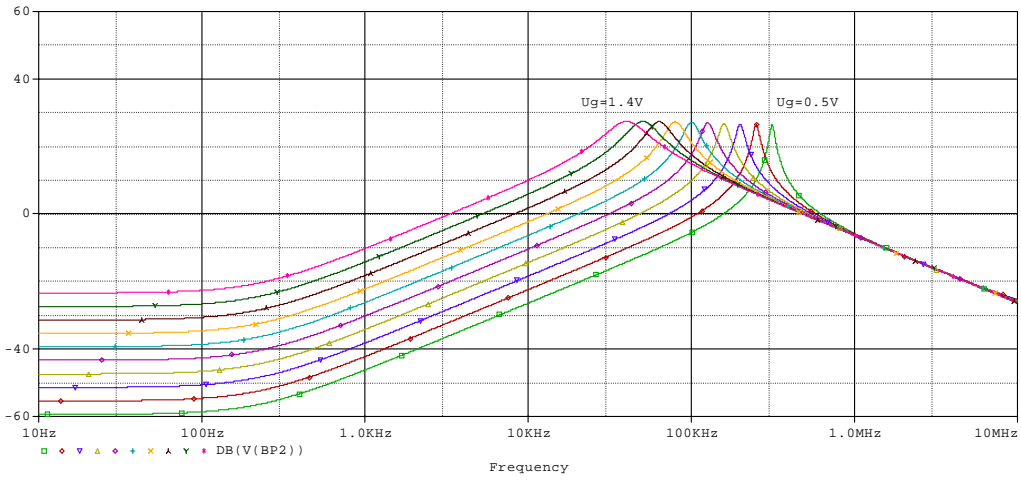


Obr.3.43 Simulace obvodu na obrázku 3.42 programem Spice

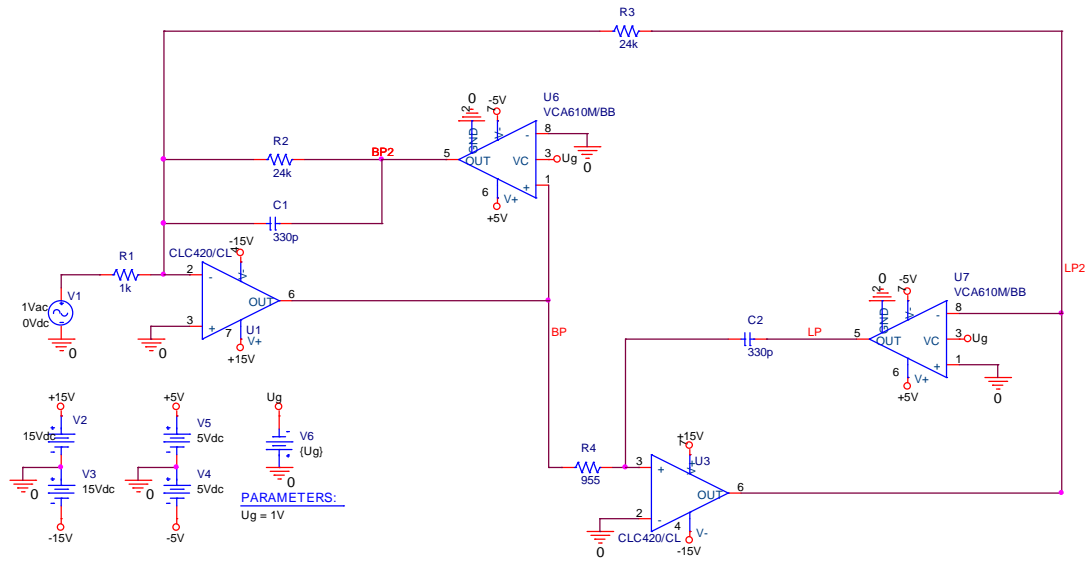


Obr.3.44 Schéma zapojení struktury Ackerberg-Mossberg, přeladování  $\omega_0$  při konstantní šířce pásma metoda 2b

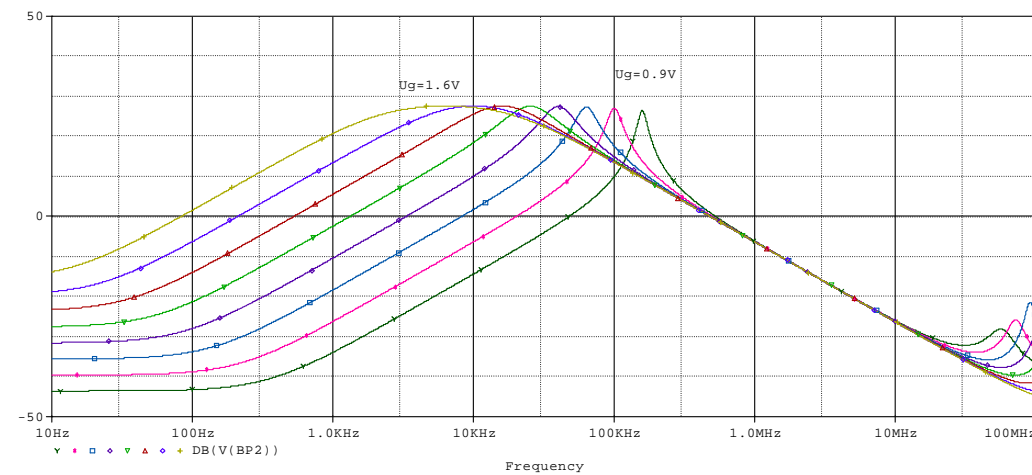
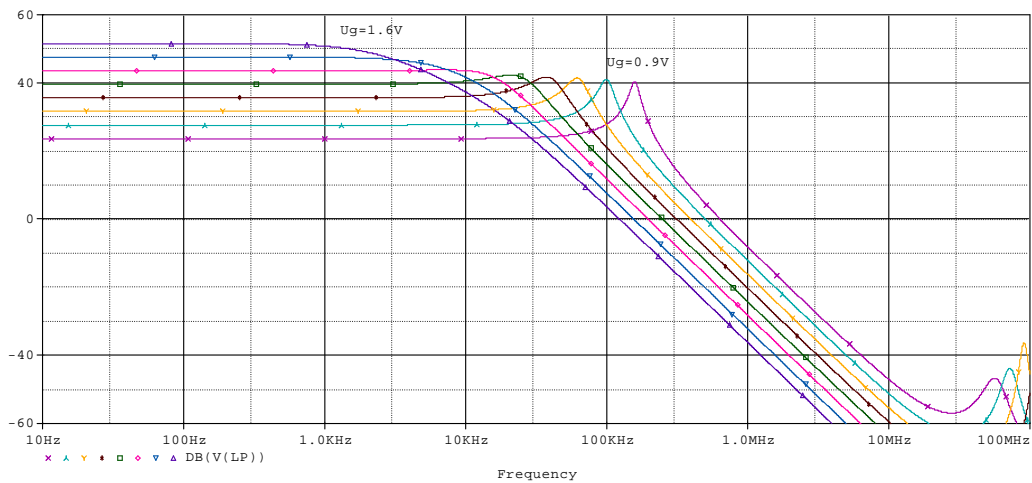


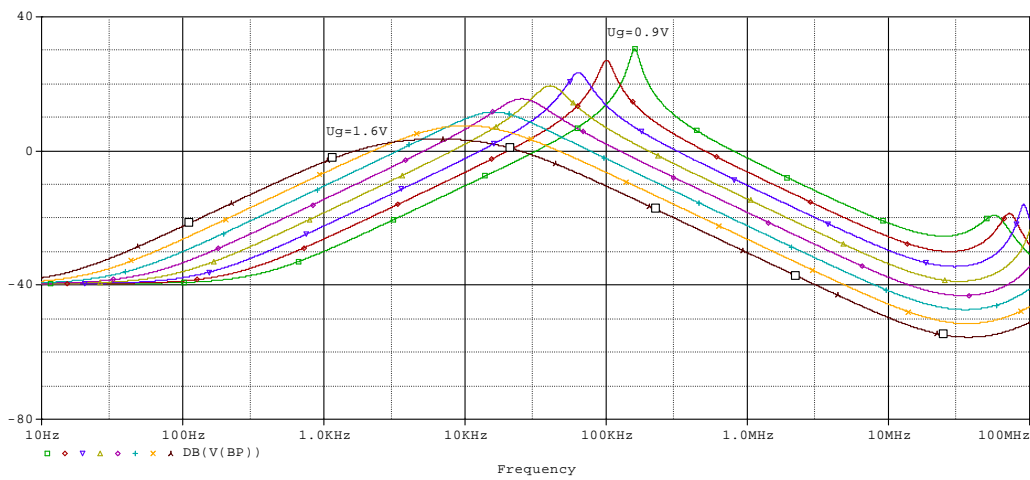
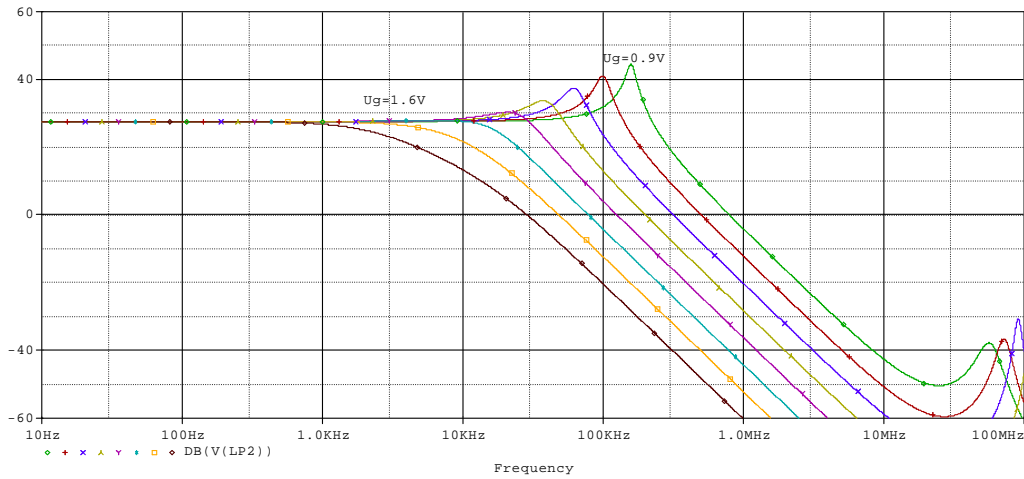


Obr.3.45 Simulace obvodu na obrázku 3.44 programem Spice



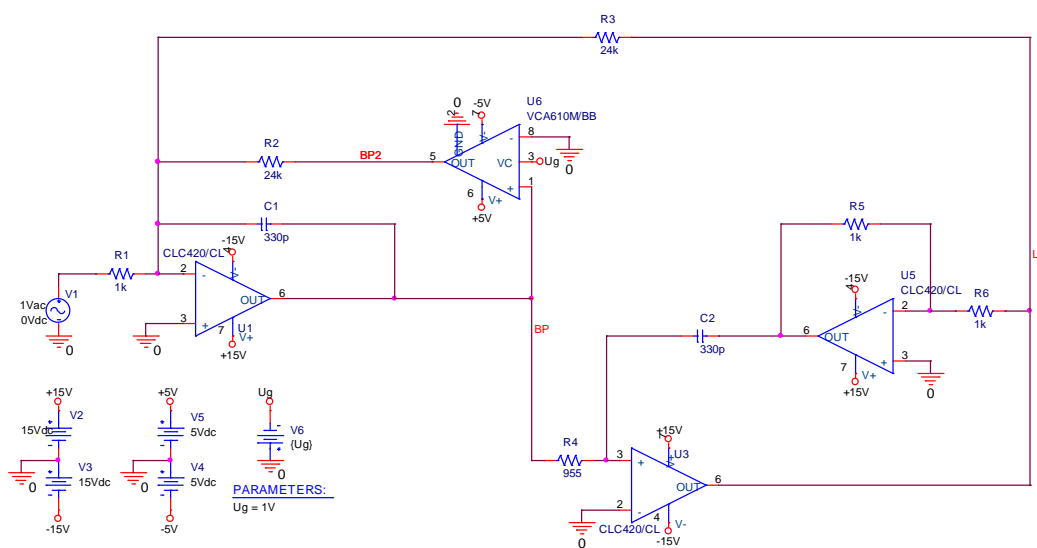
**Obr.3.46** Schéma zapojení struktury Ackerberg-Mossberg, přeladování  $\omega_0$  při konstantní šířce pásma metoda 2c



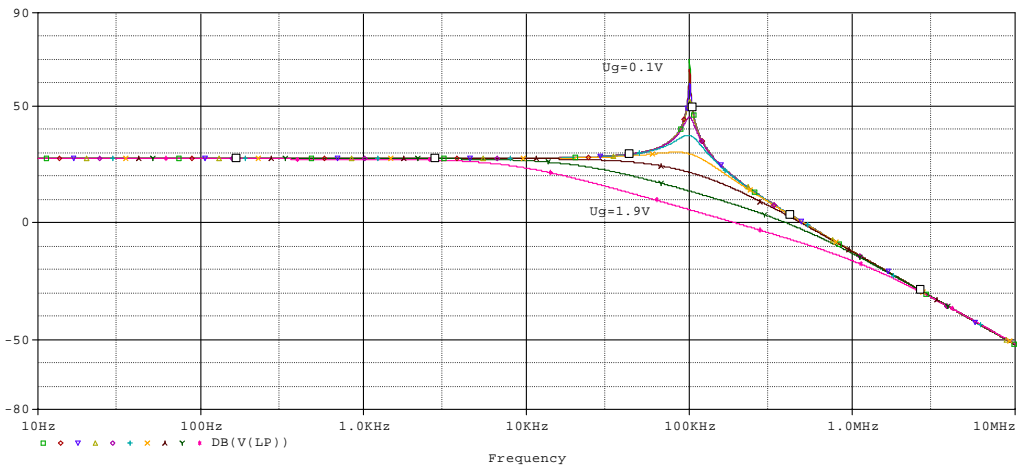
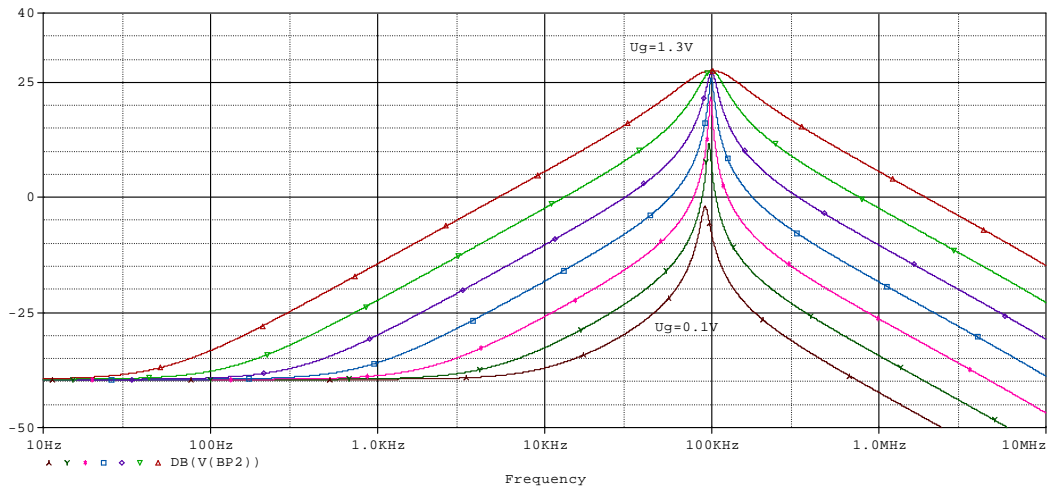
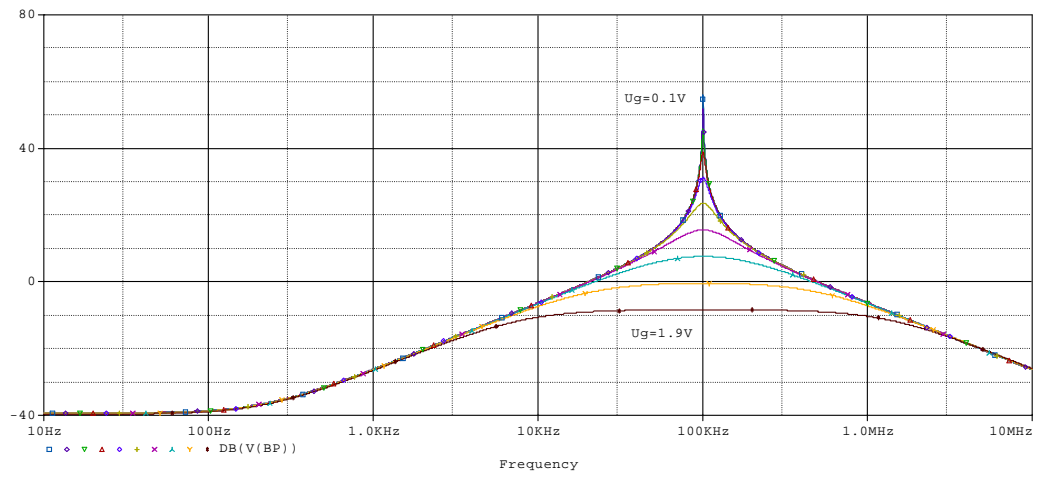


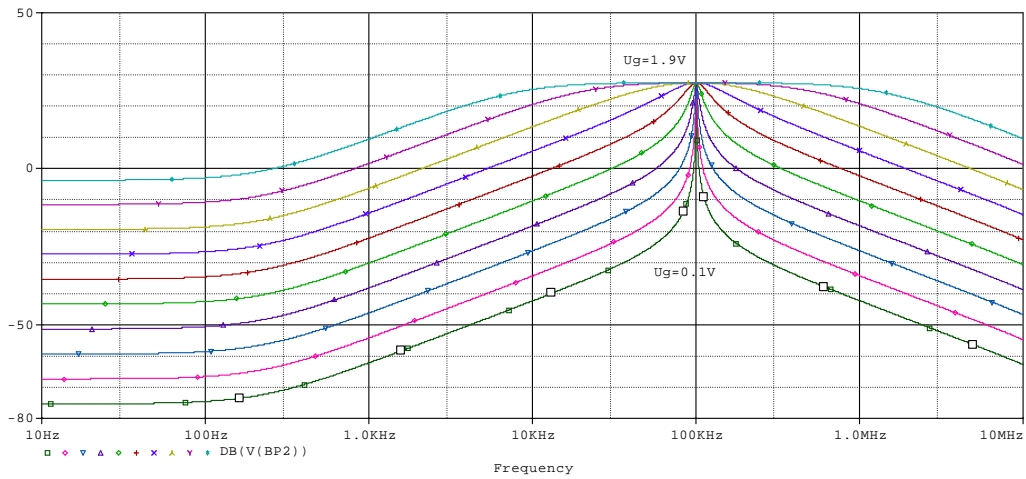
**Obr.3.47** Simulace obvodu na obrázku 3.46 programem Spice

➤ Změna šířky pásma při konstantním  $\omega_0$  metodami 3a, b

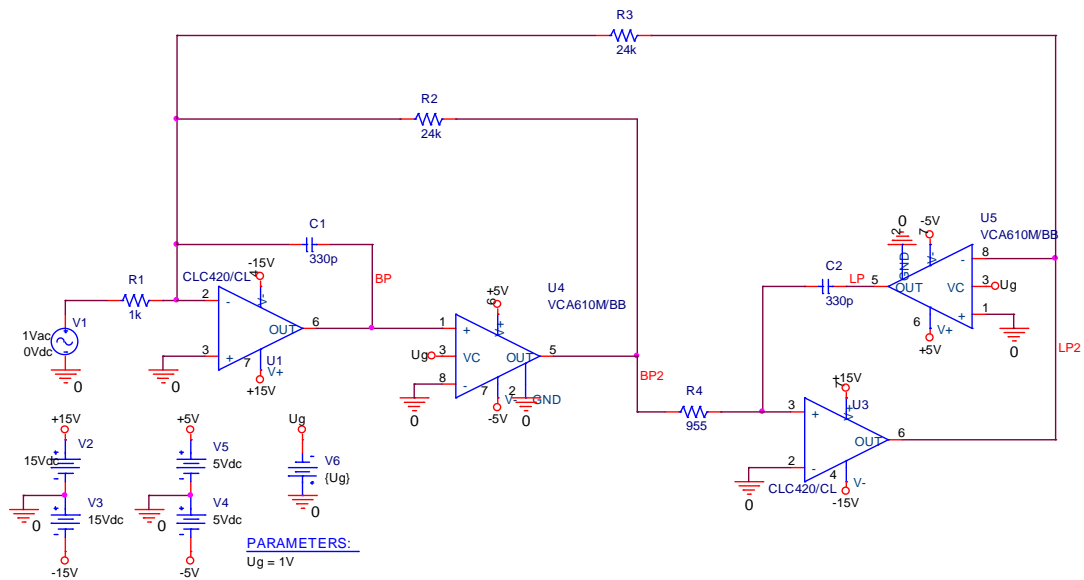


**Obr.3.48** Schéma zapojení struktury Ackerberg-Mossberg, změna šířky pásma při konstantním  $\omega_0$  metoda 3a

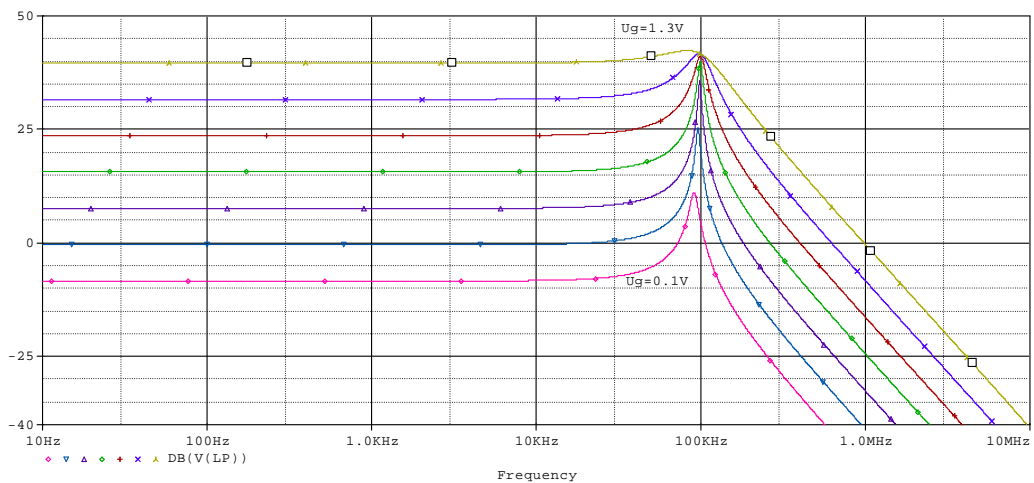


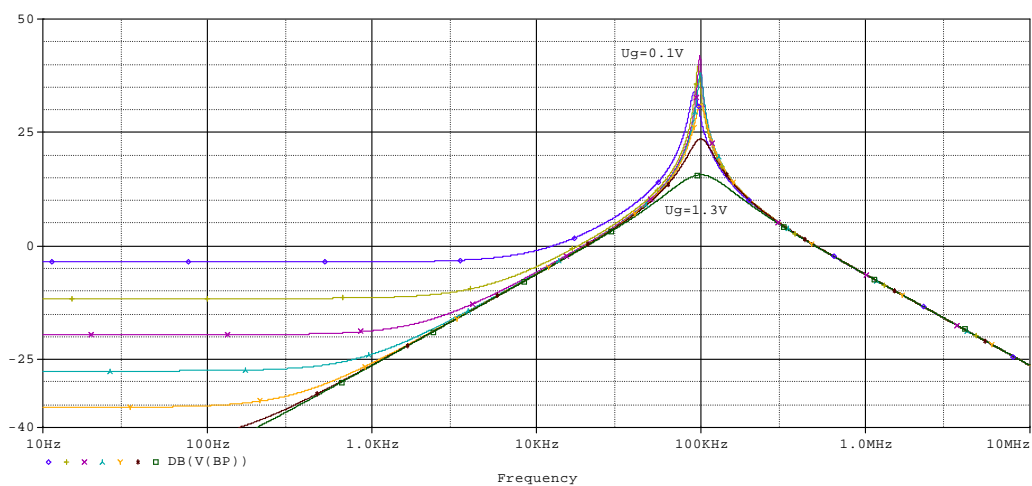
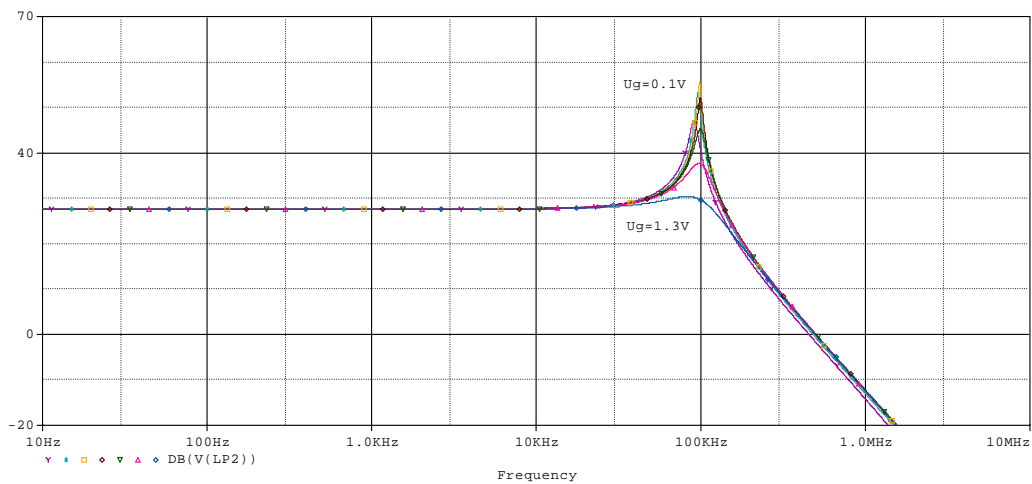


Obr.3.49 Simulace obvodu na obrázku 3.48 programem Spice



Obr.3.50 Schéma zapojení struktury Ackerberg-Mossberg, změna šířky pásma při konstantním  $\omega_0$  metoda 3b





**Obr.3.51** Simulace obvodu na obrázku 3.50 programem Spice

Ověřování proběhlo na úrovni počítačové simulace s využitím modelů SPICE. Řízené zesilovače byly realizovány obvodem VCA 610 firmy Burr-Brown, pevné zesilovače pak obvody CLC 420. Při řízení podle zákona  $A_e <0.01, 100>$  lze teoreticky dosáhnout přeladění od 1kHz do 10MHz. Na hranicích přeladovaného pásma se však uplatňují reálné vlivy, které vedou m.j. na problém se stabilitou. Nejméně náchylné jsou varianty 1a a 3a. Určité zesilovače jsou nepovinné a slouží k zvětšení dynamiky přeladění.

### 3.5 UNIVERSÁLNÍ DIGITÁLNĚ ŘÍZENÝ FILTR

Vzhledem k tomu, že požadavky na předzpracování analogového signálu narůstají, je třeba vyvinout více možností, jak dosáhnout řízení frekvence filtrů. Nejjednodušší aplikace používají standardní dolní a horní propusti filtrů ASC, které jsou laděny přepínáním řízené frekvence. V případech, kdy nelze použít ASC filtry, jsou používány regulovatelné „continue time“ filtry.

Vzrůstající složitost předzpracování analogového signálu vyžaduje univerzální řízené filtrování, přičemž je třeba použít nejen LP a HP filtrů, ale také pásmovou propust a pásmovou zadrž při různých hodnotách aproximací. V některých případech je nutné využít nestandardní přenosové funkce. Rovněž dochází ke zvyšování rychlosti zpracování a tím pádem požadavky na analogový filtr vyžadují vhodné řízení. K tomuto účelu je nutný univerzální analogový filtr s digitálním řízením.

*Základní koncepce univerzálně řízených filtrů.* V první řadě musíme zvážit výběr typu filtru. Nejvýhodnější je použít strukturu s kaskádním spojením prvního a druhého řádu, tedy univerzální blok, protože umožňuje jednoduché řízení přenosové funkce viz vzorec 3.9. Může být vyjádřena jako:

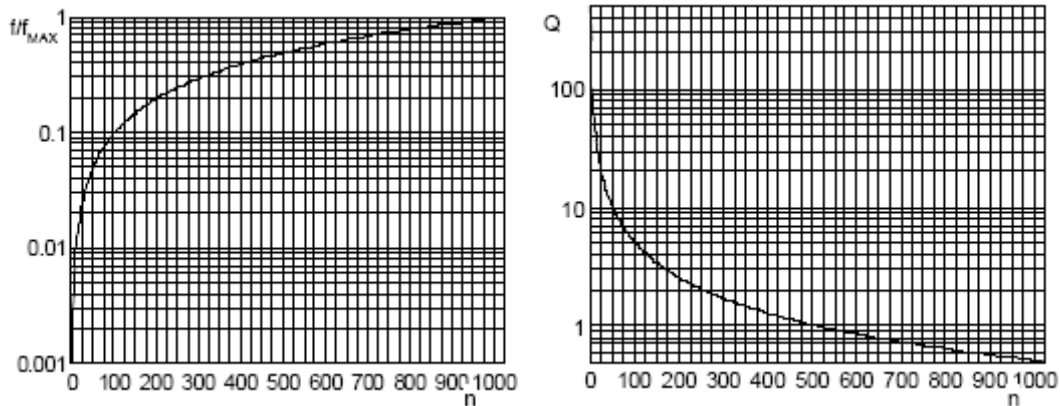
$$H(s) = \frac{B_{(m+1)}s + C_{(m+1)}}{s + \omega_{0(m+1)}} \cdot \prod_{i=1}^m \frac{A_i s^2 + B_i s + C_i}{s^2 + s\omega_{0i}/Q_i + \omega_{0i}^2} \quad (3.9)$$

Za této podmínky můžeme určit další možnosti.

- Frekvenční pásmo 1Hz - 100 kHz je třeba rozdělit do několika podpásem, obvykle po desetínách. Spodní pásmo může být sníženo, pokud použijeme dostatečného kondenzátoru nebo děliče napětí. Horní pásmo závisí na maximální hodnotě Q a je určováno více faktory.
- Pro přesnost a preciznost nastavení frekvence je třeba použít maximální hodnoty Q. Náš limit  $Q_{\max} = 50$  vyžaduje nastavení s přesností 0,5 - 1%.
- Rozsah nastavení hodnoty Q je omezen zvláště pro horní část frekvenčního pásma. Po zohlednění různých faktorů jako: stabilita a kvalita prvků, můžeme použít maximální hodnotu  $Q = 50 - 100$  jako základní požadavek pro filtraci.
- Kromě extrémních podmínek není typ přenosové funkce omezen. Je možné uvažovat všechny typy základních filtrů LP, HP, PP, PZ a nestandardní přenosové funkce.
- Pořadí filtrů je limitováno maximálními použitelnými hodnotami, nastavením citlivostí a citlivostí prvků. Je možné uvažovat 11. až 15. řád filtru s využitím řádu 2. bloku a 1. bloku.
- Je nutné kontrolovat koeficienty v čitateli A, B, a C v různých pořadích, které odpovídají požadavkům přenosné funkce.

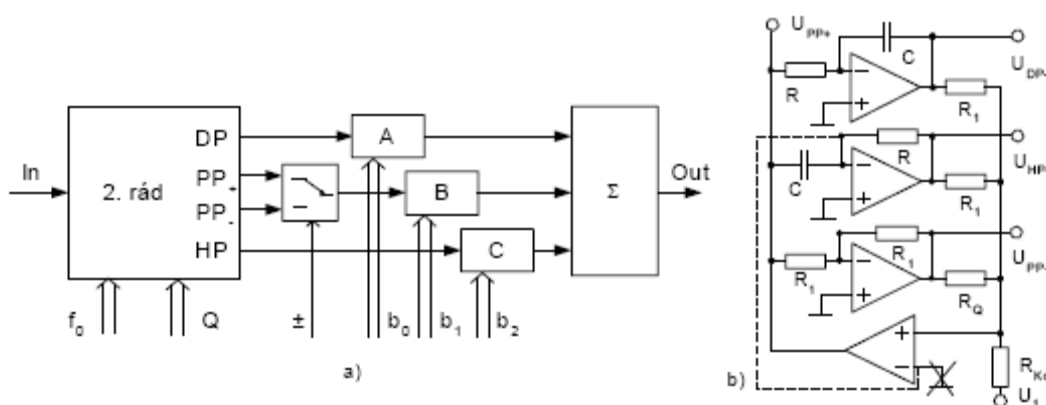
*Výběr ovládaných prvků.* Pro řízení ovládaných hodnot prvků je možné použít různých principů. Tyto principy můžeme rozdělit do tří skupin. Velmi jednoduchým principem je ovládání pomocí změny přepínání frekvence ASC filtrů. Tento princip není vhodný pro všechny univerzální filtry a má řadu nevýhod. Ve druhé skupině je používáno analogové ovládání od jednoduchých verzí (fotoelektrický odpor) ke složitějším (OTA, VCA zesilovač, atd.). Ovládání těchto prvků pomocí analogového signálu je poměrně jednoduché, rychlé a probíhá s neomezenou přesností. Na druhé straně toto řízení není úplně přesné, má nízkou linearitu a stabilitu. Rovněž dochází velmi často ke snižování dynamiky. Třetí skupina se zdá být pro zkoumaný účel nejvhodnější. V rámci této skupiny jsou využívány digitálně ovládané rezistory nebo vodiče, které jsou realizovány jako čtyřkvadrantové D-A měniče a speciální digitální potenciometry. Toto ovládání má vysokou stabilitu a linearitu. Oba typy prvků mají

negativní vliv na parazitní kapacitní odpor. D-A měniče mají vysokou hodnotu odporu minimálně 10 k $\Omega$ , což omezuje maximální užití kmitočtového pásma. Digitální potenciometry mají omezené pásmo ovládání – obvykle 8 bitů, někdy 10 bitů. Výběr desetinného intervalu a požadavek 1% přesnosti vyžaduje použití 10 bitového digitálního ovládání, protože použití 8 bitů je spojeno se 4 % přesností desetinného intervalu. Proto základním kritériem ovládání prvků bude použití 10 bitů. Rozbor požadovaného rozsahu a přesnosti digitálně ovládaných základních parametrů  $\omega_0$  a  $Q$  s použitím 10 bitového A-D měniče je znázorněn na obrázku číslo 3.52. Jak je vidět přesnost a linearita ovládané frekvence v horním desetinném rozmezí je přijatelná. Rovněž ovládání jmenovatele  $Q$  v rozmezí 0,5- 50 je přijatelné, nicméně je možné rozdělit ji do dvou intervalů. Stejně výsledky můžeme získat pro ovládání parametrů A, B a C v čitateli.



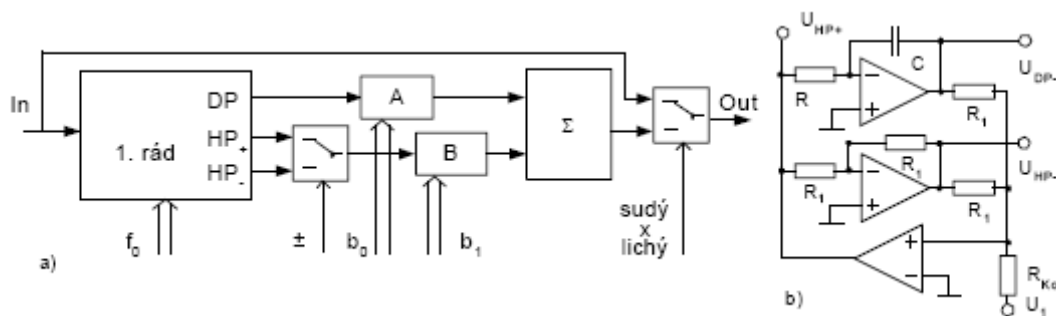
**Obr.3.52** Závislost  $f_0$  a  $Q$  na  $n$  [4]

*Koncepce uspořádání bloků 1. a 2. řádu.* Uspořádání bloků 1. a 2. řádu musí odpovídat základní koncepci vyjádřené v rovnici v této kapitole. Proto koncepce uspořádání pořadí bloku 2. řádu je sestavena podle obrázku č.3.53. Základní koeficienty  $\omega_0$  a  $Q$  jsou ovládány přímo v univerzálním bloku 2. řádu a koeficienty v čitateli A, B a C jsou ovládány pomocí pomocných zesilovačů. V praxi parazitní kapacitní odpor digitálně ovládané vodivosti (D-A měnič) způsobuje problémy pro hodnotu  $Q$  a vysokou frekvenci. Proto je třeba ji minimalizovat použitím OZ s maximální GBP hodnotou.



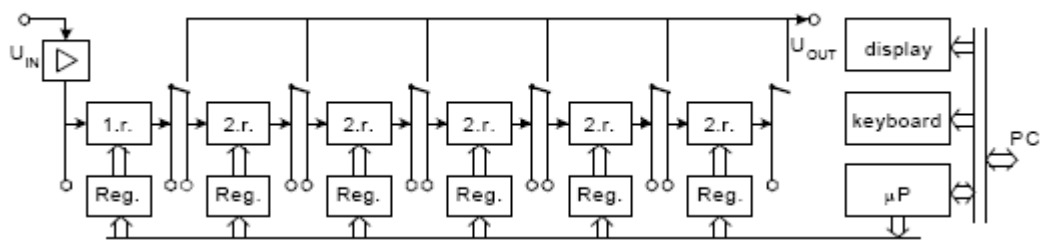
**Obr.3.53** Blokové schéma univerzálního řízeného bloku 2.řádu a obvodové schéma Ackerberg-Mossberg [4]

Koncepce uspořádání bloků 1. řádu je jednodušší, protože obsahuje menší počet ovládaných koeficientů, jak je patrné na obrázku č.3.54.



**Obr.3.54** Blokové schéma univerzálního řízeného bloku 1.řádu a obvodové schéma Ackerberg-Mossberg [4]

*Spojení, kontrola a realizace celého univerzálních filtrů.* Blokové schéma celého filtru je znázorněno na obrázku č.3.55. Úroveň signálu může být nastavena vstupním zesilovačem. Blok 1. řádu a 5 bloků 2. řádu je uspořádáno za sebou, nicméně každý blok může být užit samostatně. Toto ovládání je zajištěno sériovou sběrnicí, protože každý blok má individuální registr. Celý filtr je ovládán mikroprocesorem, což znamená že může být nezávisle nastaven klávesnicí nebo spolupracovat s hlavním počítačem pomocí sběrnice.



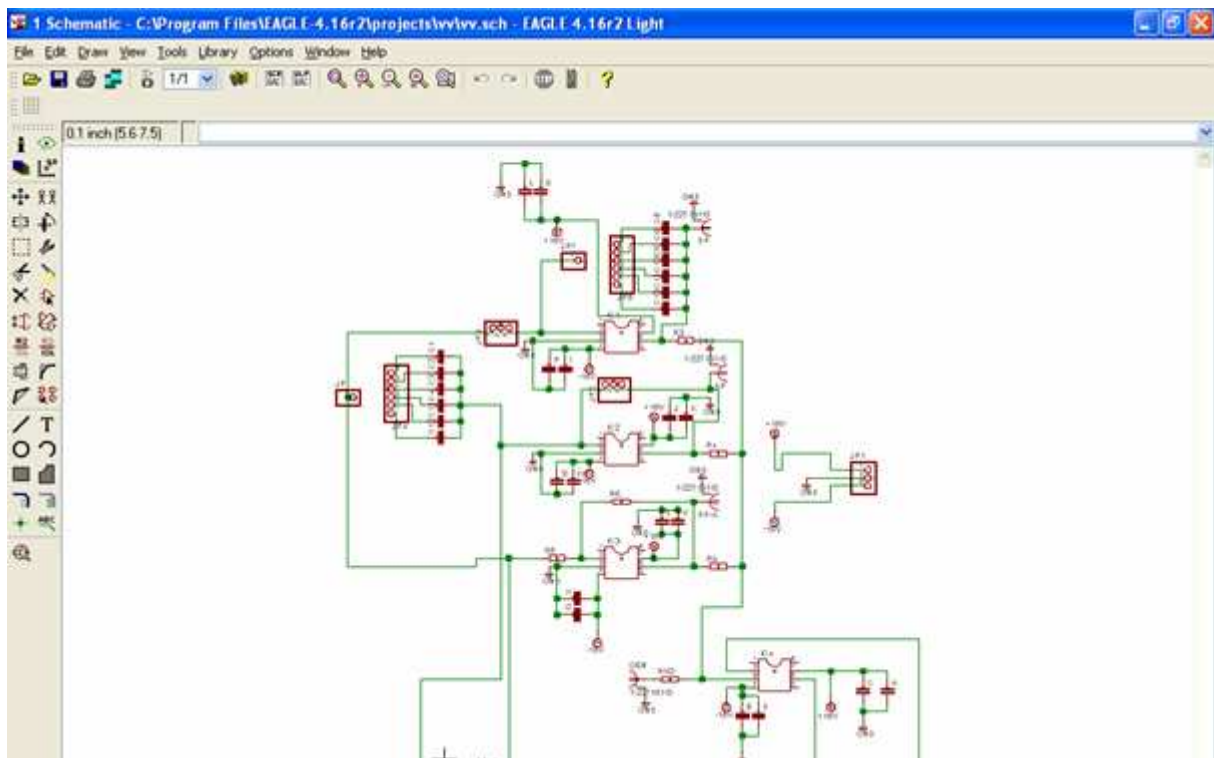
**Obr.3.55** Blokové schéma univerzálního řízeného bloku 1.řádu a obvodové schéma Ackerberg-Mossberg [4]

## 4 FINÁLNÍ REALIZACE OBVODU

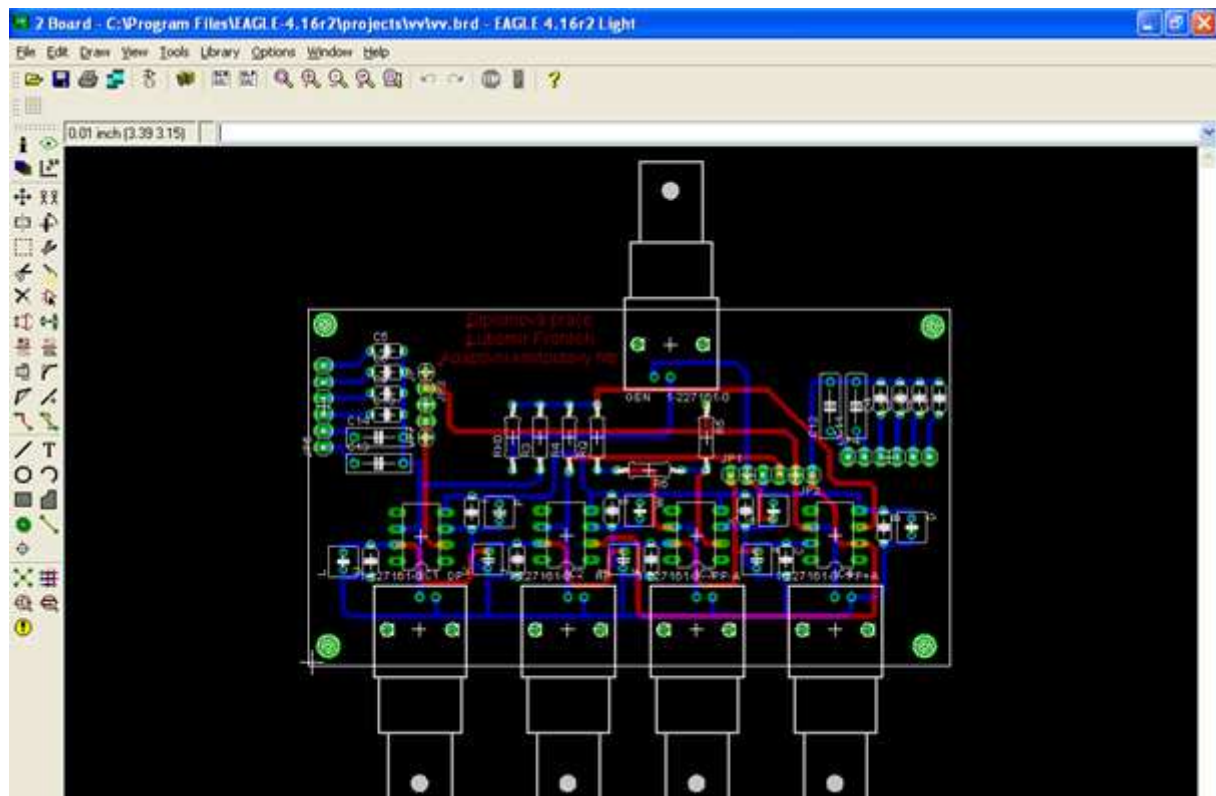
V této kapitole se budu zabývat finální realizací obvodu. V kapitole 3.2 *reálný návrh a simulace v programu Spice*, jsem si vypočítal hodnoty viz. obr.č.3.4 pro jednotlivé součástky tvořící obvod Ackerberg-Mossberg uváděný na obrázku č.3.3. Pomocí programu Eagle jsem vytvořil desku plošných spojů, kterou jsem osadil součástkami a v závěru jsem tento obvod oživil a oměřil jsem jeho reálné vlastnosti a chování tohoto obvodu s analogovým řízením. Po ověření správné funkce obvodu s analogovým řízením jsem navrhl desku plošných spojů pro digitální řízení filtru Ackerberg - Mossberg a opět jsem ověřil reálné vlastnosti filtru tentokrát však s digitálním řízením.

### 4.1 NÁVRH A REALIZACE DESKY OBVODU FILTRU ACKERBERG - MOSSBERG V PROGRAMU EAGLE

Pomocí tohoto programu který slouží pro tvorbu schémat a návrh plošných spojů jsem si vytvořil vhodný návrh desky plošných spojů pro skutečné parametry součástek, jak je patrné na následujících obrázcích.

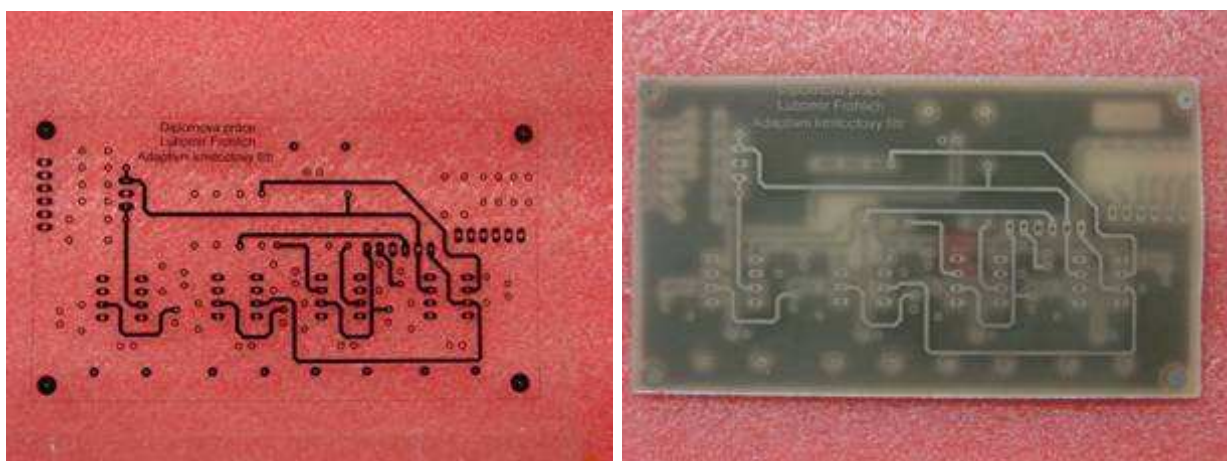


**Obr.4.1** Překreslení obvodu na obr.č.3.3 do editoru schémat v programu Eagle

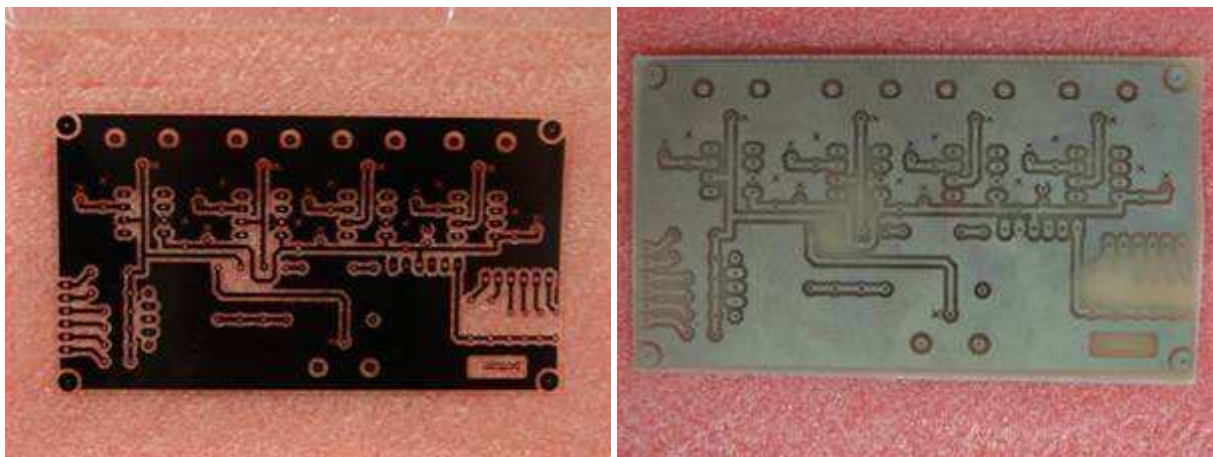


**Obr.4.2** Vytvoření desky plošných spojů pro obvod na obr.č.4.1 v programu Eagle

Jak je patrné na obrázku č.4.3 a 4.4 navrhl jsem v programu Eagle dvouvrstvou desku která se mě zdála vhodnější a přehledově lépe uspořádanější než realizace tohoto obvodu na jednovrstvé desce plošných spojů. Pomocí realizace dvouvrstvé desky jsem se vyhnul propojkám a případným problémům s dlouhými cestičkami které by mohli vytvářet nechtěné chování obvodu. Ještě zde můžu dodat, že deska je navržena pro používání jak analogového řízení tak i digitálního řízení.



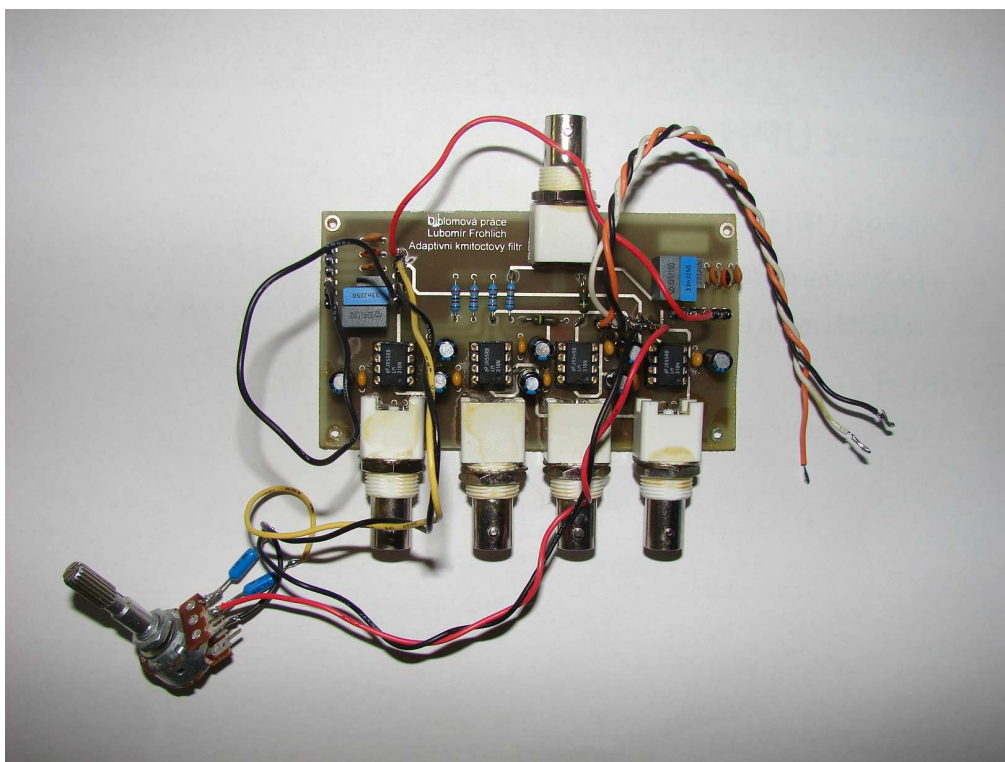
**Obr.4.3** Vrchní strana fólie a finální desky pro obvod na obr.č.3.3



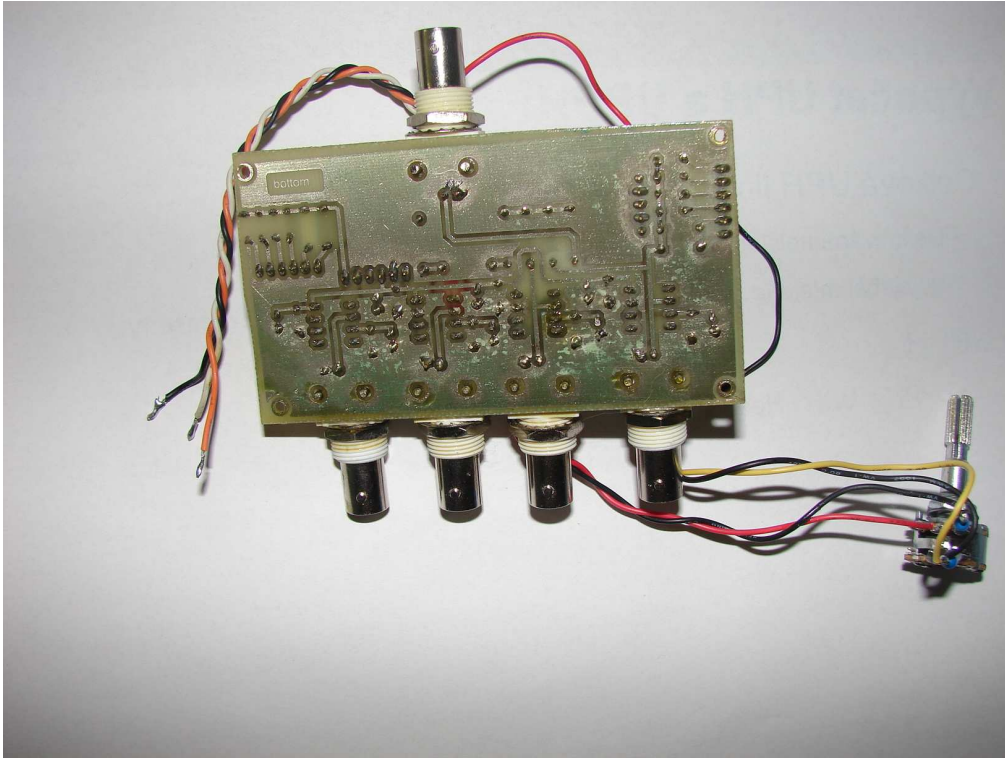
**Obr.4.4** Spodní strana fólie a finální desky pro obvod na obr.č.3.3

## 4.2 OSAZENÍ DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ VHODNÝMI SOUČÁSTKAMI

V tomto bodě jsem pouze desku osadil součástkami a připravil obvod pro oživení vše je viditelné na obrázku č.4.5 a 4.6.



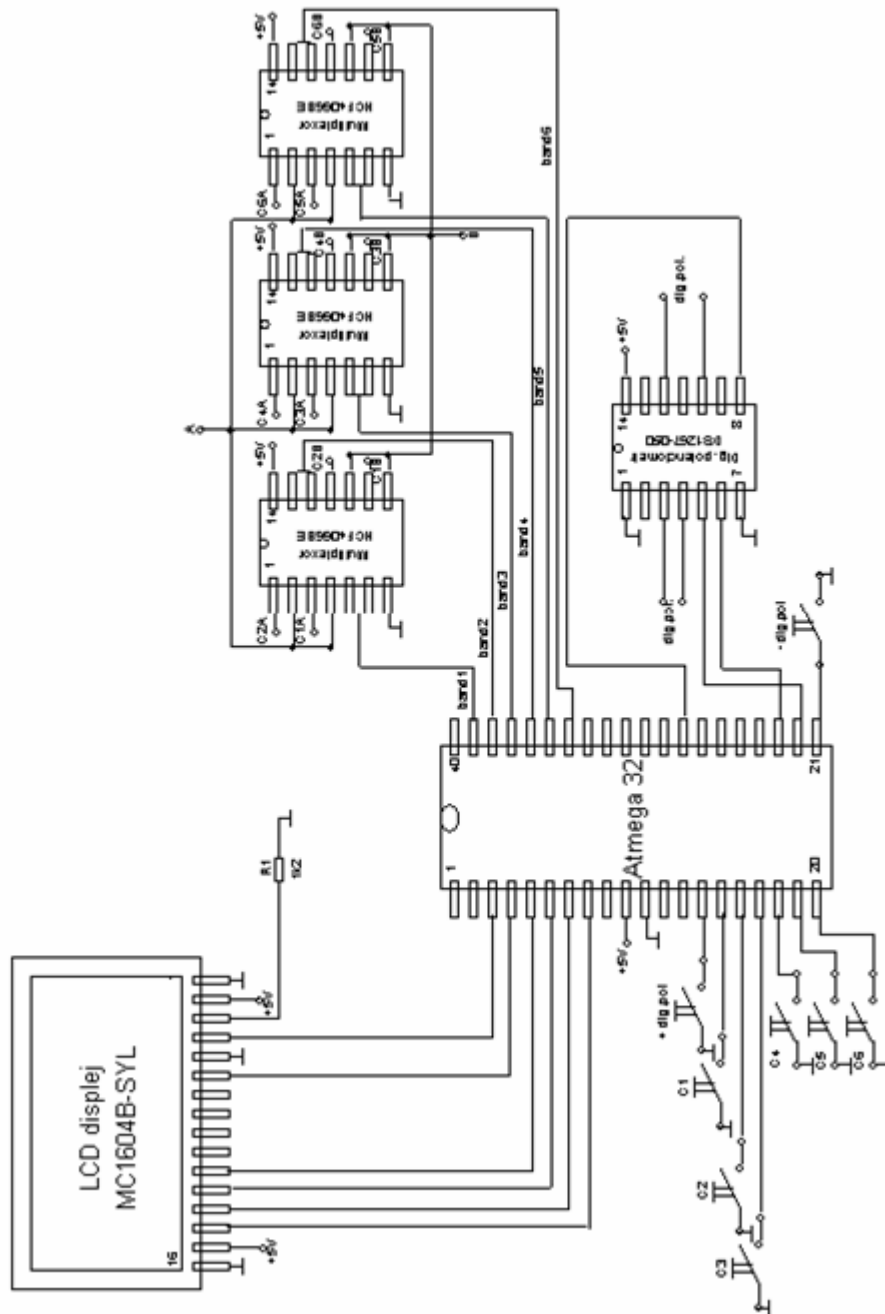
**Obr.4.5** Obvod Ackerberg-Mossberg s analogovým řízením



**Obr.4.6** Obvod Ackerberg-Mossberg s analogovým řízením

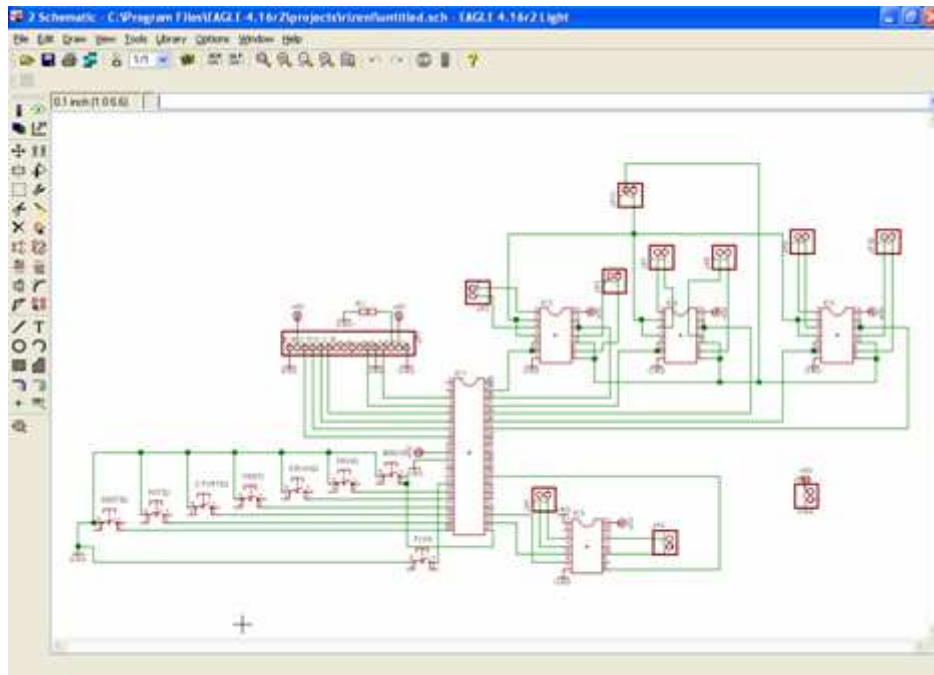
### 4.3 NÁVRH A REALIZACE DESKY PRO DIGITÁLNÍ ŘÍZENÍ FILTRU A-M V PROGRAMU EAGLE

Na obrázku č.4.7 můžeme vidět navržený obvod pro digitální řízení filtru Ackerberg – Mossberg. Jednotlivé součástky jsou uvedeny v tabulce č.4.1.

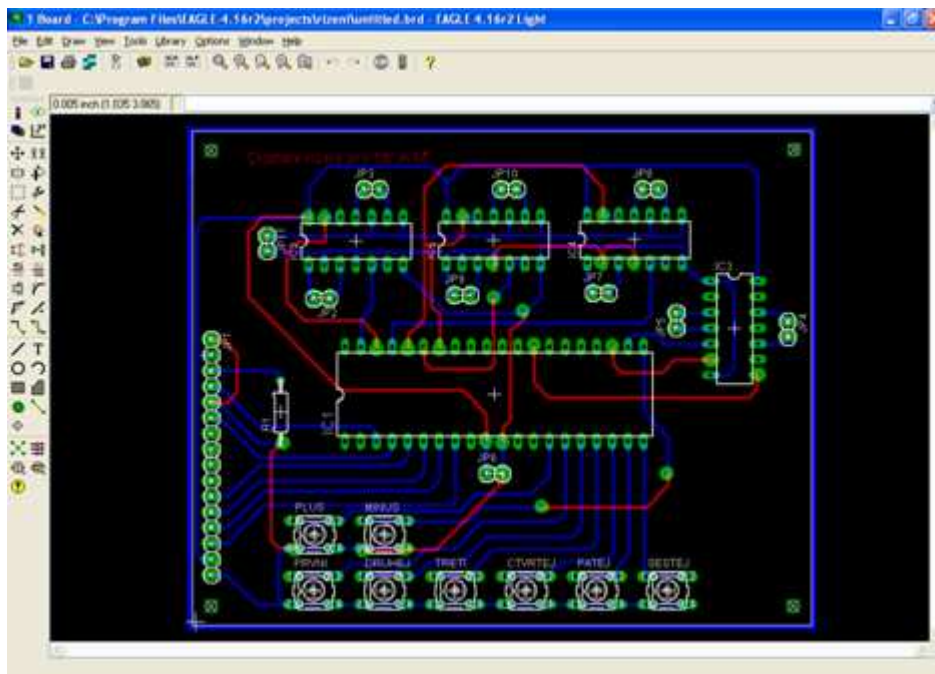


**Obr.4.7** Návrh obvodu s digitálním řízením pro filtr Ackerberg – Mossberg

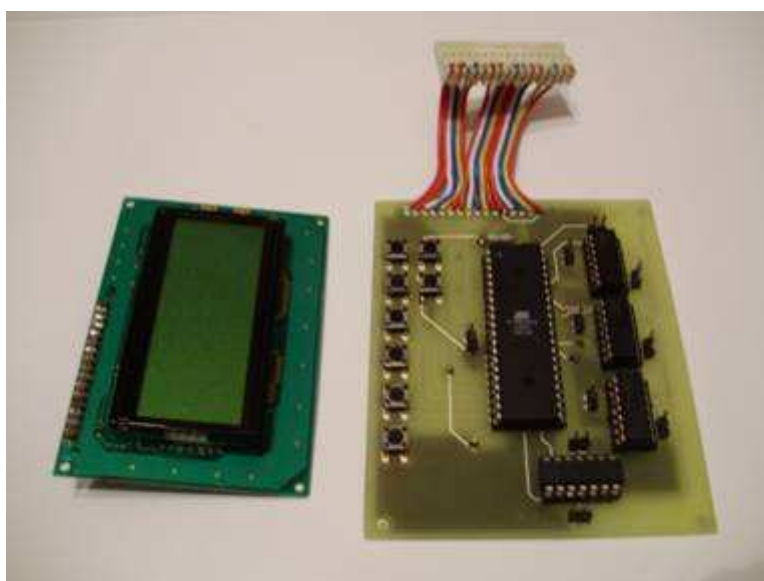
Jak je patrné tak jsem opět pomocí programu Eagle vytvořil vhodný návrh desky plošných spojů pro digitální řízení filtru Ackerberg - Mossberg pro skutečné parametry součástek jak můžeme vidět na následujících obrázcích.



**Obr.4.8** Překreslení obvod pro digitální řízení filtru Ackerberg-Mossberg do editoru schémat



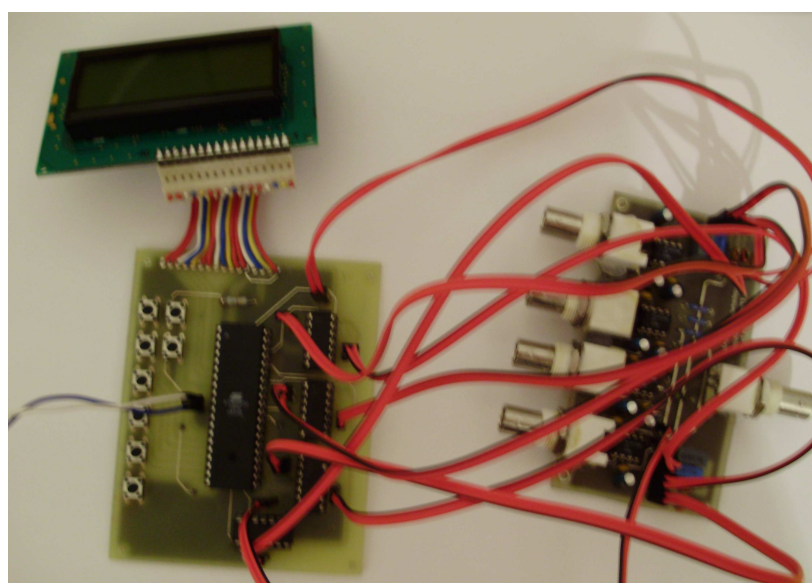
**Obr.4.9** Vytvoření desky plošných spojů obvodu pro digitální řízení filtru Ackerberg-Mossberg



**Obr.4.10** Deska s digitálním řízením pro filtr Ackerberg - Mossberg



**Obr.4.11** Příklad zobrazovaných parametrů na LCD panelu



**Obr.4.12** Filtr Ackerberg – Mossberg s digitálním řízením

#### 4.4 SEZNAM POUŽITÝCH SOUČÁSTEK

V tabulce č.4.1 můžeme vidět všechny použité součástky jak pro samotný filtr Ackerberg – Mossberg, tak i pro jeho digitální řízení.

Ještě bych se rád vrátil k volbě OZ pro které bych doporučil použít typ LMH6609MA a pro digitální řízení bych volil multiplexer ADG611. Velice důležitá informace je oddělení digitálního potenciometru od filtru pomocí kondenzátorů s hodnotou alespoň 1uF a větší z důvodu odstranění vlivu stejnosměrné složky.

| <b>Seznam součástek pro filtr Ackerberg - Mossberg</b> |                    |          |
|--|--------------------|----------|
| Součástka  | Hodnota            | Množství |
| R <sub>1,2</sub>                                       | 50kΩ               | 1        |
| R <sub>3,4,5,6</sub>                                   | 24kΩ               | 4        |
| R <sub>k0</sub>  | 2,4kΩ              | 1        |
| R <sub>Q</sub>   | 240kΩ              | 1        |
| C <sub>1,2</sub>                                       | 330nF              | 1        |
| C <sub>1,2</sub>                                       | 33nF               | 1        |
| C <sub>1,2</sub>                                       | 3,3nF              | 1        |
| C <sub>1,2</sub>                                       | 330pF              | 1        |
| C <sub>1,2</sub>                                       | 33pF               | 1        |
| C <sub>1,2</sub>                                       | 3,3pF              | 1        |
| C <sub>filtrační</sub>                                 | 1uF                | 8        |
| C <sub>filtrační</sub>                                 | 100nF              | 8        |
| Lámací konektory                                       | /                  | 23       |
| BNC-Z50  | /                  | 5        |
| OZ   | LM318N             | 4        |
| Patice precizní  | 8pin               | 4        |
| Vidlice jednořadá 16pin                                | /                  | 1        |
| <b>Seznam součástek pro digitální řízení</b>           |                    |          |
| R <sub>1</sub>   | 1,2kΩ              | 1        |
| Spínače tlačítkové                                     | /                  | 8        |
| Lámací konektory                                       | /                  | 36       |
| Přepínač páčkový 6pol                                  | /                  | 1        |
| u-Processor  | ATMEGA32-16PU0624B | 1        |
| Multiplexor  | HCF4066BE          | 3        |
| Digitální potenciometr                                 | DS1267-050         | 1        |
| LCD displej  | MC1604B-SYL        | 1        |
| Propojovací kabely                                     | /                  | 11       |
| Patice precizní  | 14pin              | 4        |
| Patice precizní  | 40pin              | 1        |

**Tab.4.1** Seznam použitých součástek pro filtr Ackerberg – Mossberg a jeho analogové a digitální řízení

## 5 OVĚŘENÍ CHOVÁNÍ A VLASTNOSTÍ OBVODU

V této kapitole se budu zajímat o chování a vlastnosti sestaveného obvodu. Mým cílem je, aby obvod pracoval do co možná nejvyšších kmitočtů a to jak s analogovým tak i s digitálním řízením, bez různých parazitních vlastností.

### 5.1 VLASTNOSTI OBVODU S ANALOGOVÝM ŘÍZENÍM

Hlavní vliv na práci obvodu, tedy na dosažení středního kmitočtu má OZ. Proto jsem obvod testoval s různými OZ. Zde se vyskytl problém se sháňkou kvalitních OZ, které by byly dostupné v ČR či časově, finančně nebo kvantově jinak dostupné v jiných zemích. Parametry pro jednotlivé OZ můžeme najít v datasheet.

#### Použité OZ:

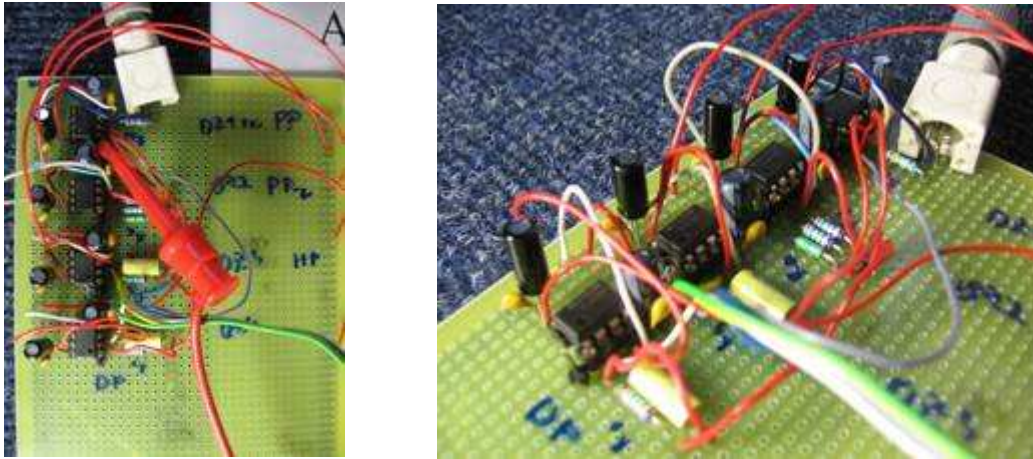
- CLC420  $f_0 = 9,2\text{MHz}$  ( pouze simulace v programu Spice )
- LMH6609  $f_0 = 0\text{Hz}$  ( nefunkční vzorek )
- LM318  $f_0 = 850\text{kHz}$
- TL072  $f_0 = 33,5\text{kHz}$

#### Měřicí přístroje:

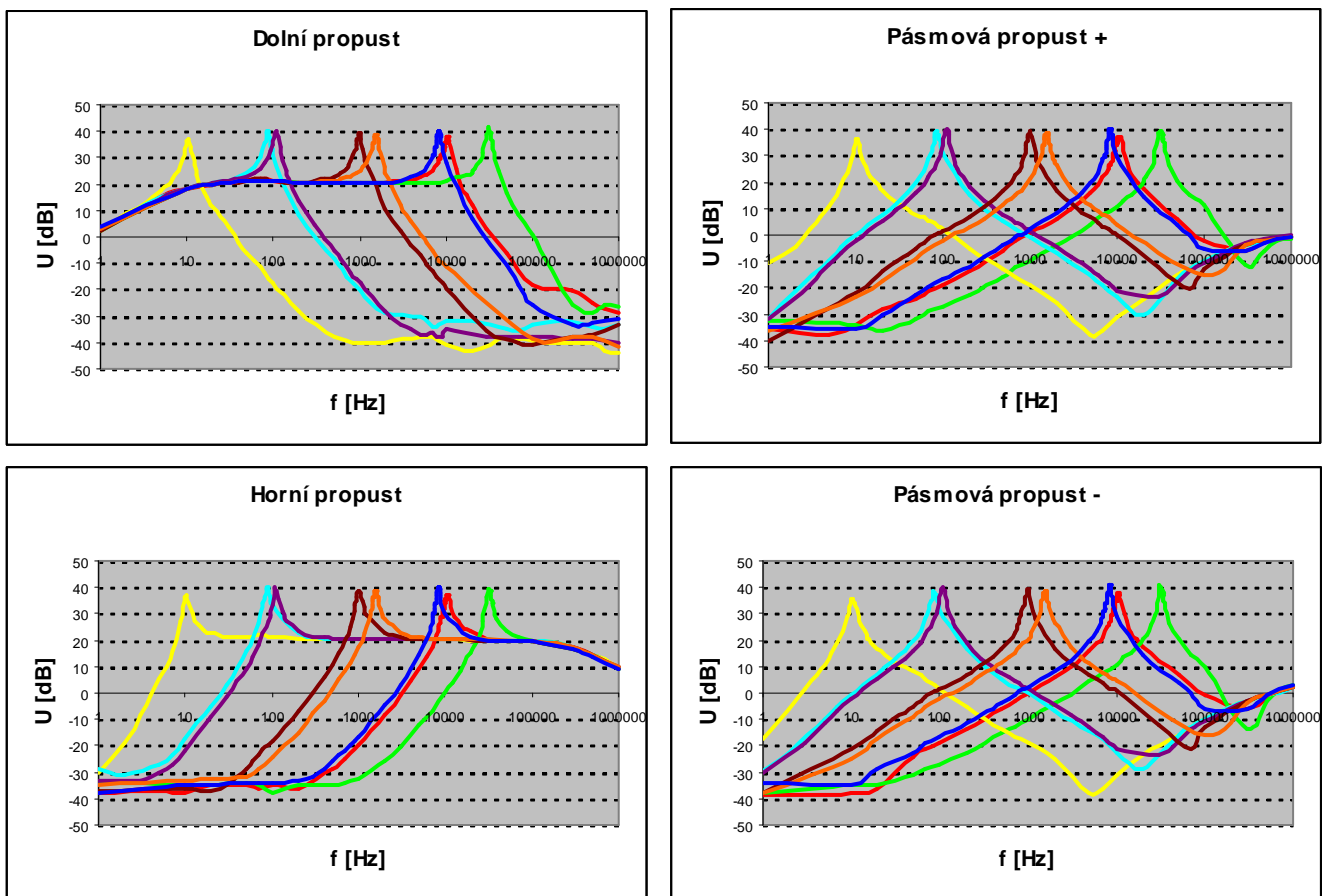
- Stabilizovaný zdroj – BS525
- Generátor Agilent 33220A – 20MHz Function / Arbitrary waveform generator
- GW instek GDS- 820C –Digital storage oscilloscope 150MHz
- Propojovací kabely

### 5.1.1 Testování vlastností obvodu s OZ TL072

Nejprve jsem testoval filtr s operačním zesilovačem TL072 a to jak na nepájivém poli na kterém jsem si ověřil funkčnost filtru tak na předvrtaném kuprexitu na kterém jsem si sestavil obvod jak je patrné na obr.č.5.1. S tímto OZ se mě podařilo dostat na maximální střední kmitočet okolo 33,5kHz. Jednotlivé grafy na obr.č.5.2 zachycují průběhy pro dané pásmo měřené vždy s maximálním a minimálním  $R_{1,2}$  pro dané  $C_{1,2}$ .



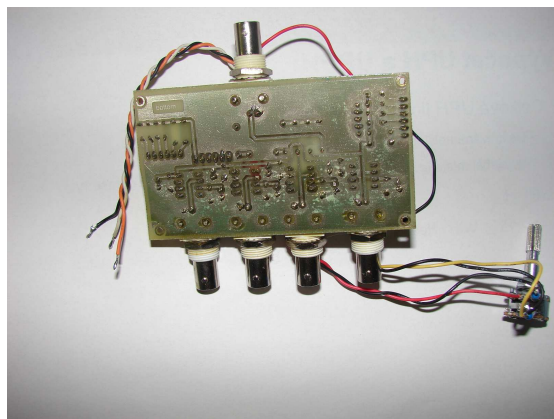
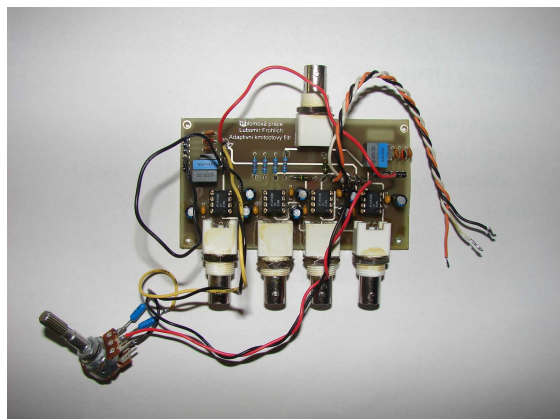
Obr.5.1 Testování funkčnosti filtru s OZ TL072 a oměření jeho vlastností



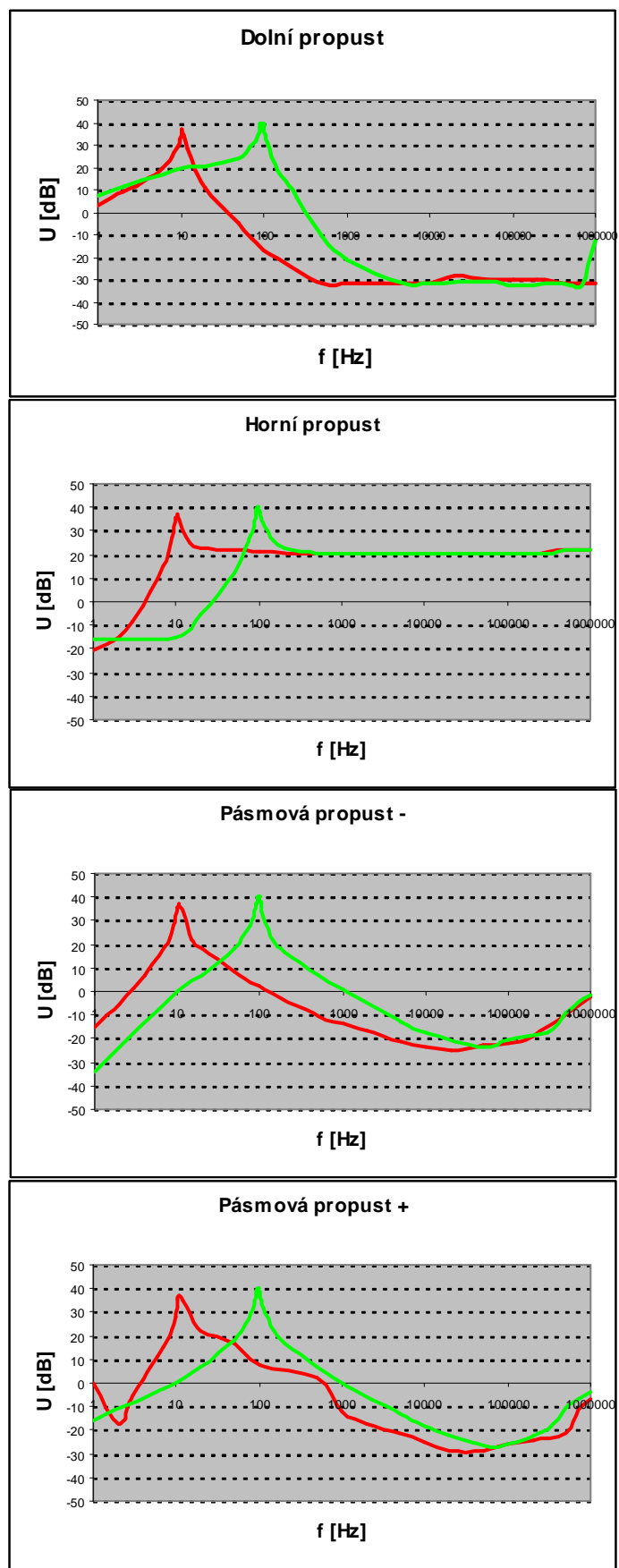
Obr.5.2 Reálné vlastnosti obvodu s OZ: TL072 pro pásmo  $f = 10-100000\text{Hz}$

### 5.1.2 Testování vlastností obvodu s OZ LM318

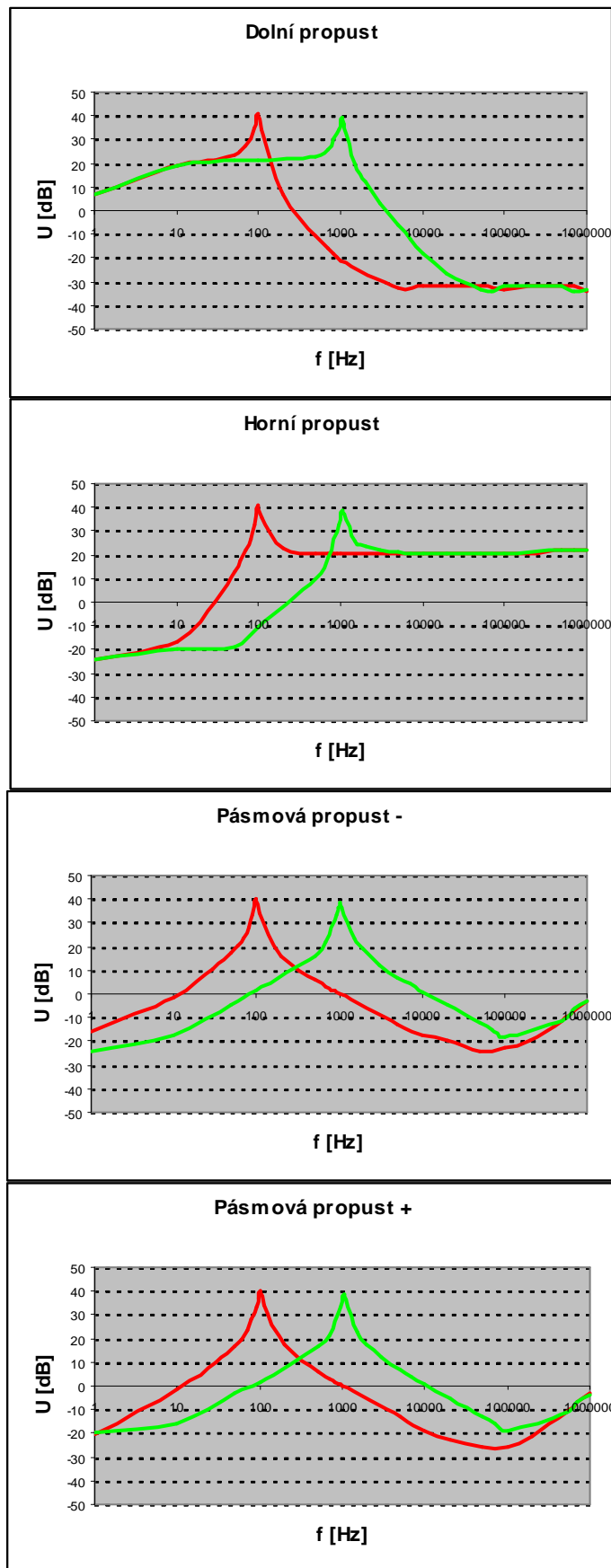
Po ověření funkčnosti filtru s OZ TL072, který měl nedostačující parametry jsem si musel navrhnout desku pro stejný filtr, ale s použitím OZ LM318. Při použití tohoto OZ se mi podařilo dostat na maximální střední kmitočet okolo 850kHz. Vše je patrné na následujících obrázcích a tabulkách s naměřenými hodnotami. Jednotlivé grafy zachycují průběhy pro dané pásmo měřené vždy s maximálním a minimálním  $R_{1,2}$  pro dané  $C_{1,2}$ . Veškeré naměřené hodnoty můžeme najít v tabulkách pro dané pásmo v Příloze 1.



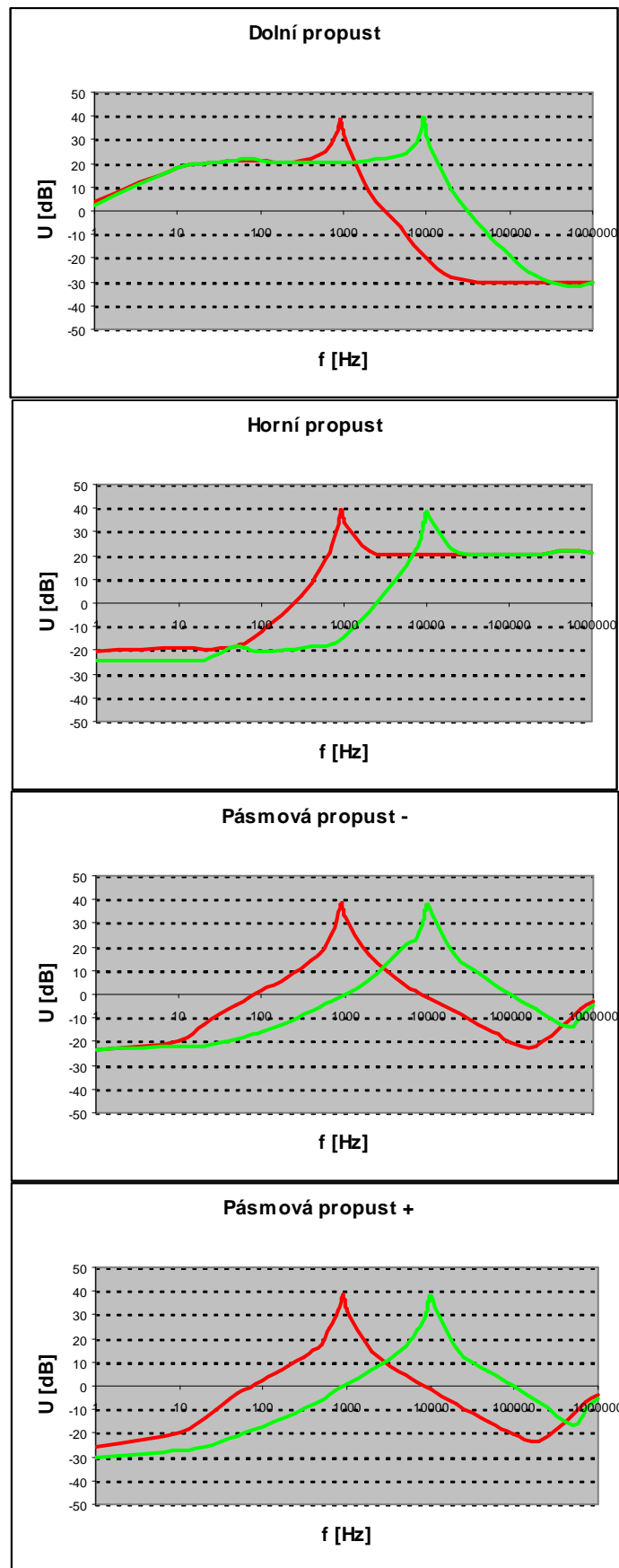
**Obr.5.3** Testování funkčnosti filtru s OZ LM318 a oměření jeho vlastností



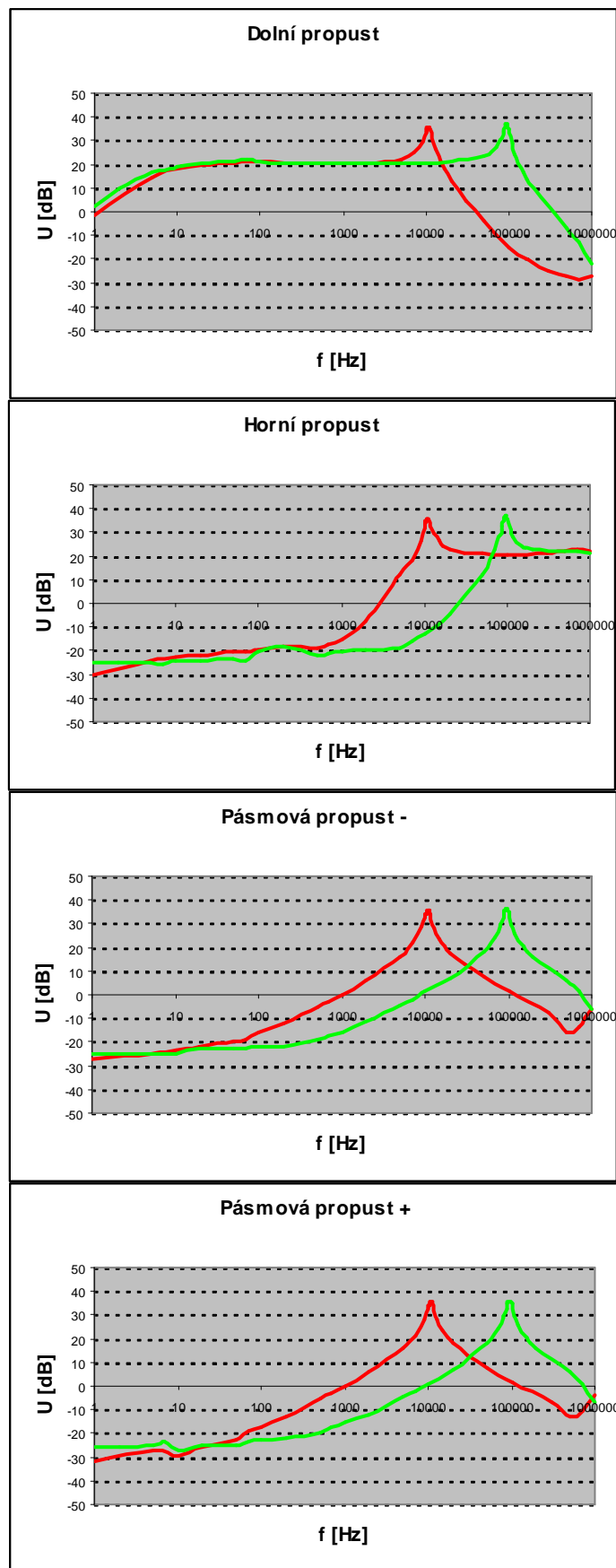
Obr.5.4 Reálné vlastnosti obvodu s OZ: LM318 pro pásmo  $f = 10\text{-}100\text{Hz}$



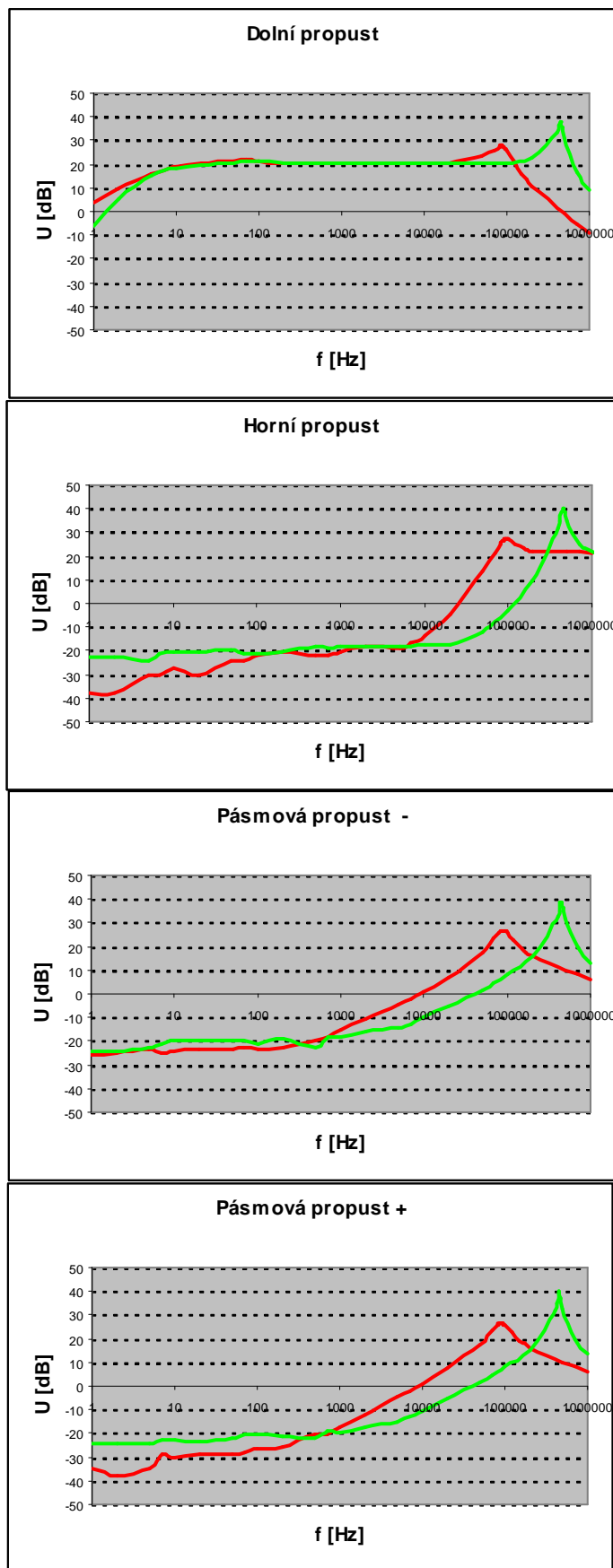
**Obr.5.5** Reálné vlastnosti obvodu s OZ: LM318 pro pásmo  $f = 100-1000\text{Hz}$



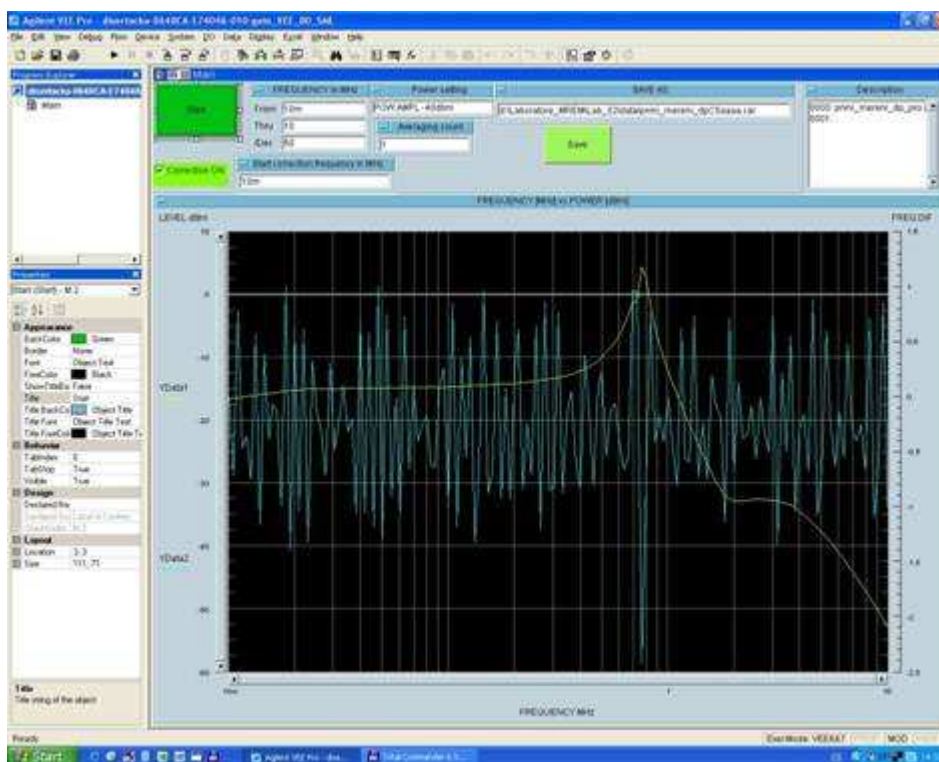
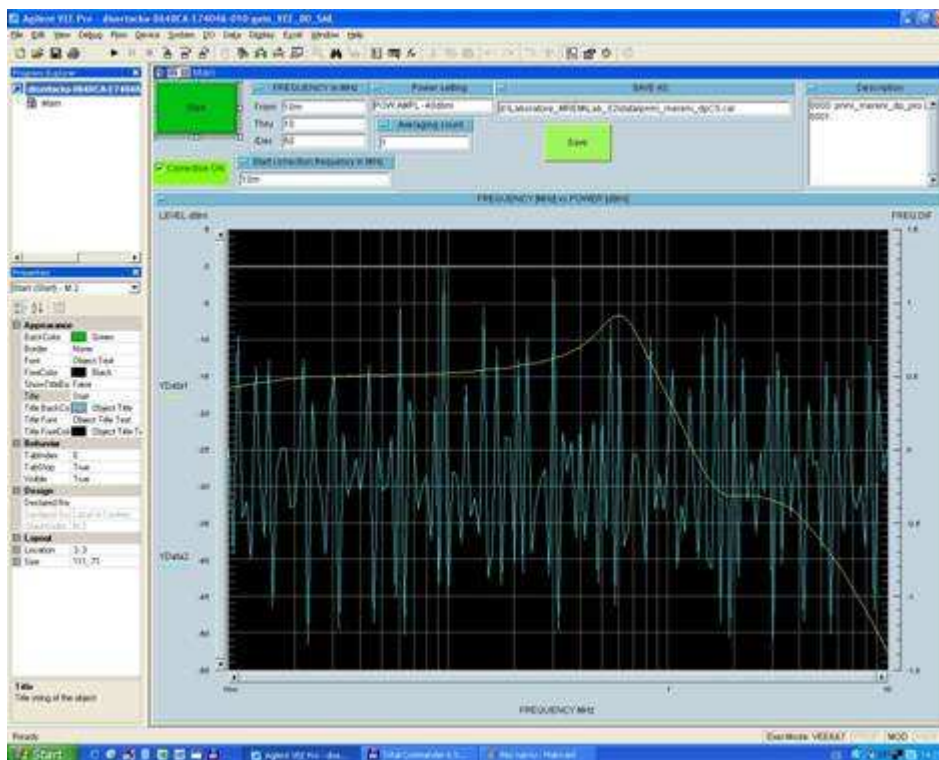
**Obr.5.6** Reálné vlastnosti obvodu s OZ: LM318 pro pásmo  $f = 1000-10000\text{Hz}$



**Obr.5.7** Reálné vlastnosti obvodu s OZ: LM318 pro pásmo  $f = 10000-100000\text{Hz}$



**Obr.5.8** Reálné vlastnosti obvodu s OZ: LM318 pro pásmo  $f = 100000-1000000\text{Hz}$

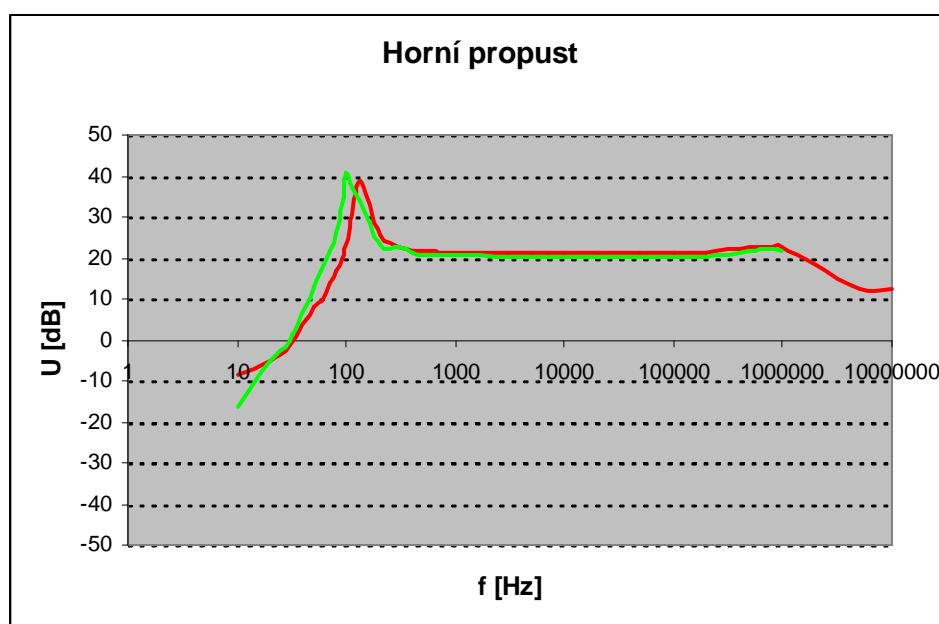


**Obr.5.9** Ukázka měření obvodu na automatizovaném pracovišti ústavu UREL s OZ LM318 pro pásmo  $f = 100000 - 1000000\text{Hz}$

### 5.1.3 Srovnání parametrů filtru s digitálním a analogovým řízením

V této kapitole uvádím srovnání analogového a digitálního řízení pro filtr Ackerberg – Mossberg. Jak můžeme vidět na obrázku č.5.10 jedná se o horní propust v pásmu 100 – 1000Hz. Zelený průběh odpovídá filtru s digitální řízením a červený průběh odpovídá filtru s analogovým řízením. Jak je patrné tak oba průběhy jsou téměř stejné tedy filtr vykazuje stejné parametry pro obě řízení. Z grafu také můžeme vidět, že filtr pracuje s činitelem jakosti  $Q = 10$  a činitelem přenosu  $K = 10$ .

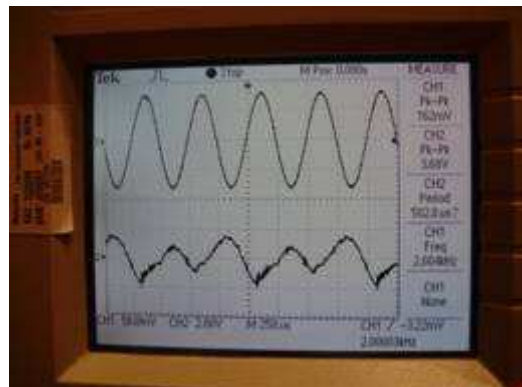
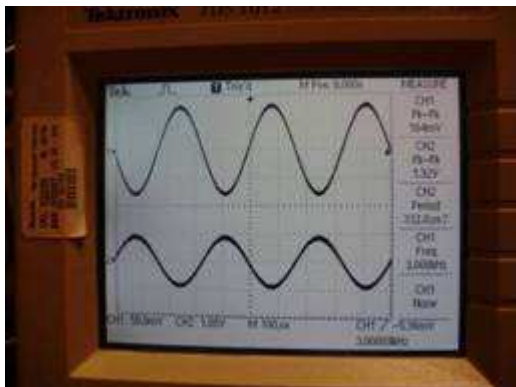
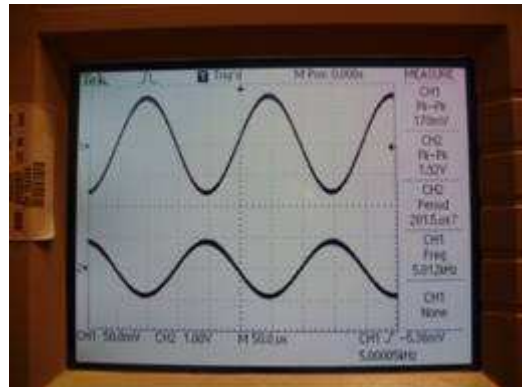
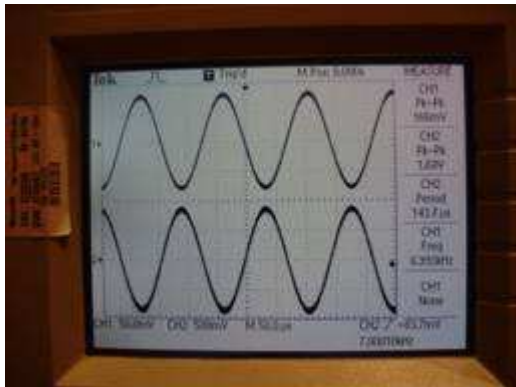
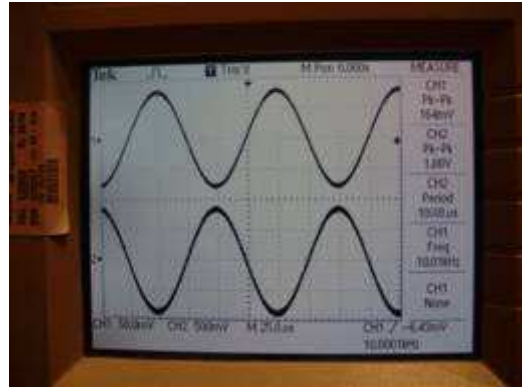
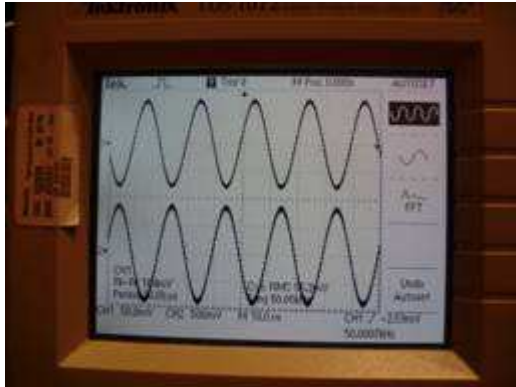
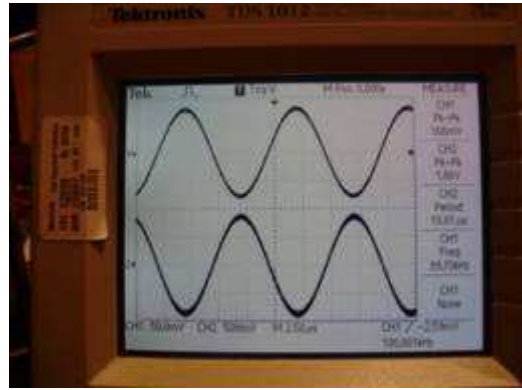
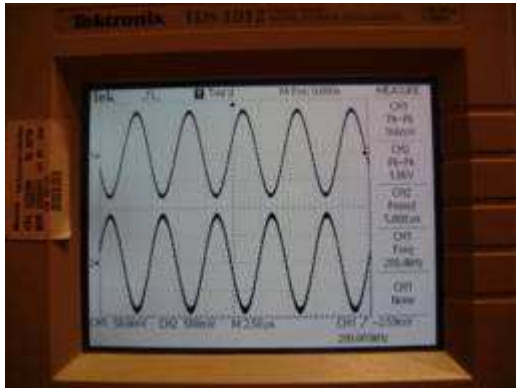
Filtr s digitálním řízením ovšem při nízkých kmitočtech značně deformuje signál jak můžeme vidět v kapitole 5.1.4. Je to způsobené stejnosměrnou složkou kterou vykazuje digitální potenciometr. Tento problém jsem řešil oddělení digitálního potenciometru od filtru pomocí kondenzátorů, které nepropustí stejnosměrnou složku. Hodnotu kondenzátorů jsem volil experimentálně od 1uF do 10uF.

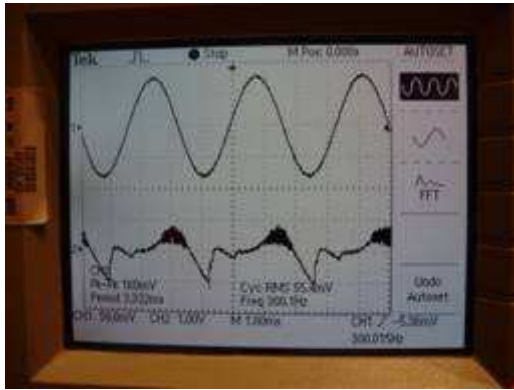


**Obr.5.10** Srovnání průběhů filtru s analogovým a digitálním řízením pro pásmo 100 – 1000Hz

### 5.1.4 Zobrazení průběhů pro filtr Ackerberg – Mossberg pomocí osciloskopu

Tato kapitola uvádí zobrazení některých průběhů pro filtr Ackerberg – Mossberg s digitálním řízením. Na obrázcích 5.11 můžeme vidět vstupní signál z generátoru, který by měl být 160mV a výstupní signál z filtru typu horní propust který má pro určité frekvence různé velikosti amplitud. Jestliže si zvolíme určité hodnoty kmitočtů pro které si chceme proměřit pásmo, tak pro tyto kmitočty získáme velikost amplitud, které přepočítáme na výstup v dB a zobrazíme prostřednictvím grafu obrázek č.5.10.





**Obr.5.11** Různé průběhy signálů z filtru typu horní propust

### 5.1.5 Ukázka programu pro mikroprocesor ATMEGA32

Ukázku a popis programu pro ATMEGA32 použitou v digitálním řízení jsem vložil do Přílohy 2. Jako programovací jazyk jsem si zvolil C#.

Obvod pro digitální řízení který můžeme vidět na obrázku č.4.7 se opírá o hlavní blok tedy mikroprocesor ATMEGA32 ve kterém je nahrán program jeho výpis je v příloze 2. Obvod obsahuje 8 tlačítek z nichž 6 jich určuje hodnotu kondenzátorů  $C_{1,2}$  a zbylé 2 tlačítka určují hodnotu odporů  $R_{1,2}$  pomocí digitálního potenciometru. Zmáčknutím určitého tlačítka nám mikroprocesor propojí pomocí multiplexoru požadovanou hodnotu kondenzátorů nebo pomocí digitálního odporu vytvoří požadovanou hodnotu odporu  $R_{1,2}$ . Vše se nám pro naši kontrolu ještě zobrazuje pomocí LCD displeje.

# ZÁVĚR

Téma „**Adaptivní kmitočtový filtr**“ jsem si pro zpracování ve své diplomové práci vybral z toho důvodu, že tuto oblast elektroniky považuji za velmi zajímavou a domnívám se, že by tato práce mohla být určitým přínosem především pro mě samotného.

Dané téma jsem se snažil pojmout tak, aby vše bylo přehledně a logicky uspořádáno, přičemž hlavní důraz jsem kladl na snadnou orientaci ve vybrané problematice.

Jak jsem již podotkl v úvodu, základ pro tuto diplomovou práci představuje souhrn teoretických poznatků získaných studiem odborné literatury, ale také konkrétních podmínek získaných pro tvorbu daného obvodu. Cílem teoretické části bylo podat určitý ucelený přehled o charakteristice a významu kmitočtových filtrů a to převážně o adaptivním kmitočtovém filtru typu *Ackerberg – Mossberg* a jeho možnostech řízení. V praktické části jsem si kladl za cíl navrhnout a zrealizovat vhodný obvod právě zmiňovaného filtru a realizovat k němu vhodné možnosti analogového a digitálního řízení a také ověření reálných vlastností navrženého filtru jak pro analogové tak i pro digitální řízení.

Diplomovou práci jsem rozdělil do čtyř větších celků. V první části jsem se snažil co nejvíce prostudovat tematiku kmitočtových filtrů, kterou jsem poté stručně popsal. V této části se lze setkat s vysvětlením, co to jsou kmitočtové filtry, kde a proč se používají. Je zde také popsáno, podle jakých kritérií se filtry dělí a také jak se navrhují či ekvivalentně upravují. Také jsou zde uvedeny obvody ARC 1. a 2. řádu a jejich příslušné přenosové funkce a základní vlastnosti.

V druhé části jsem se zabýval řízením kmitočtových filtrů a s tím spjatou problematikou. Popsal jsem zde různé možnosti řízení a přeladování kmitočtových filtrů. Především jsem se zde zaměřil na možnost využití digitálního potenciometru.

Ve třetí části jsem se začal věnovat již konkrétnímu zapojení univerzálního funkčního bloku 2. řádu typu *Ackerberg – Mossberg*. Nejprve jsem popsal jeho základní vlastnosti a uvedl jeho typické zapojení. Zde jsem se zaměřil na jeho univerzální laditelnou variantu pro kterou jsem si pomocí výpočtů navrhl tento filtr pro několik pásem přeladění. Jak je patrné v diplomové práci (kapitola 3.2), pásma přeladění jsem zvolil po dekádách tedy 10 – 100Hz, 100 – 1000Hz až 1 – 10MHz. Přeladování po dekádách se uskutečňuje pomocí změny kondenzátorů  $C_{1,2}$  a přeladování středního kmitočtu signálu v dané dekádě pomocí změny odporů  $R_{1,2}$ . Pro ověření správných výpočtů a parametrů navrhovaného filtru jsem provedl řadu simulací pomocí programu *Spice*, které potvrdily správnost návrhu, ale především vlastností obvodu. Pomocí simulací jsem si také vyzkoušel možnosti přeladování tohoto obvodu. Ještě bych k tomuto bodu rád poznamenal, že velice obtížné zde bylo zvolit vhodný typ operačního zesilovače. Pro účel simulace obvodu jsem zvolil typ CLC420/CL, který se jevil jako nejlepší možnost a jehož ekvivalentní náhrada je LMH6609. Díky simulacím jsem si také zjistil, že pomocí tohoto operačního zesilovače je možné se dostat až k hodnotě středního kmitočtu  $f_0$  okolo 8MHz. Tuto hodnotu je ale velice nutné brát s potřebnou rezervou. Ve skutečném obvodu se budou projevat parazitní vlastnosti a různé omezení které zabrání se dostat až na zmiňovanou hodnotu 8MHz. Pro jednotlivé simulace jsem do přílohy 3 přidal vypočtenou šíři pásma a činitel jakosti vypočtený pomocí programu *Spice*.

Poslední část se již věnuje hlavnímu cíli diplomové práce, a to vytvářenému obvodu typu *Ackerberg – Mossberg*. Realizace obvodu vycházela z určitých požadavků, který měl daný obvod poskytovat. Z těchto požadavků jsem si vytvořil „vývojový diagram“, který mi udával postup při tvorbě daného obvodu. Při realizaci obvodu jsem tedy vycházel z poznatků které jsem popsal v jednotlivých bodech této práce, tedy od teoretických znalostí, přes výpočet jednotlivých prvků obvodu až po simulace tohoto obvodu. Následujícím bodem tedy už byla pouze finální realizace skutečného obvodu. Ještě před tím než jsem vytvořil finální realizaci desky plošných spojů pomocí programu *Eagle*, navržený obvod jsem ještě sestavil na

nepájivém kontaktním poli a také na předvrtaném kuprexitu. Zde jsem si opět ověřil funkčnost a vlastnosti obvodu. V těchto podmínkách jsem testoval obvod s operačním zesilovačem TL072 pomocí kterého jsem se dostal na maximální střední kmitočet 33,5kHz a pomocí operačního zesilovače LM318 jsem se dostal na maximální střední kmitočet okolo 350kHz. Ještě zde musím podotknout, že veškeré testování obvodu probíhalo s analogovým řízením, tedy pomocí potenciometru a otočného tlačítka pro volbu kondenzátorů. Poté již následovalo zmiňované vytvoření desky plošných spojů a osazení obvodu součástkami. Pro takto vytvořený obvod s operačním zesilovačem LM318 jsem oměřil jeho reálné vlastnosti pro všechny jeho výstupy s použitím analogového řízení. Ještě se tu zmíním, že se mě podařilo dostat na maximální střední kmitočet 850kHz. Po ověření vlastností obvodu Ackerberg – Mossberg s analogovým řízením jsem ještě zrealizoval k obvodu Ackerberg – Mossberg vhodné digitální řízení, které se opírá o hlavní blok tedy mikroprocesor ATMEGA32 ve kterém je nahrán program který můžeme vidět v příloze 2. Obvod obsahuje určitý počet tlačítek, kterými stanovujeme výběr dekády neboli pásma pomocí multiplexoru a dalšími určujeme hodnotu odporu digitálního potenciometru. Vše se nám pro naši kontrolu ještě zobrazuje pomocí LCD displeje. K bloku Ackerberg – Mossberg jsem tedy připojil digitální řízení a srovnal jsem chování tohoto obvodu s chováním obvodu Ackerberg – Mossberg s analogovým řízením. Závěrem můžu říci, že vlastnosti obou obvodů jsou téměř identické jen při digitálním řízení nám digitální potenciometr vnáší určitou stejnosměrnou složku pro nízké kmitočty, proto je zde nutné oddělit filtr od digitálního potenciometru kondenzátorem alespoň o velikosti 1 $\mu$ F. Jednotlivé grafy, výpočty a naměřené hodnoty můžeme najít v této diplomové práci.

Na tomto tématu je možné i nadále pracovat, vzhledem k existenci velkého počtu např. operačních zesilovačů či různých metod řízení nebo také dalších univerzálních zapojení funkčních bloků. Pro realizaci obvodu Ackerberg – Mossberg bych doporučil vyzkoušet OZ LMH6609, který by měl umožňovat při přeladování dostat se na vyšší střední kmitočet a pro digitální řízení bych ještě doporučil použít multiplexor ADG611, který vykazuje menší odpor při sepnutí. Také jsem se v diplomové práci zmínil o stejnosměrné hodnotě kterou zavádí digitální potenciometr a proto bych také doporučil vyzkoušet jinou formu řízení namísto digitálního potenciometru.

Díky diplomové práci jsem získal mnoho nových poznatků a zkušeností, které doufám uplatním v budoucnu.

## LITERATURA

- [1] Hájek, K., Sedláček, J.: Kmitočtové filtry. BEN, technická literatura, Praha 2002.
- [2] Dostál, T., Axman, V.: Elektrické filtry. VUTIUM, technická literatura, Brno 2004.
- [3] Váňa, V.: Mikrokontrolery ATMEL AVR. BEN, technická literatura, Praha 2006.

### Internetové odkazy:

- [4] <http://www.vabo.cz/Stranky/biolek/veda/articles/NSZS00.pdf>, Elektronické ladění aktivních filtrů typu Ackerberg-Mossberg.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

|                 |   |  |
|-----------------|---|--|
| <b>Obr.1.1</b>  | Příklad závislosti modulové kmitočtové charakteristiky filtru typu dolní propust...3  |  |
| <b>Obr.1.2</b>  | Ideální modulové charakteristiky základních typů selektivních filtrů.....4  |  |
| <b>Obr.1.3</b>  | Kmitočtové charakteristiky filtrů: a) Butterworthův filtr, b) Čebyševův filtr..... 6  |  |
| <b>Obr.1.4</b>  | Porovnání typů aproximací při různých řádech horních propustí.....6   |  |
| <b>Obr.1.5</b>  | Kmitočtově závislý dělič napětí.....6   |  |
| <b>Obr.1.6</b>  | Filtry typu dolní a horní propust..... 7  |  |
| <b>Obr.1.7</b>  | Pasivní filtry druhého řádu, se zobrazením nul a pólů..... 8  |  |
| <b>Obr.1.8</b>  | Základní články RLC filtrů.....8  |  |
| <b>Obr.1.9</b>  | Příklady RLC filtrů: PP 6.řádu a PZ 6.řádu..... 8   |  |
| <b>Obr.1.10</b> | Diagram možného postupu při návrhu kmitočtových filtrů.....9  |  |
| <b>Obr.1.11</b> | Aktivní dolní a horní propust RC 1.řádu..... 11   |  |
| <b>Obr.1.12</b> | Základní zapojení typů filtrů: a) dolní propust, b) pásmová propust, c) dolní propust s dvěma OZ, d) zapojení univerzálních filtrů s třemi OZ a s třemi výstupy..... 13   |  |
| <b>Obr.2.1</b>  | Příklady realizace řízeného odporu v dolní propusti 1. řádu: a) potenciometr, b) optočlen s fotoodporem, c) polem řízený tranzistor, d) realizace řízeného integrátoru s OTA zesilovačem, e) realizace řízeného integrátoru s napěťovým zesilovačem, f) spínaný odpor se změnou střídy spínání, g) spínaný kapacitor, h) realizace řízeného integrátoru s D-A převodníkem..... 16 |  |
| <b>Obr.2.2</b>  | Obvodové schéma digitálního potenciometru..... 17   |  |
| <b>Obr.3.1</b>  | Ackerbergovo – Mossbergovo zapojení..... 18   |  |
| <b>Obr.3.2</b>  | Univerzální laditelná varianta..... 19  |  |
| <b>Obr.3.3</b>  | Návrh univerzálního filtru Ackerberg – Mossberg pro $Q < 100$ ..... 20  |  |
| <b>Obr.3.4</b>  | Tabulky s hodnotami prvků pro návrh uváděný v kapitole 3.1 filtru Ackerberg-Mossberg.....22   |  |
| <b>Obr.3.5</b>  | Schéma univerzálního filtru Ackerberg-Mossberg v programu Spice se skutečnými hodnotami jednotlivých prvků.....23   |  |
| <b>Obr.3.6</b>  | Simulace obvodu na obr.3.5 pro tabulku s $R_{digit} = 2.5k\Omega$ , při $R_{1,2}=234.1\Omega$ a $R_{1,2}=2340.5\Omega$ ..... 25   |  |
| <b>Obr.3.7</b>  | Základní struktura filtru 2. řádu typu Ackerberg – Mossberg.....26  |  |
| <b>Obr.3.8</b>  | Základní simulace obvodu na obr.č.3.7..... 26   |  |
| <b>Obr.3.9</b>  | Simulace obvodu při $R_3 = 48k\Omega$ a $C_1 = 660pF$ ..... 27  |  |
| <b>Obr.3.10</b> | Simulace obvodu při $R_3 = 12k\Omega$ a $C_1 = 165pF$ ..... 27  |  |
| <b>Obr.3.11</b> | Simulace obvodu při $R_3 = 3k\Omega$ a $C_1 = 41,25pF$ ..... 27   |  |
| <b>Obr.3.12</b> | Simulace obvodu při $R_3 = 72k\Omega$ a $C_1 = 990pF$ ..... 28  |  |
| <b>Obr.3.13</b> | Simulace obvodu při $R_4 = 1910\Omega$ a $C_1 = 660pF$ ..... 28   |  |
| <b>Obr.3.14</b> | Simulace obvodu při $R_4 = 2865\Omega$ a $C_1 = 990pF$ ..... 28   |  |
| <b>Obr.3.15</b> | Simulace obvodu při $R_4 = 9950\Omega$ a $C_1 = 33pF$ ..... 29  |  |
| <b>Obr.3.16</b> | Simulace obvodu při $R_4 = 318\Omega$ a $C_1 = 110pF$ ..... 29  |  |
| <b>Obr.3.17</b> | Simulace obvodu při $C_1 = 660pF$ a $C_2 = 660pF$ ..... 29  |  |
| <b>Obr.3.18</b> | Simulace obvodu při $C_1 = 33pF$ a $C_2 = 33pF$ ..... 30  |  |
| <b>Obr.3.19</b> | Simulace obvodu při $C_1 = 1pF$ a $C_2 = 1pF$ ..... 30  |  |
| <b>Obr.3.20</b> | Simulace obvodu při $C_1 = 990pF$ a $C_2 = 990pF$ ..... 30  |  |
| <b>Obr.3.21</b> | Simulace obvodu při $C_1 = 150pF$ a $C_2 = 723pF$ ..... 31  |  |
| <b>Obr.3.22</b> | Simulace obvodu při $C_1 = 723pF$ a $C_2 = 150pF$ ..... 31  |  |

|                 |  |    |
|-----------------|--|----|
| <b>Obr.3.23</b> | Simulace obvodu při $C_1=505\text{pF}$ a $C_2=218\text{pF}$ .....  | 31 |
| <b>Obr.3.24</b> | Simulace obvodu při $C_1=218\text{pF}$ a $C_2=505\text{pF}$ .....  | 32 |
| <b>Obr.3.25</b> | Simulace obvodu při změně $R_2$ .....  | 32 |
| <b>Obr.3.26</b> | Simulace obvodu při změně $R_2$ .....  | 32 |
| <b>Obr.3.27</b> | Simulace obvodu při změně $R_3$ .....  | 33 |
| <b>Obr.3.28</b> | Simulace obvodu při změně $R_3$ .....  | 33 |
| <b>Obr.3.29</b> | Simulace obvodu při změně $R_4$ .....  | 33 |
| <b>Obr.3.30</b> | Simulace obvodu při změně $R_4$ .....  | 34 |
| <b>Obr.3.31</b> | Simulace obvodu při změně $R_5$ .....  | 34 |
| <b>Obr.3.32</b> | Simulace obvodu při změně $R_5$ .....  | 34 |
| <b>Obr.3.32</b> | Simulace obvodu při změně $R_6$ .....  | 35 |
| <b>Obr.3.33</b> | Simulace obvodu při změně $R_6$ .....  | 35 |
| <b>Obr.3.34</b> | Simulace obvodu při změně $C_2$ .....  | 35 |
| <b>Obr.3.35</b> | Simulace obvodu při změně $C_2$ .....  | 36 |
| <b>Obr.3.36</b> | Princip transformace impedancí působením VCVS.....   | 36 |
| <b>Obr.3.37</b> | Schéma zapojení struktury Ackerberg-Mossberg, přeladování $\omega_0$ při konstantním činiteli jakosti metoda 1a..... | 37 |
| <b>Obr.3.38</b> | Schéma zapojení struktury Ackerberg-Mossberg, přeladování $\omega_0$ při konstantním činiteli jakosti metoda 1b..... | 38 |
| <b>Obr.3.39</b> | Simulace obvodů na obrázcích 3.37 a 3.38 programem Spice.....  | 39 |
| <b>Obr.3.40</b> | Schéma zapojení struktury Ackerberg-Mossberg, přeladování $\omega_0$ při konstantním činiteli jakosti metoda 1c..... | 39 |
| <b>Obr.3.41</b> | Simulace obvodu na obrázku 3.40 programem Spice.....   | 41 |
| <b>Obr.3.42</b> | Schéma zapojení struktury Ackerberg-Mossberg, přeladování $\omega_0$ při konstantní šířce pásma metoda 2a.....       | 41 |
| <b>Obr.3.43</b> | Simulace obvodu na obrázku 3.42 programem Spice.....   | 43 |
| <b>Obr.3.44</b> | Schéma zapojení struktury Ackerberg-Mossberg, přeladování $\omega_0$ při konstantní šířce pásma metoda 2b.....       | 43 |
| <b>Obr.3.45</b> | Simulace obvodu na obrázku 3.44 programem Spice.....   | 44 |
| <b>Obr.3.46</b> | Schéma zapojení struktury Ackerberg-Mossberg, přeladování $\omega_0$ při konstantní šířce pásma metoda 2c.....       | 45 |
| <b>Obr.3.47</b> | Simulace obvodu na obrázku 3.46 programem Spice.....   | 46 |
| <b>Obr.3.48</b> | Schéma zapojení struktury Ackerberg-Mossberg, změna šířky pásma při konstantním $\omega_0$ metoda 3a.....            | 46 |
| <b>Obr.3.49</b> | Simulace obvodu na obrázku 3.48 programem Spice.....   | 48 |
| <b>Obr.3.50</b> | Schéma zapojení struktury Ackerberg-Mossberg, změna šířky pásma při konstantním $\omega_0$ metoda 3b.....            | 48 |
| <b>Obr.3.51</b> | Simulace obvodu na obrázku 3.50 programem Spice.....   | 49 |
| <b>Obr.3.52</b> | Závislost $f_0$ a $Q$ na $n$ .....   | 51 |
| <b>Obr.3.53</b> | Blokové schéma univerzálního řízeného bloku 2.řádu a obvodové schéma Ackerberg-Mossberg.....                         | 51 |
| <b>Obr.3.54</b> | Blokové schéma univerzálního řízeného bloku 1.řádu a obvodové schéma Ackerberg-Mossberg.....                         | 52 |
| <b>Obr.3.55</b> | Blokové schéma univerzálního řízeného bloku 1.řádu a obvodové schéma Ackerberg-Mossberg.....                         | 52 |
| <b>Obr.4.1</b>  | Překreslení obvodu na obr.č.3.3 do editoru schémat v programu Eagle.....   | 53 |
| <b>Obr.4.2</b>  | Vytvoření desky plošných spojů pro obvod na obr.č.4.1 v programu Eagle.....  | 54 |
| <b>Obr.4.3</b>  | Vrchní strana fólie a finální desky pro obvod na obr.č.3.3.....  | 54 |
| <b>Obr.4.4</b>  | Spodní strana fólie a finální desky pro obvod na obr.č.3.3.....  | 55 |
| <b>Obr.4.5</b>  | Obvod Ackerberg-Mossberg s analogovým řízením.....   | 55 |

|                 |   |    |
|-----------------|---|----|
| <b>Obr.4.6</b>  | Obvod Ackerberg-Mossberg s analogovým řízením.....  | 56 |
| <b>Obr.4.7</b>  | Návrh obvodu s digitálním řízením pro filtr Ackerberg – Mossberg.....   | 57 |
| <b>Obr.4.8</b>  | Překreslení obvodu pro digitální řízení filtru Ackerberg-Mossberg do editoru schémat.....                                 | 58 |
| <b>Obr.4.9</b>  | Vytvoření desky plošných spojů obvodu pro digitální řízení filtru Ackerberg-Mossberg.....                                 | 58 |
| <b>Obr.4.10</b> | Deska s digitálním řízením pro filtr Ackerberg – Mossberg.....  | 59 |
| <b>Obr.4.11</b> | Příklad zobrazovaných parametrů na LCD panelu.....  | 59 |
| <b>Obr.4.12</b> | Filtr Ackerberg – Mossberg s digitálním řízením.....  | 59 |
| <b>Obr.5.1</b>  | Testování funkčnosti filtru s OZ TL072 a oměření jeho vlastností.....   | 62 |
| <b>Obr.5.2</b>  | Reálné vlastnosti obvodu s OZ: TL072 pro pásmo $f = 10-100000\text{Hz}$ .....   | 62 |
| <b>Obr.5.3</b>  | Testování funkčnosti filtru s OZ LM318 a oměření jeho vlastností.....   | 63 |
| <b>Obr.5.4</b>  | Reálné vlastnosti obvodu s OZ: LM318 pro pásmo $f = 10-100\text{Hz}$ .....  | 64 |
| <b>Obr.5.5</b>  | Reálné vlastnosti obvodu s OZ: LM318 pro pásmo $f = 100-1000\text{Hz}$ .....  | 65 |
| <b>Obr.5.6</b>  | Reálné vlastnosti obvodu s OZ: LM318 pro pásmo $f = 1000-10000\text{Hz}$ .....  | 66 |
| <b>Obr.5.7</b>  | Reálné vlastnosti obvodu s OZ: LM318 pro pásmo $f = 10000-100000\text{Hz}$ .....  | 67 |
| <b>Obr.5.8</b>  | Reálné vlastnosti obvodu s OZ: LM318 pro pásmo $f = 100000-1000000\text{Hz}$ .....  | 68 |
| <b>Obr.5.9</b>  | Ukázka měření obvodu na automatizovaném pracovišti ústavu UREL s OZ LM318 pro pásmo $f = 100000 - 1000000\text{Hz}$ ..... | 69 |
| <b>Obr.5.10</b> | Srovnání průběhů filtru s analogovým a digitálním řízením pro pásmo 100 – 1000Hz.....                                     | 70 |
| <b>Obr.5.11</b> | Různé průběhy signálů z filtru typu horní propust.....  | 72 |

# PŘÍLOHY

## Příloha 1: Naměřené reálné vlastnosti obvodu Ackerberg – Mossberg s OZ LM318 pro jednotlivá pásma přeladění

| U <sub>g</sub> = 0,16V -18dbm |                     |                       | C <sub>1,2</sub> =33nF |                       |                        |                      |                        |                      |                        |                        |
|-------------------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| f [Hz]                        | U <sub>dP</sub> [V] | U <sub>pp+a</sub> [V] | U <sub>hP</sub> [V]    | U <sub>pp-a</sub> [V] | U <sub>Pz-a</sub> [dB] | U <sub>dP</sub> [dB] | U <sub>pp+a</sub> [dB] | U <sub>hP</sub> [dB] | U <sub>pp-a</sub> [dB] | U <sub>Pz-a</sub> [dB] |
| 1                             | 0,340               | 0,015                 | 0,010                  | 0,026                 | 0,340                  | 6,547                | -20,561                | -24,082              | -15,783                | 6,547                  |
| 10                            | 1,400               | 0,136                 | 0,024                  | 0,136                 | 1,360                  | 18,840               | -1,412                 | -16,478              | -1,412                 | 18,588                 |
| 30                            | 1,880               | 0,504                 | 0,160                  | 0,560                 | 1,680                  | 21,401               | 9,966                  | 0,000                | 10,881                 | 20,424                 |
| 50                            | 2,400               | 1,080                 | 0,720                  | 1,160                 | 1,840                  | 23,522               | 16,586                 | 13,064               | 17,207                 | 21,214                 |
| 60                            | 2,960               | 1,600                 | 1,200                  | 1,640                 | 1,960                  | 25,343               | 20,000                 | 17,501               | 20,214                 | 21,763                 |
| 70                            | 3,600               | 2,400                 | 2,000                  | 2,440                 | 1,920                  | 27,044               | 23,522                 | 21,938               | 23,665                 | 21,584                 |
| 80                            | 5,440               | 3,880                 | 3,280                  | 4,000                 | 1,920                  | 30,630               | 27,694                 | 26,235               | 27,959                 | 21,584                 |
| 90                            | 8,800               | 7,280                 | 7,000                  | 7,200                 | 1,680                  | 34,807               | 33,160                 | 32,820               | 33,064                 | 20,424                 |
| 95                            | 12,800              | 11,100                | 11,200                 | 11,200                | 1,360                  | 38,062               | 36,824                 | 36,902               | 36,902                 | 18,588                 |
| 100                           | 17,200              | 16,000                | 17,400                 | 16,000                | 0,300                  | 40,628               | 40,000                 | 40,729               | 40,000                 | 5,460                  |
| 110                           | 8,200               | 8,000                 | 9,520                  | 8,200                 | 1,600                  | 34,194               | 33,979                 | 35,490               | 34,194                 | 20,000                 |
| 200                           | 0,352               | 1,200                 | 2,280                  | 1,020                 | 1,680                  | 6,848                | 17,501                 | 23,076               | 16,090                 | 20,424                 |
| 500                           | 0,047               | 0,320                 | 1,760                  | 0,316                 | 1,680                  | -10,604              | 6,021                  | 20,828               | 5,911                  | 20,424                 |
| 700                           | 0,025               | 0,224                 | 1,760                  | 0,228                 | 1,660                  | -15,986              | 2,923                  | 20,828               | 3,076                  | 20,320                 |
| 800                           | 0,020               | 0,192                 | 1,760                  | 0,196                 | 1,660                  | -18,062              | 1,584                  | 20,828               | 1,763                  | 20,320                 |
| 900                           | 0,017               | 0,172                 | 1,720                  | 0,188                 | 1,660                  | -19,680              | 0,628                  | 20,628               | 1,401                  | 20,320                 |
| 1000                          | 0,014               | 0,156                 | 1,720                  | 0,160                 | 1,640                  | -20,915              | -0,220                 | 20,628               | 0,000                  | 20,214                 |
| 5000                          | 0,004               | 0,036                 | 1,640                  | 0,037                 | 1,620                  | -32,579              | -12,956                | 20,214               | -12,672                | 20,108                 |
| 10000                         | 0,004               | 0,018                 | 1,680                  | 0,022                 | 1,640                  | -32,041              | -18,977                | 20,424               | -17,077                | 20,214                 |
| 20000                         | 0,004               | 0,012                 | 1,640                  | 0,016                 | 1,600                  | -32,041              | -22,793                | 20,214               | -19,786                | 20,000                 |
| 50000                         | 0,004               | 0,008                 | 1,640                  | 0,010                 | 1,620                  | -32,041              | -26,021                | 20,214               | -24,082                | 20,108                 |
| 100000                        | 0,004               | 0,008                 | 1,680                  | 0,012                 | 1,660                  | -32,956              | -25,597                | 20,424               | -22,499                | 20,320                 |
| 200000                        | 0,004               | 0,014                 | 1,680                  | 0,017                 | 1,680                  | -32,041              | -20,915                | 20,424               | -19,576                | 20,424                 |
| 500000                        | 0,004               | 0,043                 | 1,960                  | 0,044                 | 2,080                  | -32,041              | -11,373                | 21,763               | -11,213                | 22,279                 |
| 700000                        | 0,004               | 0,075                 | 2,040                  | 0,076                 | 2,100                  | -32,041              | -6,558                 | 22,110               | -6,466                 | 22,362                 |
| 1000000                       | 0,003               | 0,110                 | 2,000                  | 0,116                 | 2,060                  | -34,425              | -3,255                 | 21,938               | -2,793                 | 22,195                 |

| f [Hz]  | U <sub>dP</sub> [V] | U <sub>pp+a</sub> [V] | U <sub>hP</sub> [V] | U <sub>pp-a</sub> [V] | U <sub>Pz-a</sub> [dB] | U <sub>dP</sub> [dB] | U <sub>pp+a</sub> [dB] | U <sub>hP</sub> [dB] | U <sub>pp-a</sub> [dB] | U <sub>Pz-a</sub> [dB] |
|---------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| 1       | 0,340               | 0,016                 | 0,010               | 0,010                 | 0,360                  | 6,547                | -20,000                | -24,082              | -24,082                | 7,044                  |
| 10      | 1,360               | 0,026                 | 0,017               | 0,021                 | 1,280                  | 18,588               | -15,783                | -19,576              | -17,721                | 18,062                 |
| 50      | 1,920               | 0,112                 | 0,018               | 0,095                 | 1,780                  | 21,584               | -3,098                 | -19,172              | -4,510                 | 20,926                 |
| 100     | 1,920               | 0,192                 | 0,048               | 0,188                 | 1,840                  | 21,584               | 1,584                  | -10,458              | 1,401                  | 21,214                 |
| 500     | 2,240               | 1,080                 | 0,496               | 1,000                 | 1,660                  | 22,923               | 16,586                 | 9,827                | 15,918                 | 20,320                 |
| 700     | 3,120               | 1,800                 | 1,400               | 1,980                 | 1,620                  | 25,801               | 21,023                 | 18,840               | 21,851                 | 20,108                 |
| 950     | 8,160               | 7,200                 | 6,600               | 7,520                 | 1,380                  | 34,151               | 33,064                 | 32,308               | 33,442                 | 18,715                 |
| 990     | 10,900              | 10,200                | 9,800               | 10,300                | 1,100                  | 36,666               | 36,090                 | 35,742               | 36,174                 | 16,745                 |
| 1000    | 11,800              | 11,200                | 11,000              | 11,200                | 0,980                  | 37,355               | 36,902                 | 36,745               | 36,902                 | 15,742                 |
| 1050    | 14,400              | 14,200                | 14,200              | 14,100                | 0,160                  | 39,085               | 38,963                 | 38,963               | 38,902                 | 0,000                  |
| 1100    | 10,300              | 10,800                | 11,200              | 10,700                | 1,120                  | 36,174               | 36,586                 | 36,902               | 36,505                 | 16,902                 |
| 1500    | 1,600               | 2,220                 | 3,200               | 2,400                 | 1,620                  | 20,000               | 22,845                 | 26,021               | 23,522                 | 20,108                 |
| 2000    | 0,624               | 1,180                 | 2,320               | 1,380                 | 1,640                  | 11,821               | 17,355                 | 23,227               | 18,715                 | 20,214                 |
| 3000    | 0,230               | 0,652                 | 1,960               | 0,660                 | 1,620                  | 3,152                | 12,203                 | 21,763               | 12,308                 | 20,108                 |
| 5000    | 0,077               | 0,364                 | 1,800               | 0,360                 | 1,660                  | -6,375               | 7,140                  | 21,023               | 7,044                  | 20,320                 |
| 7000    | 0,040               | 0,256                 | 1,720               | 0,280                 | 1,640                  | -12,128              | 4,082                  | 20,628               | 4,861                  | 20,214                 |
| 10000   | 0,020               | 0,180                 | 1,680               | 0,180                 | 1,620                  | -18,149              | 1,023                  | 20,424               | 1,023                  | 20,108                 |
| 20000   | 0,007               | 0,088                 | 1,680               | 0,096                 | 1,620                  | -26,745              | -5,193                 | 20,424               | -4,437                 | 20,108                 |
| 50000   | 0,004               | 0,037                 | 1,680               | 0,039                 | 1,620                  | -32,956              | -12,765                | 20,424               | -12,217                | 20,108                 |
| 70000   | 0,003               | 0,026                 | 1,680               | 0,028                 | 1,620                  | -33,979              | -15,918                | 20,424               | -15,139                | 20,108                 |
| 100000  | 0,004               | 0,018                 | 1,680               | 0,020                 | 1,660                  | -32,041              | -19,172                | 20,424               | -18,237                | 20,320                 |
| 500000  | 0,004               | 0,042                 | 2,000               | 0,044                 | 2,080                  | -32,041              | -11,535                | 21,938               | -11,213                | 22,279                 |
| 700000  | 0,003               | 0,074                 | 2,080               | 0,078                 | 2,100                  | -33,979              | -6,745                 | 22,279               | -6,196                 | 22,362                 |
| 1000000 | 0,003               | 0,108                 | 1,960               | 0,117                 | 2,040                  | -33,556              | -3,414                 | 21,763               | -2,719                 | 22,110                 |

Tab.1 Naměřené reálné vlastnosti obvodu s OZ: LM318 pro pásmo f = 100-1000Hz

| U <sub>g</sub> = 0,16V -18dbm |                     |                       | C <sub>1,2</sub> =330nF |                       |                        |                      |                        |                      |                        |                        |
|-------------------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| f [Hz]                        | U <sub>dP</sub> [V] | U <sub>pp+a</sub> [V] | U <sub>hP</sub> [V]     | U <sub>pp-a</sub> [V] | U <sub>Pz-a</sub> [dB] | U <sub>dP</sub> [dB] | U <sub>pp+a</sub> [dB] | U <sub>hP</sub> [dB] | U <sub>pp-a</sub> [dB] | U <sub>Pz-a</sub> [dB] |
| 1                             | 0,220               | 0,021                 | 0,015                   | 0,028                 | 0,224                  | 2,766                | -17,638                | -20,561              | -15,139                | 2,923                  |
| 2                             | 0,440               | 0,088                 | 0,029                   | 0,086                 | 0,408                  | 8,787                | -5,193                 | -14,895              | -5,352                 | 8,131                  |
| 3                             | 0,640               | 0,192                 | 0,062                   | 0,190                 | 0,608                  | 12,041               | 1,584                  | -8,235               | 1,493                  | 11,596                 |
| 4                             | 0,920               | 0,344                 | 0,140                   | 0,348                 | 0,600                  | 15,193               | 6,649                  | -1,160               | 6,749                  | 11,481                 |
| 5                             | 1,160               | 0,568                 | 0,276                   | 0,568                 | 0,744                  | 17,207               | 11,005                 | 4,736                | 11,005                 | 13,349                 |
| 6                             | 1,500               | 0,880                 | 0,512                   | 0,888                 | 0,992                  | 19,439               | 14,807                 | 10,103               | 14,886                 | 15,848                 |
| 7                             | 2,020               | 1,440                 | 0,920                   | 1,360                 | 1,080                  | 22,025               | 19,085                 | 15,193               | 18,588                 | 16,586                 |
| 8                             | 2,860               | 2,240                 | 1,680                   | 2,220                 | 1,140                  | 25,045               | 22,923                 | 20,424               | 22,845                 | 17,056                 |
| 9                             | 4,720               | 4,160                 | 3,600                   | 4,160                 | 1,100                  | 29,396               | 28,299                 | 27,044               | 28,299                 | 16,745                 |
| 10                            | 10,000              | 9,840                 | 9,400                   | 9,920                 | 0,204                  | 35,918               | 35,778                 | 35,380               | 35,848                 | 2,110                  |
| 11                            | 11,600              | 11,400                | 11,600                  | 11,800                | 0,048                  | 37,207               | 37,056                 | 37,207               | 37,355                 | -10,458                |
| 11                            | 8,640               | 8,560                 | 9,040                   | 9,400                 | 1,180                  | 34,648               | 34,567                 | 35,041               | 35,380                 | 17,355                 |
| 12                            | 4,080               | 4,640                 | 5,200                   | 6,600                 | 1,360                  | 28,131               | 29,248                 | 30,238               | 32,308                 | 18,588                 |
| 15                            | 1,440               | 2,000                 | 2,880                   | 2,040                 | 1,480                  | 19,085               | 21,938                 | 25,105               | 22,110                 | 19,323                 |
| 20                            | 0,584               | 1,120                 | 2,160                   | 1,280                 | 1,560                  | 11,246               | 16,902                 | 22,607               | 18,062                 | 19,780                 |
| 50                            | 0,088               | 0,392                 | 1,960                   | 0,400                 | 1,780                  | -5,193               | 7,783                  | 21,763               | 7,959                  | 20,926                 |
| 100                           | 0,023               | 0,200                 | 1,920                   | 0,208                 | 1,840                  | -16,773              | 1,938                  | 21,584               | 2,279                  | 21,214                 |
| 500                           | 0,004               | 0,038                 | 1,720                   | 0,048                 | 1,680                  | -32,041              | -12,396                | 20,628               | -10,458                | 20,424                 |
| 1000                          | 0,004               | 0,021                 | 1,720                   | 0,032                 | 1,680                  | -32,041              | -17,721                | 20,628               | -13,979                | 20,424                 |
| 2000                          | 0,004               | 0,013                 | 1,720                   | 0,024                 | 1,660                  | -32,041              | -21,540                | 20,628               | -16,478                | 20,320                 |
| 5000                          | 0,004               | 0,009                 | 1,720                   | 0,014                 | 1,560                  | -32,041              | -24,807                | 20,628               | -21,160                | 19,780                 |
| 10000                         | 0,004               | 0,006                 | 1,720                   | 0,011                 | 1,660                  | -32,041              | -28,519                | 20,628               | -23,576                | 20,320                 |
| 20000                         | 0,006               | 0,006                 | 1,680                   | 0,009                 | 1,620                  | -28,519              | -29,119                | 20,424               | -24,998                | 20,108                 |
| 50000                         | 0,005               | 0,008                 | 1,720                   | 0,012                 | 1,640                  | -30,103              | -25,806                | 20,628               | -22,645                | 20,214                 |
| 100000                        | 0,005               | 0,009                 | 1,720                   | 0,013                 | 1,680                  | -30,103              | -24,620                | 20,628               | -21,671                | 20,424                 |
| 200000                        | 0,005               | 0,014                 | 1,760                   | 0,018                 | 1,680                  | -30,103              | -20,915                | 20,828               | -19,074                | 20,424                 |
| 500000                        | 0,004               | 0,044                 | 2,000                   | 0,051                 | 2,100                  | -32,041              | -11,213                | 21,938               | -9,897                 | 22,362                 |
| 700000                        | 0,004               | 0,074                 | 2,080                   | 0,082                 | 2,160                  | -32,041              | -6,651                 | 22,279               | -5,764                 | 22,607                 |
| 1000000                       | 0,004               | 0,108                 | 1,960                   | 0,120                 | 2,000                  | -32,041              | -3,414                 | 21,763               | -2,499                 | 21,938                 |

| f [Hz]  | U <sub>dP</sub> [V] | U <sub>pp+a</sub> [V] | U <sub>hP</sub> [V] | U <sub>pp-a</sub> [V] | U <sub>Pz-a</sub> [dB] | U <sub>dP</sub> [dB] | U <sub>pp+a</sub> [dB] | U <sub>hP</sub> [dB] | U <sub>pp-a</sub> [dB] | U <sub>Pz-a</sub> [dB] |
|---------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| 1       | 0,380               | 0,026                 | 0,026               | 0,003                 | 0,410                  | 7,513                | -15,783                | -15,783              | -34,255                | 8,173                  |
| 10      | 1,520               | 0,160                 | 0,028               | 0,166                 | 1,280                  | 19,554               | 0,000                  | -15,139              | 0,320                  | 18,062                 |
| 20      | 1,760               | 0,360                 | 0,084               | 0,360                 | 1,560                  | 20,828               | 7,044                  | -5,597               | 7,044                  | 19,780                 |
| 50      | 2,560               | 1,280                 | 0,656               | 1,260                 | 1,760                  | 24,082               | 18,062                 | 12,256               | 17,925                 | 20,828                 |
| 70      | 4,400               | 2,960                 | 2,200               | 3,000                 | 1,880                  | 28,787               | 25,343                 | 22,766               | 25,460                 | 21,401                 |
| 80      | 6,000               | 4,960                 | 4,120               | 5,200                 | 1,820                  | 31,481               | 29,827                 | 28,216               | 30,238                 | 21,119                 |
| 90      | 11,400              | 10,800                | 10,000              | 11,000                | 1,440                  | 37,056               | 36,586                 | 35,918               | 36,745                 | 19,085                 |
| 91      | 12,000              | 11,600                | 11,000              | 11,600                | 1,320                  | 37,501               | 37,207                 | 36,745               | 37,207                 | 18,329                 |
| 92      | 15,600              | 12,800                | 12,400              | 12,800                | 1,160                  | 39,780               | 38,062                 | 37,786               | 38,062                 | 17,207                 |
| 95      | 15,700              | 16,000                | 15,600              | 16,000                | 0,420                  | 39,836               | 40,000                 | 39,780               | 40,000                 | 8,383                  |
| 96      | 15,800              | 16,400                | 16,400              | 16,400                | 0,096                  | 39,891               | 40,214                 | 40,214               | 40,214                 | -4,437                 |
| 97      | 16,000              | 16,400                | 16,400              | 16,400                | 0,380                  | 40,000               | 40,214                 | 40,214               | 40,214                 | 7,513                  |
| 98      | 15,600              | 15,600                | 16,000              | 15,600                | 0,680                  | 39,780               | 39,780                 | 40,000               | 39,780                 | 12,568                 |
| 99      | 14,400              | 14,800                | 14,800              | 14,800                | 0,960                  | 39,085               | 39,323                 | 39,323               | 39,323                 | 15,563                 |
| 100     | 13,200              | 13,800                | 14,000              | 13,600                | 1,160                  | 38,329               | 38,715                 | 38,840               | 38,588                 | 17,207                 |
| 101     | 12,000              | 12,400                | 13,000              | 12,400                | 1,320                  | 37,501               | 37,786                 | 38,196               | 37,786                 | 18,329                 |
| 102     | 10,800              | 11,400                | 12,200              | 11,300                | 1,480                  | 36,586               | 37,056                 | 37,645               | 36,979                 | 19,323                 |
| 105     | 8,160               | 9,000                 | 9,800               | 8,160                 | 1,640                  | 34,151               | 35,002                 | 35,742               | 34,151                 | 20,214                 |
| 110     | 5,520               | 6,400                 | 7,400               | 6,240                 | 1,760                  | 30,756               | 32,041                 | 33,302               | 31,821                 | 20,828                 |
| 150     | 1,360               | 2,000                 | 3,000               | 1,880                 | 1,800                  | 18,588               | 21,938                 | 25,460               | 21,401                 | 21,023                 |
| 200     | 0,640               | 1,080                 | 2,240               | 1,080                 | 1,760                  | 12,041               | 16,586                 | 22,923               | 16,586                 | 20,828                 |
| 500     | 0,045               | 0,360                 | 1,760               | 0,344                 | 1,760                  | -10,980              | 7,044                  | 20,828               | 6,649                  | 20,828                 |
| 1000    | 0,014               | 0,164                 | 1,720               | 0,168                 | 1,680                  | -21,412              | 0,214                  | 20,628               | 0,424                  | 20,424                 |
| 5000    | 0,004               | 0,036                 | 1,680               | 0,037                 | 1,680                  | -32,041              | -12,956                | 20,424               | -12,672                | 20,424                 |
| 10000   | 0,004               | 0,019                 | 1,760               | 0,022                 | 1,720                  | -32,041              | -18,507                | 20,828               | -17,393                | 20,628                 |
| 50000   | 0,005               | 0,007                 | 1,680               | 0,011                 | 1,680                  | -30,458              | -26,698                | 20,424               | -23,414                | 20,424                 |
| 100000  | 0,004               | 0,008                 | 1,680               | 0,015                 | 1,680                  | -32,956              | -25,806                | 20,424               | -20,446                | 20,424                 |
| 300000  | 0,004               | 0,017                 | 1,760               | 0,022                 | 1,800                  | -32,041              | -19,576                | 20,828               | -17,393                | 21,023                 |
| 500000  | 0,004               | 0,046                 | 2,000               | 0,056                 | 2,120                  | -32,956              | -10,752                | 21,938               | -9,119                 | 22,444                 |
| 700000  | 0,004               | 0,075                 | 2,040               | 0,092                 | 2,160                  | -32,956              | -6,558                 | 22,110               | -4,807                 | 22,607                 |
| 1000000 | 0,036               | 0,107                 | 2,000               | 0,136                 | 2,080                  | -12,956              | -3,495                 | 21,938               | -1,412                 | 22,279                 |

**Tab.2** Naměřené reálné vlastnosti obvodu s OZ: LM318 pro pásmo f = 10-100Hz

| U <sub>g</sub> = 0,16V -18dbm |                     |                       | C <sub>1,2</sub> =3,3nF |                       |                        |                      |                        |                      |                        |                        |
|-------------------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| f [Hz]                        | U <sub>dP</sub> [V] | U <sub>pp+a</sub> [V] | U <sub>hP</sub> [V]     | U <sub>pp-a</sub> [V] | U <sub>Pz-a</sub> [dB] | U <sub>dP</sub> [dB] | U <sub>pp+a</sub> [dB] | U <sub>hP</sub> [dB] | U <sub>pp-a</sub> [dB] | U <sub>Pz-a</sub> [dB] |
| 1                             | 0,240               | 0,008                 | 0,015                   | 0,010                 | 1,120                  | 3,522                | -26,021                | -20,561              | -23,742                | 16,902                 |
| 10                            | 1,280               | 0,016                 | 0,018                   | 0,016                 | 1,360                  | 18,062               | -20,000                | -18,977              | -19,786                | 18,588                 |
| 20                            | 1,540               | 0,034                 | 0,016                   | 0,037                 | 1,600                  | 19,668               | -13,453                | -20,000              | -12,765                | 20,000                 |
| 50                            | 1,780               | 0,112                 | 0,020                   | 0,095                 | 1,840                  | 20,926               | -3,098                 | -18,062              | -4,510                 | 21,214                 |
| 70                            | 1,920               | 0,144                 | 0,026                   | 0,140                 | 2,000                  | 21,584               | -0,915                 | -15,650              | -1,160                 | 21,938                 |
| 100                           | 1,840               | 0,200                 | 0,038                   | 0,190                 | 1,920                  | 21,214               | 1,938                  | -12,396              | 1,493                  | 21,584                 |
| 200                           | 1,760               | 0,400                 | 0,112                   | 0,356                 | 1,760                  | 20,828               | 7,959                  | -3,098               | 6,947                  | 20,828                 |
| 300                           | 1,860               | 0,640                 | 0,232                   | 0,552                 | 1,680                  | 21,308               | 12,041                 | 3,227                | 10,756                 | 20,424                 |
| 400                           | 2,080               | 0,880                 | 0,432                   | 0,824                 | 1,680                  | 22,279               | 14,807                 | 8,627                | 14,236                 | 20,424                 |
| 500                           | 2,400               | 1,240                 | 0,800                   | 1,170                 | 1,680                  | 23,522               | 17,786                 | 13,979               | 17,281                 | 20,424                 |
| 600                           | 2,940               | 2,640                 | 1,360                   | 1,740                 | 1,680                  | 25,285               | 24,350                 | 18,588               | 20,729                 | 20,424                 |
| 700                           | 4,040               | 4,000                 | 2,520                   | 2,800                 | 1,680                  | 28,045               | 27,959                 | 23,946               | 24,861                 | 20,424                 |
| 800                           | 6,840               | 6,400                 | 5,600                   | 5,520                 | 1,520                  | 32,619               | 32,041                 | 30,881               | 30,756                 | 19,554                 |
| 900                           | 14,000              | 13,200                | 14,400                  | 12,900                | 0,560                  | 38,840               | 38,329                 | 39,085               | 38,129                 | 10,881                 |
| 920                           | 13,800              | 12,400                | 14,600                  | 13,200                | 0,320                  | 38,715               | 37,786                 | 39,205               | 38,329                 | 6,021                  |
| 940                           | 11,200              | 10,100                | 13,600                  | 11,600                | 0,880                  | 36,902               | 36,004                 | 38,588               | 37,207                 | 14,807                 |
| 960                           | 9,800               | 8,160                 | 11,400                  | 9,600                 | 1,240                  | 35,742               | 34,151                 | 37,056               | 35,563                 | 17,786                 |
| 980                           | 8,000               | 6,880                 | 9,680                   | 7,760                 | 1,400                  | 33,979               | 32,669                 | 35,635               | 33,715                 | 18,840                 |
| 1000                          | 6,600               | 6,280                 | 7,760                   | 6,560                 | 1,560                  | 32,308               | 31,877                 | 33,715               | 32,256                 | 19,780                 |
| 2000                          | 0,432               | 0,824                 | 2,080                   | 1,120                 | 1,680                  | 8,627                | 14,236                 | 22,279               | 16,902                 | 20,424                 |
| 5000                          | 0,072               | 0,270                 | 1,700                   | 0,280                 | 1,720                  | -6,936               | 4,545                  | 20,527               | 4,861                  | 20,628                 |
| 7000                          | 0,032               | 0,192                 | 1,660                   | 0,196                 | 1,760                  | -14,034              | 1,584                  | 20,320               | 1,763                  | 20,828                 |
| 10000                         | 0,017               | 0,134                 | 1,640                   | 0,140                 | 1,680                  | -19,576              | -1,540                 | 20,214               | -1,160                 | 20,424                 |
| 20000                         | 0,006               | 0,068                 | 1,620                   | 0,072                 | 1,680                  | -27,959              | -7,394                 | 20,108               | -6,936                 | 20,424                 |
| 50000                         | 0,005               | 0,028                 | 1,620                   | 0,030                 | 1,640                  | -30,458              | -15,139                | 20,108               | -14,425                | 20,214                 |
| 70000                         | 0,005               | 0,020                 | 1,620                   | 0,024                 | 1,680                  | -30,458              | -18,062                | 20,108               | -16,335                | 20,424                 |
| 100000                        | 0,005               | 0,015                 | 1,620                   | 0,016                 | 1,640                  | -30,458              | -20,446                | 20,108               | -20,220                | 20,214                 |
| 200000                        | 0,005               | 0,010                 | 1,680                   | 0,013                 | 1,680                  | -30,458              | -23,742                | 20,424               | -21,938                | 20,424                 |
| 500000                        | 0,005               | 0,038                 | 1,980                   | 0,045                 | 2,040                  | -30,458              | -12,396                | 21,851               | -11,018                | 22,110                 |
| 700000                        | 0,005               | 0,075                 | 2,040                   | 0,079                 | 2,160                  | -30,458              | -6,558                 | 22,110               | -6,108                 | 22,607                 |
| 1000000                       | 0,005               | 0,105                 | 1,920                   | 0,113                 | 2,040                  | -30,458              | -3,659                 | 21,584               | -3,021                 | 22,110                 |

| f [Hz]  | U <sub>dP</sub> [V] | U <sub>pp+a</sub> [V] | U <sub>hP</sub> [V] | U <sub>pp-a</sub> [V] | U <sub>Pz-a</sub> [dB] | U <sub>dP</sub> [dB] | U <sub>pp+a</sub> [dB] | U <sub>hP</sub> [dB] | U <sub>pp-a</sub> [dB] | U <sub>Pz-a</sub> [dB] |
|---------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| 1       | 0,200               | 0,005                 | 0,010               | 0,010                 | 0,023                  | 1,938                | -30,103                | -24,082              | -23,742                | -16,848                |
| 10      | 1,320               | 0,007                 | 0,010               | 0,013                 | 1,280                  | 18,329               | -27,180                | -24,082              | -21,938                | 18,062                 |
| 20      | 1,600               | 0,008                 | 0,010               | 0,013                 | 1,580                  | 20,000               | -26,021                | -24,082              | -21,938                | 19,891                 |
| 50      | 1,840               | 0,013                 | 0,019               | 0,018                 | 1,780                  | 21,214               | -21,540                | -18,416              | -19,172                | 20,926                 |
| 70      | 1,960               | 0,018                 | 0,016               | 0,022                 | 1,940                  | 21,763               | -19,172                | -20,000              | -17,393                | 21,674                 |
| 100     | 1,880               | 0,022                 | 0,015               | 0,025                 | 1,840                  | 21,401               | -17,077                | -20,677              | -16,193                | 21,214                 |
| 200     | 1,720               | 0,038                 | 0,016               | 0,041                 | 1,680                  | 20,628               | -12,579                | -20,000              | -11,869                | 20,424                 |
| 500     | 1,680               | 0,082                 | 0,019               | 0,089                 | 1,660                  | 20,424               | -5,849                 | -18,416              | -5,114                 | 20,320                 |
| 700     | 1,720               | 0,128                 | 0,021               | 0,116                 | 1,640                  | 20,628               | -1,938                 | -17,721              | -2,793                 | 20,214                 |
| 1000    | 1,680               | 0,176                 | 0,030               | 0,162                 | 1,640                  | 20,424               | 0,828                  | -14,425              | 0,108                  | 20,214                 |
| 2000    | 1,800               | 0,344                 | 0,104               | 0,330                 | 1,640                  | 21,023               | 6,649                  | -3,742               | 6,288                  | 20,214                 |
| 5000    | 2,320               | 1,120                 | 0,720               | 1,500                 | 1,620                  | 23,227               | 16,902                 | 13,064               | 19,439                 | 20,108                 |
| 7000    | 3,800               | 2,320                 | 1,840               | 2,200                 | 1,620                  | 27,513               | 23,227                 | 21,214               | 22,766                 | 20,108                 |
| 8000    | 5,600               | 3,440                 | 3,200               | 3,360                 | 1,580                  | 30,881               | 26,649                 | 26,021               | 26,444                 | 19,891                 |
| 9000    | 9,800               | 6,400                 | 6,600               | 6,440                 | 1,420                  | 35,742               | 32,041                 | 32,308               | 32,095                 | 18,963                 |
| 9100    | 14,600              | 6,880                 | 7,200               | 6,960                 | 1,360                  | 39,205               | 32,669                 | 33,064               | 32,770                 | 18,588                 |
| 9200    | 14,400              | 7,520                 | 7,800               | 7,600                 | 1,300                  | 39,085               | 33,442                 | 33,759               | 33,534                 | 18,196                 |
| 9300    | 14,000              | 8,160                 | 8,400               | 8,160                 | 1,260                  | 38,840               | 34,151                 | 34,403               | 34,151                 | 17,925                 |
| 9400    | 13,400              | 8,800                 | 9,400               | 8,960                 | 1,160                  | 38,460               | 34,807                 | 35,380               | 34,964                 | 17,207                 |
| 9500    | 12,200              | 9,680                 | 10,200              | 9,680                 | 1,080                  | 37,645               | 35,635                 | 36,090               | 35,635                 | 16,586                 |
| 9600    | 10,200              | 10,400                | 11,200              | 10,400                | 0,940                  | 36,090               | 36,258                 | 36,902               | 36,258                 | 15,380                 |
| 9700    | 9,000               | 11,200                | 11,800              | 11,200                | 0,820                  | 35,002               | 36,902                 | 37,355               | 36,902                 | 14,194                 |
| 9800    | 8,000               | 11,800                | 12,600              | 11,800                | 0,640                  | 33,979               | 37,355                 | 37,925               | 37,355                 | 12,041                 |
| 9900    | 7,000               | 12,300                | 13,000              | 12,300                | 0,460                  | 32,820               | 37,716                 | 38,196               | 37,716                 | 9,173                  |
| 10000   | 6,400               | 12,600                | 13,400              | 12,600                | 0,340                  | 32,041               | 37,925                 | 38,460               | 37,925                 | 6,547                  |
| 20000   | 0,464               | 1,020                 | 2,240               | 1,200                 | 1,620                  | 9,248                | 16,090                 | 22,923               | 17,501                 | 20,108                 |
| 50000   | 0,062               | 0,324                 | 1,720               | 0,340                 | 1,620                  | -8,179               | 6,129                  | 20,628               | 6,547                  | 20,108                 |
| 70000   | 0,033               | 0,226                 | 1,720               | 0,230                 | 1,620                  | -13,765              | 3,000                  | 20,628               | 3,152                  | 20,108                 |
| 100000  | 0,018               | 0,156                 | 1,720               | 0,154                 | 1,600                  | -19,172              | -0,220                 | 20,628               | -0,332                 | 20,000                 |
| 200000  | 0,007               | 0,072                 | 1,720               | 0,078                 | 1,800                  | -26,936              | -6,936                 | 20,628               | -6,241                 | 21,023                 |
| 500000  | 0,004               | 0,024                 | 2,000               | 0,032                 | 2,080                  | -32,041              | -16,478                | 21,938               | -13,979                | 22,279                 |
| 700000  | 0,004               | 0,050                 | 2,000               | 0,058                 | 2,120                  | -32,041              | -10,103                | 21,938               | -8,814                 | 22,444                 |
| 1000000 | 0,005               | 0,090                 | 1,880               | 0,096                 | 2,040                  | -30,458              | -4,998                 | 21,401               | -4,437                 | 22,110                 |

**Tab.3** Naměřené reálné vlastnosti obvodu s OZ: LM318 pro pásmo f = 1000-10000Hz

| U <sub>g</sub> = 0,16V -18dbm |                     |                       | C <sub>1,2</sub> = 330pF |                       |                        |                      |                        |                      |                        |                        |
|-------------------------------|---------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| f [Hz]                        | U <sub>dP</sub> [V] | U <sub>pp+a</sub> [V] | U <sub>hP</sub> [V]      | U <sub>pp-a</sub> [V] | U <sub>Pz-a</sub> [dB] | U <sub>dP</sub> [dB] | U <sub>pp+a</sub> [dB] | U <sub>hP</sub> [dB] | U <sub>pp-a</sub> [dB] | U <sub>Pz-a</sub> [dB] |
| 1                             | 0,140               | 0,004                 | 0,005                    | 0,007                 | 0,200                  | -1,160               | -32,041                | -30,103              | -27,180                | 1,938                  |
| 5                             | 0,860               | 0,007                 | 0,010                    | 0,009                 | 0,960                  | 14,608               | -27,180                | -24,082              | -25,193                | 15,563                 |
| 10                            | 1,300               | 0,005                 | 0,012                    | 0,011                 | 1,400                  | 18,196               | -29,762                | -22,499              | -23,414                | 18,840                 |
| 20                            | 1,560               | 0,008                 | 0,013                    | 0,012                 | 1,600                  | 19,780               | -25,806                | -21,804              | -22,214                | 20,000                 |
| 50                            | 1,760               | 0,012                 | 0,015                    | 0,016                 | 1,800                  | 20,828               | -22,355                | -20,561              | -19,786                | 21,023                 |
| 70                            | 1,920               | 0,017                 | 0,015                    | 0,019                 | 2,000                  | 21,584               | -19,271                | -20,561              | -18,599                | 21,938                 |
| 100                           | 1,840               | 0,022                 | 0,016                    | 0,026                 | 1,920                  | 21,214               | -17,155                | -20,000              | -15,783                | 21,584                 |
| 200                           | 1,680               | 0,036                 | 0,020                    | 0,038                 | 1,760                  | 20,424               | -12,956                | -18,062              | -12,487                | 20,828                 |
| 500                           | 1,640               | 0,084                 | 0,018                    | 0,084                 | 1,760                  | 20,214               | -5,597                 | -19,172              | -5,597                 | 20,828                 |
| 700                           | 1,640               | 0,114                 | 0,022                    | 0,116                 | 1,760                  | 20,214               | -2,944                 | -17,393              | -2,793                 | 20,828                 |
| 1000                          | 1,640               | 0,156                 | 0,027                    | 0,160                 | 1,720                  | 20,214               | -0,220                 | -15,391              | 0,000                  | 20,628                 |
| 2000                          | 1,700               | 0,320                 | 0,070                    | 0,328                 | 1,720                  | 20,527               | 6,021                  | -7,230               | 6,235                  | 20,628                 |
| 5000                          | 2,080               | 0,960                 | 0,640                    | 0,976                 | 1,720                  | 22,279               | 15,563                 | 12,041               | 15,707                 | 20,628                 |
| 7000                          | 2,760               | 1,920                 | 1,280                    | 2,000                 | 1,720                  | 24,736               | 21,584                 | 18,062               | 21,938                 | 20,628                 |
| 9000                          | 4,920               | 4,160                 | 3,360                    | 4,240                 | 1,600                  | 29,757               | 28,299                 | 26,444               | 28,465                 | 20,000                 |
| 10000                         | 7,600               | 7,040                 | 6,480                    | 7,040                 | 1,280                  | 33,534               | 32,869                 | 32,149               | 32,869                 | 18,062                 |
| 10100                         | 8,000               | 7,360                 | 6,880                    | 7,440                 | 1,240                  | 33,979               | 33,255                 | 32,669               | 33,349                 | 17,786                 |
| 10200                         | 8,400               | 7,920                 | 7,280                    | 7,840                 | 1,160                  | 34,403               | 33,892                 | 33,160               | 33,804                 | 17,207                 |
| 10300                         | 8,640               | 8,240                 | 7,840                    | 8,160                 | 1,120                  | 34,648               | 34,236                 | 33,804               | 34,151                 | 16,902                 |
| 10400                         | 8,960               | 8,640                 | 8,240                    | 8,560                 | 0,960                  | 34,964               | 34,648                 | 34,236               | 34,567                 | 15,563                 |
| 10500                         | 9,280               | 8,960                 | 8,720                    | 8,960                 | 0,840                  | 35,269               | 34,964                 | 34,728               | 34,964                 | 14,403                 |
| 10600                         | 9,440               | 9,200                 | 8,960                    | 9,200                 | 0,800                  | 35,417               | 35,193                 | 34,964               | 35,193                 | 13,979                 |
| 10700                         | 9,440               | 9,280                 | 9,120                    | 9,360                 | 0,760                  | 35,417               | 35,269                 | 35,117               | 35,343                 | 13,534                 |
| 10800                         | 9,520               | 9,360                 | 9,360                    | 9,440                 | 0,760                  | 35,490               | 35,343                 | 35,343               | 35,417                 | 13,534                 |
| 10900                         | 9,360               | 9,440                 | 9,440                    | 9,360                 | 0,760                  | 35,343               | 35,417                 | 35,417               | 35,343                 | 13,534                 |
| 11000                         | 9,120               | 9,280                 | 9,440                    | 9,280                 | 0,800                  | 35,117               | 35,269                 | 35,417               | 35,269                 | 13,979                 |
| 13000                         | 3,440               | 4,040                 | 4,840                    | 4,120                 | 1,560                  | 26,649               | 28,045                 | 29,615               | 28,216                 | 19,780                 |
| 15000                         | 1,920               | 2,360                 | 3,300                    | 2,380                 | 1,640                  | 21,584               | 23,376                 | 26,288               | 23,449                 | 20,214                 |
| 17000                         | 1,280               | 1,720                 | 2,700                    | 1,740                 | 1,680                  | 18,062               | 20,628                 | 24,545               | 20,729                 | 20,424                 |
| 20000                         | 0,688               | 1,250                 | 2,280                    | 1,240                 | 1,680                  | 12,669               | 17,856                 | 23,076               | 17,786                 | 20,424                 |
| 30000                         | 0,264               | 0,676                 | 1,880                    | 0,688                 | 1,720                  | 4,350                | 12,517                 | 21,401               | 12,669                 | 20,628                 |
| 50000                         | 0,104               | 0,380                 | 1,840                    | 0,384                 | 1,680                  | -3,742               | 7,513                  | 21,214               | 7,604                  | 20,424                 |
| 100000                        | 0,028               | 0,192                 | 1,760                    | 0,188                 | 1,680                  | -15,139              | 1,584                  | 20,828               | 1,401                  | 20,424                 |
| 300000                        | 0,009               | 0,076                 | 1,920                    | 0,068                 | 1,760                  | -24,998              | -6,466                 | 21,584               | -7,432                 | 20,828                 |
| 500000                        | 0,007               | 0,036                 | 2,080                    | 0,026                 | 2,120                  | -27,180              | -12,956                | 22,279               | -15,783                | 22,444                 |
| 700000                        | 0,006               | 0,048                 | 2,160                    | 0,034                 | 2,120                  | -28,519              | -10,458                | 22,607               | -13,453                | 22,444                 |
| 1000000                       | 0,007               | 0,104                 | 2,080                    | 0,082                 | 2,080                  | -27,180              | -3,742                 | 22,279               | -5,806                 | 22,279                 |

| f [Hz]  | U <sub>dP</sub> [V] | U <sub>pp+a</sub> [V] | U <sub>hP</sub> [V] | U <sub>pp-a</sub> [V] | U <sub>Pz-a</sub> [dB] | U <sub>dP</sub> [dB] | U <sub>pp+a</sub> [dB] | U <sub>hP</sub> [dB] | U <sub>pp-a</sub> [dB] | U <sub>Pz-a</sub> [dB] |
|---------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| 1       | 0,200               | 0,008                 | 0,009               | 0,009                 | 0,320                  | 1,938                | -26,021                | -24,998              | -24,998                | 6,021                  |
| 5       | 1,100               | 0,009                 | 0,009               | 0,009                 | 1,200                  | 16,745               | -24,998                | -24,998              | -24,998                | 17,501                 |
| 10      | 1,400               | 0,007                 | 0,010               | 0,009                 | 1,360                  | 18,840               | -27,180                | -24,082              | -24,998                | 18,588                 |
| 20      | 1,680               | 0,009                 | 0,010               | 0,011                 | 1,600                  | 20,424               | -24,998                | -24,082              | -23,098                | 20,000                 |
| 50      | 1,840               | 0,009                 | 0,011               | 0,011                 | 1,880                  | 21,214               | -24,998                | -23,255              | -23,098                | 21,401                 |
| 70      | 2,000               | 0,011                 | 0,010               | 0,012                 | 2,000                  | 21,938               | -23,176                | -24,082              | -22,645                | 21,938                 |
| 100     | 1,800               | 0,011                 | 0,015               | 0,013                 | 1,920                  | 21,023               | -23,098                | -20,561              | -21,938                | 21,584                 |
| 200     | 1,720               | 0,013                 | 0,020               | 0,013                 | 1,760                  | 20,628               | -21,671                | -18,062              | -21,938                | 20,828                 |
| 500     | 1,720               | 0,016                 | 0,013               | 0,018                 | 1,680                  | 20,628               | -19,786                | -21,671              | -18,786                | 20,424                 |
| 700     | 1,720               | 0,021                 | 0,014               | 0,022                 | 1,680                  | 20,628               | -17,721                | -21,160              | -17,393                | 20,424                 |
| 1000    | 1,720               | 0,027                 | 0,016               | 0,026                 | 1,720                  | 20,628               | -15,391                | -20,220              | -15,918                | 20,628                 |
| 2000    | 1,720               | 0,041                 | 0,017               | 0,042                 | 1,680                  | 20,628               | -11,869                | -19,576              | -11,701                | 20,424                 |
| 5000    | 1,720               | 0,096                 | 0,018               | 0,093                 | 1,680                  | 20,628               | -4,437                 | -19,172              | -4,731                 | 20,424                 |
| 7000    | 1,720               | 0,128                 | 0,026               | 0,124                 | 1,680                  | 20,628               | -1,938                 | -15,918              | -2,214                 | 20,424                 |
| 10000   | 1,720               | 0,176                 | 0,038               | 0,184                 | 1,680                  | 20,628               | 0,828                  | -12,533              | 1,214                  | 20,424                 |
| 20000   | 1,800               | 0,360                 | 0,092               | 0,360                 | 1,680                  | 21,023               | 7,044                  | -4,807               | 7,044                  | 20,424                 |
| 50000   | 2,400               | 1,280                 | 0,640               | 1,280                 | 1,640                  | 23,522               | 18,062                 | 12,041               | 18,062                 | 20,214                 |
| 70000   | 3,680               | 2,640                 | 2,160               | 2,560                 | 1,640                  | 27,235               | 24,350                 | 22,607               | 24,082                 | 20,214                 |
| 80000   | 5,440               | 4,320                 | 3,920               | 4,320                 | 1,600                  | 30,630               | 28,627                 | 27,783               | 28,627                 | 20,000                 |
| 82000   | 5,920               | 4,800                 | 4,320               | 4,880                 | 1,560                  | 31,364               | 29,542                 | 28,627               | 29,686                 | 19,780                 |
| 85000   | 7,200               | 5,920                 | 5,520               | 5,840                 | 1,520                  | 33,064               | 31,364                 | 30,756               | 31,246                 | 19,554                 |
| 87000   | 8,160               | 6,880                 | 6,640               | 6,960                 | 1,480                  | 34,151               | 32,669                 | 32,361               | 32,770                 | 19,323                 |
| 90000   | 9,920               | 8,640                 | 8,560               | 8,720                 | 1,280                  | 35,848               | 34,648                 | 34,567               | 34,728                 | 18,062                 |
| 92000   | 11,000              | 9,760                 | 10,000              | 9,840                 | 1,120                  | 36,745               | 35,707                 | 35,918               | 35,778                 | 16,902                 |
| 95000   | 11,600              | 10,000                | 11,200              | 10,800                | 0,960                  | 37,207               | 35,918                 | 36,902               | 36,586                 | 15,563                 |
| 97000   | 10,700              | 9,920                 | 11,200              | 10,400                | 1,000                  | 36,505               | 35,848                 | 36,902               | 36,258                 | 15,918                 |
| 100000  | 8,800               | 9,120                 | 9,840               | 8,960                 | 1,240                  | 34,807               | 35,117                 | 35,778               | 34,964                 | 17,786                 |
| 110000  | 4,240               | 4,720                 | 5,760               | 4,760                 | 1,560                  | 28,465               | 29,396                 | 31,126               | 29,470                 | 19,780                 |
| 120000  | 2,640               | 3,220                 | 4,200               | 3,180                 | 1,640                  | 24,350               | 26,075                 | 28,383               | 25,966                 | 20,214                 |
| 150000  | 1,120               | 1,660                 | 2,700               | 1,640                 | 1,640                  | 16,902               | 20,320                 | 24,545               | 20,214                 | 20,214                 |
| 170000  | 0,760               | 1,300                 | 2,400               | 1,280                 | 1,640                  | 13,534               | 18,196                 | 23,522               | 18,062                 | 20,214                 |
| 200000  | 0,500               | 0,980                 | 2,160               | 1,000                 | 1,680                  | 9,897                | 15,742                 | 22,607               | 15,918                 | 20,424                 |
| 500000  | 0,071               | 0,322                 | 2,080               | 0,334                 | 2,040                  | -7,082               | 6,075                  | 22,279               | 6,393                  | 22,110                 |
| 700000  | 0,035               | 0,182                 | 2,040               | 0,194                 | 2,120                  | -13,152              | 1,119                  | 22,110               | 1,674                  | 22,444                 |
| 1000000 | 0,013               | 0,070                 | 1,920               | 0,078                 | 2,000                  | -21,671              | -7,180                 | 21,584               | -6,241                 | 21,938                 |

**Tab.4** Naměřené reálné vlastnosti obvodu s OZ: LM318 pro pásmo f = 10000-100000Hz

| U <sub>g</sub> = 0,16V -18dbm |                     |                       | C <sub>1,2</sub> =33pF |                       |                        |                      |                        |                      |                        |                        |
|-------------------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| f [Hz]                        | U <sub>dP</sub> [V] | U <sub>pp+a</sub> [V] | U <sub>hP</sub> [V]    | U <sub>pp-a</sub> [V] | U <sub>Pz-a</sub> [dB] | U <sub>dP</sub> [dB] | U <sub>pp+a</sub> [dB] | U <sub>hP</sub> [dB] | U <sub>pp-a</sub> [dB] | U <sub>Pz-a</sub> [dB] |
| 1                             | 0,240               | 0,003                 | 0,002                  | 0,008                 | 0,220                  | 3,522                | -34,540                | -38,062              | -26,021                | 2,766                  |
| 2                             | 0,480               | 0,002                 | 0,002                  | 0,009                 | 0,400                  | 9,542                | -37,638                | -38,062              | -24,998                | 7,959                  |
| 5                             | 0,960               | 0,003                 | 0,005                  | 0,011                 | 0,880                  | 15,563               | -34,540                | -30,103              | -30,255                | 14,807                 |
| 7                             | 1,160               | 0,006                 | 0,005                  | 0,009                 | 1,100                  | 17,207               | -28,519                | -30,103              | -24,998                | 16,745                 |
| 10                            | 1,400               | 0,005                 | 0,007                  | 0,010                 | 1,300                  | 18,840               | -30,103                | -27,180              | -24,082                | 18,196                 |
| 20                            | 1,640               | 0,006                 | 0,005                  | 0,011                 | 1,580                  | 20,214               | -29,119                | -30,103              | -23,414                | 19,891                 |
| 50                            | 1,840               | 0,006                 | 0,010                  | 0,011                 | 1,780                  | 21,214               | -28,814                | -24,082              | -23,414                | 20,926                 |
| 70                            | 2,000               | 0,007                 | 0,010                  | 0,011                 | 1,920                  | 21,938               | -27,692                | -24,082              | -23,098                | 21,584                 |
| 100                           | 1,880               | 0,008                 | 0,013                  | 0,011                 | 1,840                  | 21,401               | -26,466                | -21,804              | -23,255                | 21,214                 |
| 200                           | 1,640               | 0,008                 | 0,015                  | 0,012                 | 1,700                  | 20,214               | -25,597                | -20,561              | -22,499                | 20,527                 |
| 500                           | 1,680               | 0,015                 | 0,013                  | 0,017                 | 1,660                  | 20,424               | -20,795                | -21,804              | -19,576                | 20,320                 |
| 700                           | 1,720               | 0,016                 | 0,013                  | 0,019                 | 1,640                  | 20,628               | -20,220                | -21,804              | -18,326                | 20,214                 |
| 1000                          | 1,720               | 0,022                 | 0,015                  | 0,027                 | 1,640                  | 20,628               | -17,077                | -20,795              | -15,520                | 20,214                 |
| 2000                          | 1,720               | 0,038                 | 0,020                  | 0,046                 | 1,640                  | 20,628               | -12,396                | -18,237              | -10,827                | 20,214                 |
| 5000                          | 1,680               | 0,093                 | 0,018                  | 0,096                 | 1,640                  | 20,424               | -4,731                 | -18,786              | -4,437                 | 20,214                 |
| 7000                          | 1,760               | 0,126                 | 0,023                  | 0,128                 | 1,640                  | 20,828               | -2,075                 | -16,698              | -1,938                 | 20,214                 |
| 10000                         | 1,680               | 0,180                 | 0,034                  | 0,180                 | 1,640                  | 20,424               | 1,023                  | -13,556              | 1,023                  | 20,214                 |
| 20000                         | 1,760               | 0,376                 | 0,094                  | 0,360                 | 1,620                  | 20,828               | 7,421                  | -4,657               | 7,044                  | 20,108                 |
| 50000                         | 2,320               | 1,180                 | 0,760                  | 1,240                 | 1,620                  | 23,227               | 17,355                 | 13,534               | 17,786                 | 20,108                 |
| 70000                         | 3,240               | 2,360                 | 1,920                  | 2,400                 | 1,560                  | 26,129               | 23,376                 | 21,584               | 23,522                 | 19,780                 |
| 80000                         | 3,760               | 3,080                 | 2,880                  | 3,160                 | 1,460                  | 27,421               | 25,689                 | 25,105               | 25,911                 | 19,205                 |
| 82000                         | 3,840               | 3,200                 | 3,040                  | 3,280                 | 1,460                  | 27,604               | 26,021                 | 25,575               | 26,235                 | 19,205                 |
| 85000                         | 3,920               | 3,360                 | 3,320                  | 3,440                 | 1,420                  | 27,783               | 26,444                 | 26,340               | 26,649                 | 18,963                 |
| 87000                         | 3,880               | 3,440                 | 3,480                  | 3,480                 | 1,420                  | 27,694               | 26,649                 | 26,749               | 26,749                 | 18,963                 |
| 90000                         | 3,800               | 3,440                 | 3,600                  | 3,400                 | 1,420                  | 27,513               | 26,649                 | 27,044               | 26,547                 | 18,963                 |
| 92000                         | 3,640               | 3,480                 | 3,640                  | 3,480                 | 1,420                  | 27,140               | 26,749                 | 27,140               | 26,749                 | 18,963                 |
| 95000                         | 3,440               | 3,360                 | 3,640                  | 3,440                 | 1,420                  | 26,649               | 26,444                 | 27,140               | 26,649                 | 18,963                 |
| 97000                         | 3,320               | 3,240                 | 3,680                  | 3,360                 | 1,440                  | 26,340               | 26,129                 | 27,235               | 26,444                 | 19,085                 |
| 100000                        | 3,120               | 3,160                 | 3,600                  | 3,160                 | 1,460                  | 25,801               | 25,911                 | 27,044               | 25,911                 | 19,205                 |
| 120000                        | 1,880               | 2,160                 | 2,960                  | 2,240                 | 1,580                  | 21,401               | 22,607                 | 25,343               | 22,923                 | 19,891                 |
| 150000                        | 1,040               | 1,440                 | 2,360                  | 1,440                 | 1,640                  | 16,258               | 19,085                 | 23,376               | 19,085                 | 20,214                 |
| 170000                        | 0,800               | 1,280                 | 2,160                  | 1,200                 | 1,640                  | 13,979               | 18,062                 | 22,607               | 17,501                 | 20,214                 |
| 200000                        | 0,560               | 1,040                 | 2,000                  | 0,968                 | 1,680                  | 10,881               | 16,258                 | 21,938               | 15,635                 | 20,424                 |
| 500000                        | 0,152               | 0,512                 | 2,080                  | 0,512                 | 2,100                  | -0,446               | 10,103                 | 22,279               | 10,103                 | 22,362                 |
| 700000                        | 0,088               | 0,416                 | 2,080                  | 0,416                 | 2,100                  | -5,193               | 8,299                  | 22,279               | 8,299                  | 22,362                 |
| 1000000                       | 0,056               | 0,312                 | 1,840                  | 0,320                 | 2,000                  | -9,119               | 5,801                  | 21,214               | 6,021                  | 21,938                 |

| f [Hz]   | U <sub>dP</sub> [V] | U <sub>pp+a</sub> [V] | U <sub>hP</sub> [V] | U <sub>pp-a</sub> [V] | U <sub>Pz-a</sub> [dB] | U <sub>dP</sub> [dB] | U <sub>pp+a</sub> [dB] | U <sub>hP</sub> [dB] | U <sub>pp-a</sub> [dB] | U <sub>Pz-a</sub> [dB] |
|----------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| 1        | 0,080               | 0,010                 | 0,011               | 0,010                 | 0,224                  | -6,021               | -24,082                | -23,098              | -24,082                | 2,923                  |
| 2        | 0,300               | 0,010                 | 0,011               | 0,010                 | 0,416                  | 5,460                | -24,082                | -23,098              | -24,082                | 8,299                  |
| 5        | 0,880               | 0,010                 | 0,010               | 0,012                 | 0,960                  | 14,807               | -24,082                | -24,082              | -22,499                | 15,563                 |
| 7        | 1,160               | 0,012                 | 0,014               | 0,014                 | 1,160                  | 17,207               | -22,499                | -21,160              | -21,160                | 17,207                 |
| 10       | 1,280               | 0,011                 | 0,015               | 0,017                 | 1,280                  | 18,062               | -23,098                | -20,561              | -19,473                | 18,062                 |
| 20       | 1,540               | 0,011                 | 0,015               | 0,017                 | 1,600                  | 19,668               | -23,255                | -20,561              | -19,473                | 20,000                 |
| 50       | 1,700               | 0,013                 | 0,016               | 0,017                 | 1,800                  | 20,527               | -21,804                | -20,000              | -19,473                | 21,023                 |
| 70       | 1,920               | 0,015                 | 0,014               | 0,017                 | 1,900                  | 21,584               | -20,677                | -21,160              | -19,473                | 21,493                 |
| 100      | 1,840               | 0,015                 | 0,014               | 0,014                 | 1,840                  | 21,214               | -20,677                | -21,160              | -21,412                | 21,214                 |
| 200      | 1,680               | 0,014                 | 0,015               | 0,018                 | 1,720                  | 20,424               | -20,915                | -20,561              | -18,881                | 20,628                 |
| 500      | 1,660               | 0,013                 | 0,020               | 0,012                 | 1,720                  | 20,320               | -21,804                | -18,062              | -22,793                | 20,628                 |
| 700      | 1,680               | 0,018                 | 0,018               | 0,020                 | 1,720                  | 20,424               | -18,977                | -18,977              | -18,062                | 20,628                 |
| 1000     | 1,660               | 0,016                 | 0,020               | 0,019                 | 1,700                  | 20,320               | -19,786                | -18,062              | -18,416                | 20,527                 |
| 2000     | 1,660               | 0,022                 | 0,020               | 0,025                 | 1,680                  | 20,320               | -17,234                | -18,062              | -16,193                | 20,424                 |
| 5000     | 1,640               | 0,028                 | 0,020               | 0,030                 | 1,720                  | 20,214               | -15,016                | -18,062              | -14,425                | 20,628                 |
| 7000     | 1,640               | 0,036                 | 0,020               | 0,036                 | 1,720                  | 20,214               | -12,860                | -18,237              | -12,956                | 20,628                 |
| 10000    | 1,640               | 0,047                 | 0,022               | 0,050                 | 1,680                  | 20,214               | -10,604                | -17,234              | -10,103                | 20,424                 |
| 20000    | 1,620               | 0,088                 | 0,022               | 0,084                 | 1,680                  | 20,108               | -5,193                 | -17,077              | -5,597                 | 20,424                 |
| 50000    | 1,640               | 0,188                 | 0,040               | 0,196                 | 1,680                  | 20,214               | 1,401                  | -11,955              | 1,763                  | 20,424                 |
| 70000    | 1,680               | 0,264                 | 0,068               | 0,268                 | 1,600                  | 20,424               | 4,350                  | -7,432               | 4,480                  | 20,000                 |
| 100000   | 1,760               | 0,400                 | 0,116               | 0,400                 | 1,680                  | 20,828               | 7,959                  | -2,793               | 7,959                  | 20,424                 |
| 200000   | 2,240               | 0,940                 | 0,496               | 0,980                 | 1,720                  | 22,923               | 15,380                 | 9,827                | 15,742                 | 20,628                 |
| 400000   | 7,520               | 6,000                 | 6,000               | 6,640                 | 1,610                  | 33,442               | 31,481                 | 31,481               | 32,361                 | 20,054                 |
| 420000   | 10,200              | 8,600                 | 9,210               | 8,520                 | 1,320                  | 36,090               | 34,608                 | 35,203               | 34,526                 | 18,329                 |
| 440000   | 12,900              | 13,200                | 14,000              | 13,600                | 0,990                  | 38,129               | 38,329                 | 38,840               | 38,588                 | 15,830                 |
| 450000   | 12,700              | 15,800                | 16,600              | 14,100                | 0,790                  | 37,994               | 39,891                 | 40,320               | 38,902                 | 13,870                 |
| 460000   | 11,000              | 14,400                | 16,000              | 12,600                | 1,120                  | 36,745               | 39,085                 | 40,000               | 37,925                 | 16,902                 |
| 470000   | 9,280               | 11,700                | 13,800              | 10,500                | 1,340                  | 35,269               | 37,281                 | 38,715               | 36,341                 | 18,460                 |
| 500000   | 5,520               | 6,760                 | 8,800               | 6,440                 | 1,710                  | 30,756               | 32,517                 | 34,807               | 32,095                 | 20,578                 |
| 700000   | 1,080               | 1,560                 | 2,920               | 1,580                 | 1,710                  | 16,586               | 19,780                 | 25,225               | 19,891                 | 20,578                 |
| 1000000  | 0,440               | 0,760                 | 1,960               | 0,720                 | 1,820                  | 8,787                | 13,534                 | 21,763               | 13,064                 | 21,119                 |
| 2000000  |                     |                       | 0,960               |                       |                        |                      |                        | 15,563               |                        |                        |
| 5000000  |                     |                       | 0,318               |                       |                        |                      |                        | 5,966                |                        |                        |
| 7000000  |                     |                       | 0,232               |                       |                        |                      |                        | 3,227                |                        |                        |
| 10000000 |                     |                       | 0,108               |                       |                        |                      |                        | -3,414               |                        |                        |

**Tab.5** Naměřené reálné vlastnosti obvodu s OZ:LM318 pro pásmo f=100000-1000000Hz

## **Příloha 2: Popis kompletního programu pro ATMEGU32 použitou v digitálním řízení**

```
/*
RIZENI FILTRU
-----
- tlacitka 1 az 6 odpovidaji 6 frekvencnim pasmum
- kazde pasmo je rozdeleno na 10 hodnot
- tlacitko +/- zvetsuje/zmensuje hodnotu frekvence v danem pasmu
*/
#include <avr/io.h>
#include <stdlib.h>          // itoa() , ltoa
#include <avr/sfr_defs.h>
#include "..\inc\mojelib1.h" //ze souboru "mojelib1.h"
#define LCD                // funkce pro LCD,
// ----- MAIN -----
int freq;
int fdown;
int fup;
int step;
char prevod[8];
int main(void) {
    DDRA=0xff;
    DDRC=0xff;
    DDRB=0xff;

    // nastaveni portu D pro funkci tlacitek
    clr(DDRD,0);
    setb(PORTD,0);
    clr(DDRD,7);
    setb(PORTD,7);
    clr(DDRD,6);
    setb(PORTD,6);
    clr(DDRD,5);
    setb(PORTD,5);
    clr(DDRD,4);
    setb(PORTD,4);
    clr(DDRD,3);
    setb(PORTD,3);
    clr(DDRD,2);
    setb(PORTD,2);
    clr(DDRD,1);
    setb(PORTD,1);
    init_lcd();          // inicializace displeje

    line_1();
    lcd_text("FREQUENCY FILTER");
    line_2();
    lcd_text("Type:LP,HP,BP,BS");
    line_3();
    lcd_text("Band:      ");
    line_4();
    lcd_text("Actual:    ");

for(;;) {
    if (bit_is_clear(PIND,1)) // tlačítko 1
        band1();
    if (bit_is_clear(PIND,2)) // tlačítko 2
        band2();
    if (bit_is_clear(PIND,3)) // tlačítko 3
        band3();
    if (bit_is_clear(PIND,4)) // tlačítko 4
        band4();
    if (bit_is_clear(PIND,5)) // tlačítko 5
        band5();
    if (bit_is_clear(PIND,6)) // tlačítko 6
        band6();
    if (bit_is_clear(PIND,0)) { // tlačítko +
        frequp();
    }
    if (bit_is_clear(PIND,7)) { // tlačítko -
        freqdown();
    }
}

//----- END MAIN -----
//----- CLOCK -----
void clock (void){
```

```

setb(PORTC,1);
waitms(2);
clrb(PORTC,1);
waitms(2);
}
//----- PAUSE -----
void pause (void){
clrb(PORTC,6);
waitms(10);
}
//----- RESET START -----
void reset_start (void){
setb(PORTC,0);
waitms(2);
}
//----- RESET STOP -----
void reset_stop (void){
clrb(PORTC,0);
waitms(5);
}
//----- SELECT BIT -----
void ssb (void){
setb(PORTC,6);
waitms(2);
}
//----- frequp -----
int frequp (void){
    if(freq<fup){
        freq=freq+step;
        if (freq>fup)
            {freq=(fup);}
        value();
        line_4();
        lcd_text("Actual: ");
        itoa(freq,prevod,10);
        lcd_text(prevod);
        waitms(200);
    }
}
//----- freqdown -----
int freqdown (void){
    if(freq>fdown){
        if (freq==fup)
            {freq=fup+1;}
        if (freq==10)
            {freq=9;}
        freq=freq-step;
        value();
        line_4();
        lcd_text("Actual: ");
        itoa(freq,prevod,10);
        lcd_text(prevod);
        waitms(200);
    }
}
//----- band1 -----
void band1(void) {
PORTC=0b00000000;
waitms(10);
PORTA=0B00000010;
data1();
line_3();
lcd_text("Band: 10-100Hz ");
line_4();
lcd_text("Actual: 10 Hz");
freq=10;
fdown=10;
fup=99;
step=10;
}
//----- band2 -----
void band2(void) {
PORTC=0b00000000;
waitms(10);
PORTA=0B00000100;
data1();
}

```

```

line_3();
lcd_text("Band: 100-1000Hz");
line_4();
lcd_text("Actual: 100 Hz");
freq=100;
fdown=100;
fup=999;
step=100;
}
//----- band3 -----
void band3(void) {
PORTC=0b00000000;
waitms(10);
PORTA=0B00001000;
data1();
line_3();
lcd_text("Band: 1-10kHz ");
line_4();
lcd_text("Actual: 1 kHz");
freq=1;
fdown=1;
fup=9;
step=1;
}
//----- band4 -----
void band4(void) {
PORTC=0b00000000;
waitms(10);
PORTA=0B00010000;
data1();
line_3();
lcd_text("Band: 10-100kHz ");
line_4();
lcd_text("Actual: 10 kHz");
freq=10;
fdown=10;
fup=99;
step=10;
}
//----- band5 -----
void band5(void) {
PORTC=0b00000000;
waitms(10);
PORTA=0B00100000;
data1();
line_3();
lcd_text("Band:100-1000kHz");
line_4();
lcd_text("Actual: 100 kHz");
freq=100;
fdown=100;
fup=999;
step=100;
}
//----- band6 -----
void band6(void) {
PORTC=0b00000000;
waitms(10);
PORTA=0B01000000;
data1();
line_3();
lcd_text("Band: 1-10MHz ");
line_4();
lcd_text("Actual: 1 MHz");
freq=1;
fdown=1;
fup=9;
step=1;
}
//----- value -----
void value (void){
if(freq==1 || freq==10 || freq==100){data1();}
if(freq==2 || freq==20 || freq==200){data2();}
if(freq==3 || freq==30 || freq==300){data3();}
if(freq==4 || freq==40 || freq==400){data4();}
if(freq==5 || freq==50 || freq==500){data5();}
}

```

```

        if(freq==6 || freq==60 || freq==600){data6();}
        if(freq==7 || freq==70 || freq==700){data7();}
        if(freq==8 || freq==80 || freq==800){data8();}
        if(freq==9 || freq==90 || freq==900){data9();}
        if(      freq==99 || freq==999){data10();}
    }
//----- value 1 -----
void value1 (void){
    clrb(PORTC,6);           // data na 0
    clock();                 // 16 bit
    clrb(PORTC,6);           // data na 0
    clock();                 // 15 bit
    clrb(PORTC,6);           // data na 0
    clock();                 // 14 bit
    clrb(PORTC,6);           // data na 0
    clock();                 // 13 bit
    clrb(PORTC,6);           // data na 0
    clock();                 // 12 bit
    clrb(PORTC,6);           // data na 0
    clock();                 // 11 bit
    clrb(PORTC,6);           // data na 0
    clock();                 // 10 bit
    clrb(PORTC,6);           // data na 0
    clock();                 // 9 bit
}
//----- value 2 -----
void value2 (void){
    clrb(PORTC,6);           // data na 0
    clock();                 // 16 bit
    clrb(PORTC,6);           // data na 0
    clock();                 // 15 bit
    clrb(PORTC,6);           // data na 0
    clock();                 // 14 bit
    clrb(PORTC,6);           // data na 0
    clock();                 // 13 bit
    clrb(PORTC,6);           // data na 0
    clock();                 // 12 bit
    setb(PORTC,6);           // data na 1
    clock();                 // 11 bit
    setb(PORTC,6);           // data na 1
    clock();                 // 10 bit
    clrb(PORTC,6);           // data na 0
    clock();                 // 9 bit
}
//----- value 3 -----
void value3 (void){
    clrb(PORTC,6);           // data na 0
    clock();                 // 16 bit
    setb(PORTC,6);           // data na 1
    clock();                 // 15 bit
    clrb(PORTC,6);           // data na 0
    clock();                 // 14 bit
    clrb(PORTC,6);           // data na 0
    clock();                 // 13 bit
    setb(PORTC,6);           // data na 1
    clock();                 // 12 bit
    setb(PORTC,6);           // data na 1
    clock();                 // 11 bit
    setb(PORTC,6);           // data na 1
    clock();                 // 10 bit
    clrb(PORTC,6);           // data na 0
    clock();                 // 9 bit
}
//----- value 4 -----
void value4 (void){
    clrb(PORTC,6);           // data na 0
    clock();                 // 16 bit
    clrb(PORTC,6);           // data na 0
    clock();                 // 15 bit
    clrb(PORTC,6);           // data na 0
    clock();                 // 14 bit
    setb(PORTC,6);           // data na 1
    clock();                 // 13 bit
    clrb(PORTC,6);           // data na 0
    clock();                 // 12 bit
    setb(PORTC,6);           // data na 1
}

```

```

clock(); // 11 bit
clrb(PORTC,6); // data na 0
clock(); // 10 bit
setb(PORTC,6); // data na 1
clock(); // 9 bit
}
//----- value 5 -----
void value5 (void){
clrb(PORTC,6); // data na 0
clock(); // 16 bit
clrb(PORTC,6); // data na 0
clock(); // 15 bit
clrb(PORTC,6); // data na 0
clock(); // 14 bit
setb(PORTC,6); // data na 1
clock(); // 13 bit
setb(PORTC,6); // data na 1
clock(); // 12 bit
setb(PORTC,6); // data na 1
clock(); // 11 bit
clrb(PORTC,6); // data na 0
clock(); // 10 bit
clrb(PORTC,6); // data na 0
clock(); // 9 bit
}
//----- value 6 -----
void value6 (void){
setb(PORTC,6); // data na 1
clock(); // 16 bit
setb(PORTC,6); // data na 1
clock(); // 15 bit
setb(PORTC,6); // data na 1
clock(); // 14 bit
clrb(PORTC,6); // data na 0
clock(); // 13 bit
clrb(PORTC,6); // data na 0
clock(); // 12 bit
clrb(PORTC,6); // data na 0
clock(); // 11 bit
setb(PORTC,6); // data na 1
clock(); // 10 bit
setb(PORTC,6); // data na 1
clock();
}
//----- value 7 -----
void value7 (void){
setb(PORTC,6); // data na 1
clock(); // 16 bit
clrb(PORTC,6); // data na 0
clock(); // 15 bit
setb(PORTC,6); // data na 1
clock(); // 14 bit
clrb(PORTC,6); // data na 0
clock(); // 13 bit
setb(PORTC,6); // data na 1
clock(); // 12 bit
clrb(PORTC,6); // data na 0
clock(); // 11 bit
setb(PORTC,6); // data na 1
clock(); // 10 bit
clrb(PORTC,6); // data na 0
clock(); // 9 bit
}
//----- value 8 -----
void value8 (void){
clrb(PORTC,6); // data na 0
clock(); // 16 bit
clrb(PORTC,6); // data na 0
clock(); // 15 bit
setb(PORTC,6); // data na 1
clock(); // 14 bit
setb(PORTC,6); // data na 1
clock(); // 13 bit
clrb(PORTC,6); // data na 0
clock(); // 12 bit
clrb(PORTC,6); // data na 0
}

```

```

clock(); // 11 bit
setb(PORTC,6); // data na 1
clock(); // 10 bit
clrb(PORTC,6); // data na 0
clock(); // 9 bit
}
//----- value 9 -----
void value9 (void){
clrb(PORTC,6); // data na 0
clock(); // 16 bit
clrb(PORTC,6); // data na 0
clock(); // 15 bit
setb(PORTC,6); // data na 1
clock(); // 14 bit
setb(PORTC,6); // data na 1
clock(); // 13 bit
setb(PORTC,6); // data na 1
clock(); // 12 bit
clrb(PORTC,6); // data na 0
clock(); // 11 bit
setb(PORTC,6); // data na 1
clock(); // 10 bit
clrb(PORTC,6); // data na 0
clock(); // 9 bit
}
//----- value 10 -----
void value10 (void){
setb(PORTC,6); // data na 1
clock(); // 16 bit
setb(PORTC,6); // data na 1
clock(); // 15 bit
setb(PORTC,6); // data na 1
clock(); // 14 bit
setb(PORTC,6); // data na 1
clock(); // 13 bit
setb(PORTC,6); // data na 1
clock(); // 12 bit
setb(PORTC,6); // data na 1
clock(); // 11 bit
setb(PORTC,6); // data na 1
clock(); // 10 bit
setb(PORTC,6); // data na 1
clock(); // 9 bit
}
//----- ENTRY OF DATA 1 -----
void data1 (void){
reset_start();
value1();
pause();
value1();
clock();
pause();
ssb();
clock();
reset_stop();
}
//----- ENTRY OF DATA 2 -----
void data2 (void){
reset_start();
value2();
pause();
value2();
clock();
pause();
ssb();
clock();
reset_stop();
}
//----- ENTRY OF DATA 3 -----
void data3 (void){
reset_start();
value3();
pause();
value3();
clock();
pause();
}

```

```

ssb();
clock();
reset_stop();
}
//----- ENTRY OF DATA 4 -----
void data4 (void){
reset_start();
value4();
pause();
value4();
clock();
pause();
ssb();
clock();
reset_stop();
}
//----- ENTRY OF DATA 5 -----
void data5 (void){
reset_start();
value5();
pause();
value5();
clock();
pause();
ssb();
clock();
reset_stop();
}
//----- ENTRY OF DATA 6 -----
void data6 (void){
reset_start();
value6();
pause();
value6();
clock();
pause();
ssb();
clock();
reset_stop();
}
//----- ENTRY OF DATA 7 -----
void data7 (void){
reset_start();
value7();
pause();
value7();
clock();
pause();
ssb();
clock();
reset_stop();
}
//----- ENTRY OF DATA 8 -----
void data8 (void){
reset_start();
value8();
pause();
value8();
clock();
pause();
ssb();
clock();
reset_stop();
}
//----- ENTRY OF DATA 9 -----
void data9 (void){
reset_start();
value9();
pause();
value9();
clock();
pause();
ssb();
clock();
reset_stop();
}

```

```
//----- ENTRY OF DATA 10 -----  
void data10 (void){  
  reset_start();  
  value10();  
  pause();  
  value10();  
  clock();  
  pause();  
  ssb();  
  clock();  
  reset_stop();  
}
```

### **Příloha 3: Výpis hodnot „Q“ a „B<sub>s</sub>“ z jednotlivých simulací**

Pro obr.3.37 a obr.3.38

|   |                                |            |            |            |            |            |
|---|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | Bandwidth_Bandpass_3dB(V(BP2)) | 1.98661k   | 3.13951k   | 4.96270k   |            |            |
|   |                                | 7.83447k   | 12.33883k  | 19.35744k  | 30.17708k  | 46.55766k  |
|   |                                | 103.73862k | 143.91197k | 176.48229k | 151.18643k | 69.23882k  |
|   |                                |            |            |            |            | 780.42864k |

|   |                      |         |         |         |          |          |
|---|----------------------|---------|---------|---------|----------|----------|
| 1 | Q_Bandpass(V(BP2),3) | 5.08186 | 5.09294 | 5.10403 |          |          |
|   |                      | 5.12262 | 5.15401 | 5.20617 | 5.29238  | 5.43629  |
|   |                      | 6.12623 | 6.99477 | 9.02637 | 16.63714 | 57.06049 |
|   |                      |         |         |         |          | 7.86076  |

|   |                               |            |            |            |            |            |
|---|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | Bandwidth_Bandpass_3dB(V(BP)) | 1.98661k   | 3.13951k   | 4.96270k   |            |            |
|   |                               | 7.83447k   | 12.33884k  | 19.35745k  | 30.17712k  | 46.55778k  |
|   |                               | 103.73980k | 143.91510k | 176.48734k | 151.19216k | 69.23733k  |
|   |                               |            |            |            |            | 780.91508k |

|   |                     |         |         |         |          |          |
|---|---------------------|---------|---------|---------|----------|----------|
| 1 | Q_Bandpass(V(BP),3) | 5.08186 | 5.09294 | 5.10403 |          |          |
|   |                     | 5.12262 | 5.15401 | 5.20616 | 5.29238  | 5.43629  |
|   |                     | 6.12620 | 6.99470 | 9.02627 | 16.63672 | 57.06186 |
|   |                     |         |         |         |          | 7.85844  |

|   |                               |            |            |            |            |            |
|---|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | Bandwidth_Bandpass_3dB(V(LP)) | 2.00685k   | 3.17142k   | 5.01220k   |            |            |
|   |                               | 7.91199k   | 12.45967k  | 19.54353k  | 30.45876k  | 46.96514k  |
|   |                               | 104.45255k | 144.69990k | 176.99507k | 151.18944k | 69.35745k  |
|   |                               |            |            |            |            | 784.42227k |

|   |                     |         |         |         |          |          |
|---|---------------------|---------|---------|---------|----------|----------|
| 1 | Q_Bandpass(V(LP),3) | 4.93155 | 4.94283 | 4.95497 |          |          |
|   |                     | 4.97413 | 5.00632 | 5.05988 | 5.14832  | 5.29654  |
|   |                     | 6.00228 | 6.88485 | 8.94461 | 16.60665 | 56.95413 |
|   |                     |         |         |         |          | 7.75674  |

|   |                                |            |            |            |            |            |
|---|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | Bandwidth_Bandpass_3dB(V(LP2)) | 2.00685k   | 3.17142k   | 5.01220k   |            |            |
|   |                                | 7.91199k   | 12.45967k  | 19.54354k  | 30.45877k  | 46.96520k  |
|   |                                | 104.45324k | 144.70196k | 176.99775k | 151.19141k | 69.35966k  |
|   |                                |            |            |            |            | 784.71304k |

|         |                      |         |          |          |         |  |
|---------|----------------------|---------|----------|----------|---------|--|
| 1       | Q_Bandpass(V(LP2),3) | 4.93155 | 4.94284  | 4.95497  |         |  |
| 4.97413 | 5.00632              | 5.05988 | 5.14831  | 5.29653  | 5.54972 |  |
| 6.00220 | 6.88467              | 8.94432 | 16.60623 | 56.95216 | 7.75130 |  |

Pro obr.3.40

|           |                               |            |            |           |          |  |
|-----------|-------------------------------|------------|------------|-----------|----------|--|
| 1         | Bandwidth_Bandpass_3dB(V(BP)) | 194.48045k | 140.41931k | 90.03583k |          |  |
| 55.89600k | 34.51615k                     | 21.37486k  | 13.29842k  | 8.31040k  | 5.20919k |  |

|         |                     |         |         |         |         |  |
|---------|---------------------|---------|---------|---------|---------|--|
| 1       | Q_Bandpass(V(BP),3) | 5.04349 | 4.45744 | 4.41833 |         |  |
| 4.51186 | 4.62426             | 4.72070 | 4.79340 | 4.84350 | 4.87779 |  |

|           |                                |            |            |           |          |  |
|-----------|--------------------------------|------------|------------|-----------|----------|--|
| 1         | Bandwidth_Bandpass_3dB(V(BP2)) | 194.47417k | 140.41947k | 90.03626k |          |  |
| 55.89618k | 34.51620k                      | 21.37487k  | 13.29843k  | 8.31040k  | 5.20919k |  |

|         |                      |         |         |         |         |  |
|---------|----------------------|---------|---------|---------|---------|--|
| 1       | Q_Bandpass(V(BP2),3) | 5.04357 | 4.45744 | 4.41832 |         |  |
| 4.51185 | 4.62425              | 4.72069 | 4.79340 | 4.84350 | 4.87779 |  |

|           |                               |            |            |           |          |  |
|-----------|-------------------------------|------------|------------|-----------|----------|--|
| 1         | Bandwidth_Bandpass_3dB(V(LP)) | 196.42091k | 142.27938k | 91.25968k |          |  |
| 56.62872k | 34.94055k                     | 21.62796k  | 13.45123k  | 8.40315k  | 5.26653k |  |

|         |                     |         |         |         |         |  |
|---------|---------------------|---------|---------|---------|---------|--|
| 1       | Q_Bandpass(V(LP),3) | 4.89401 | 4.28613 | 4.24495 |         |  |
| 4.34173 | 4.45907             | 4.55869 | 4.63381 | 4.68601 | 4.72139 |  |

|           |                                |            |            |           |          |  |
|-----------|--------------------------------|------------|------------|-----------|----------|--|
| 1         | Bandwidth_Bandpass_3dB(V(LP2)) | 196.42389k | 142.27930k | 91.25945k |          |  |
| 56.62862k | 34.94053k                      | 21.62795k  | 13.45123k  | 8.40315k  | 5.26653k |  |

|         |                      |         |         |         |         |  |
|---------|----------------------|---------|---------|---------|---------|--|
| 1       | Q_Bandpass(V(LP2),3) | 4.89386 | 4.28613 | 4.24497 |         |  |
| 4.34174 | 4.45908              | 4.55869 | 4.63381 | 4.68601 | 4.72139 |  |

Pro obr.3.42

|   |                                |           |           |           |           |
|---|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | Bandwidth_Bandpass_3dB(V(BP))  | 20.96817k | 20.62491k | 20.38247k |           |
|   |                                | 20.18907k | 20.00105k | 19.78065k | 19.48066k |
|   |                                |           |           | 19.03617k |           |
| 1 | Bandwidth_Bandpass_3dB(V(BP2)) | 20.96816k | 20.62490k | 20.38246k |           |
|   |                                | 20.18906k | 20.00104k | 19.78064k | 19.48065k |
|   |                                |           |           | 19.03617k |           |
| 1 | Bandwidth_Bandpass_3dB(V(LP2)) | 22.06786k | 21.23845k | 20.74004k |           |
|   |                                | 20.40179k | 20.12990k | 19.86053k | 19.52744k |
|   |                                |           |           | 19.07895k |           |
| 1 | Bandwidth_Bandpass_3dB(V(LP))  | 22.06787k | 21.23846k | 20.74005k |           |
|   |                                | 20.40179k | 20.12991k | 19.86054k | 19.52745k |
|   |                                |           |           | 19.07895k |           |

Pro obr.3.44

|   |                                |           |           |           |           |
|---|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | Bandwidth_Bandpass_3dB(V(BP2)) | 22.21428k | 22.78523k | 22.38893k |           |
|   |                                | 21.82488k | 21.34207k | 20.98109k | 20.73458k |
|   |                                |           |           | 20.56952k | 20.46173k |
|   |                                |           |           | 20.39268k |           |
| 1 | Bandwidth_Bandpass_3dB(V(LP))  | 22.23577k | 22.83626k | 22.46900k |           |
|   |                                | 21.93027k | 21.49963k | 21.22015k | 21.10605k |
|   |                                |           |           | 21.16627k | 21.45257k |
|   |                                |           |           | 22.13038k |           |
| 1 | Bandwidth_Bandpass_3dB(V(BP))  | 22.21427k | 22.78523k | 22.38894k |           |
|   |                                | 21.82489k | 21.34208k | 20.98110k | 20.73459k |
|   |                                |           |           | 20.56953k | 20.46175k |
|   |                                |           |           | 20.39269k |           |

Pro obr.3.46

|   |                                |           |           |            |            |
|---|--------------------------------|-----------|-----------|------------|------------|
| 1 | Bandwidth_Bandpass_3dB(V(BP))  | 22.91598k | 21.40406k | 20.69629k  |            |
|   |                                | 20.36719k | 20.21192k | 20.13605k  | 20.09719k  |
|   |                                |           |           | 20.07645k  |            |
| 1 | Q_Bandpass(V(BP),3)            | 6.94869   | 4.71782   | 3.10583    |            |
|   |                                | 2.02979   | 1.34795   | 937.83970m | 708.58524m |
|   |                                |           |           | 592.32192m |            |
| 1 | Bandwidth_Bandpass_3dB(V(BP2)) | 22.91597k | 21.40404k |            |            |
|   |                                | 20.69628k | 20.36717k | 20.21191k  | 20.13604k  |
|   |                                |           |           | 20.09718k  | 20.07644k  |
| 1 | Q_Bandpass(V(BP2),3)           | 6.94869   | 4.71782   | 3.10583    |            |
|   |                                | 2.02979   | 1.34795   | 937.83989m | 708.58535m |
|   |                                |           |           | 592.32199m |            |

1 Bandwidth\_Bandpass\_3dB(V(LP)) 23.04079k 21.65803k 21.30644k  
 22.10133k <Evaluation Failed> <Evaluation Failed> <Evaluation Failed> <Evaluation Failed>

1 Q\_Bandpass(V(LP),3) 6.83874 4.55566 2.85337 1.61552  
 <Evaluation Failed> <Evaluation Failed> <Evaluation Failed> <Evaluation Failed>

1 Bandwidth\_Bandpass\_3dB(V(LP2)) 23.04078k 21.65802k 21.30643k  
 22.10132k <Evaluation Failed> <Evaluation Failed> <Evaluation Failed> <Evaluation Failed>

1 Q\_Bandpass(V(LP2),3) 6.83874 4.55566 2.85337 1.61552  
 <Evaluation Failed> <Evaluation Failed> <Evaluation Failed> <Evaluation Failed>

Pro obr.3.48

1 Bandwidth\_Bandpass\_3dB(V(BP2)) 770.81439 1.25105k 2.45463k  
 5.47565k 13.06848k 32.16083k 80.24253k 201.82378k 512.39499k  
 1.32693meg

1 Q\_Bandpass(V(BP2),3) 130.31541 80.29356 40.92702  
 18.35392 7.70542 3.16604 1.35080 707.64780m 538.17798m  
 506.15607m

1 Bandwidth\_Bandpass\_3dB(V(BP)) 770.81441 1.25105k 2.45463k  
 5.47565k 13.06848k 32.16087k 80.24310k 201.83295k 512.54485k  
 1.32953meg

1 Q\_Bandpass(V(BP),3) 130.31541 80.29356 40.92702  
 18.35392 7.70542 3.16604 1.35080 707.63974m 538.16722m  
 506.14408m

1 Bandwidth\_Bandpass\_3dB(V(LP)) 771.09304 1.25150k 2.45575k  
 5.48385k 13.12555k 33.06743k <Evaluation Failed> <Evaluation Failed>  
 <Evaluation Failed> <Evaluation Failed> <Evaluation Failed>

|          |                     |           |                     |                     |  |
|----------|---------------------|-----------|---------------------|---------------------|--|
| 1        | Q_Bandpass(V(LP),3) | 130.26435 | 80.25843            | 40.89607            |  |
| 18.29916 | 7.60673             | 2.91891   | <Evaluation Failed> | <Evaluation Failed> |  |
|          |                     |           | <Evaluation Failed> | <Evaluation Failed> |  |

Pro obr.3.50

|          |                               |           |           |          |  |
|----------|-------------------------------|-----------|-----------|----------|--|
| 1        | Bandwidth_Bandpass_3dB(V(BP)) | 9.58550k  | 4.97915k  | 3.92396k |  |
| 5.98334k | 13.11266k                     | 31.85464k | 79.37862k |          |  |

|          |                     |         |          |          |  |
|----------|---------------------|---------|----------|----------|--|
| 1        | Q_Bandpass(V(BP),3) | 9.53215 | 19.33083 | 25.09865 |  |
| 16.62308 | 7.62854             | 3.17904 | 1.35728  |          |  |

|          |                                |           |           |           |  |
|----------|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|--|
| 1        | Bandwidth_Bandpass_3dB(V(BP2)) | 9.58550k  | 4.97915k  |           |  |
| 3.92396k | 5.98334k                       | 13.11265k | 31.85460k | 79.37807k |  |

|          |                      |         |          |          |  |
|----------|----------------------|---------|----------|----------|--|
| 1        | Q_Bandpass(V(BP2),3) | 9.53214 | 19.33083 | 25.09865 |  |
| 16.62308 | 7.62855              | 3.17904 | 1.35728  |          |  |

|          |                               |           |                     |          |  |
|----------|-------------------------------|-----------|---------------------|----------|--|
| 1        | Bandwidth_Bandpass_3dB(V(LP)) | 9.61141k  | 4.97981k            | 3.92181k |  |
| 5.98157k | 13.17112k                     | 32.74595k | <Evaluation Failed> |          |  |

|          |                     |         |                     |          |  |
|----------|---------------------|---------|---------------------|----------|--|
| 1        | Q_Bandpass(V(LP),3) | 9.45460 | 19.30240            | 25.09245 |  |
| 16.59781 | 7.52884             | 2.93285 | <Evaluation Failed> |          |  |

|          |                                |           |                     |          |  |
|----------|--------------------------------|-----------|---------------------|----------|--|
| 1        | Bandwidth_Bandpass_3dB(V(LP2)) | 9.61141k  | 4.97981k            | 3.92181k |  |
| 5.98157k | 13.17112k                      | 32.74592k | <Evaluation Failed> |          |  |

|          |                      |         |                     |          |  |
|----------|----------------------|---------|---------------------|----------|--|
| 1        | Q_Bandpass(V(LP2),3) | 9.45459 | 19.30240            | 25.09245 |  |
| 16.59781 | 7.52884              | 2.93285 | <Evaluation Failed> |          |  |

Pro obr.3.5 R=234.1

|          |                                  |           |            |  |  |
|----------|----------------------------------|-----------|------------|--|--|
| 1        | Bandwidth_Bandpass_3dB(V(Udp-a)) | 10.60577  | 105.98603  |  |  |
| 1.05273k | 9.83388k                         | 37.32631k | 1.60854meg |  |  |

|          |                        |         |         |         |  |
|----------|------------------------|---------|---------|---------|--|
| 1        | Q_Bandpass(V(Udp-a),3) | 9.35721 | 9.36329 | 9.42413 |  |
| 10.06083 | 25.71314               | 4.35920 |         |         |  |

|          |                                  |           |            |  |  |
|----------|----------------------------------|-----------|------------|--|--|
| 1        | Bandwidth_Bandpass_3dB(V(Uhp-a)) | 10.72636  | 107.19233  |  |  |
| 1.06487k | 9.93099k                         | 37.43762k | 1.67409meg |  |  |

|          |                        |         |         |         |  |
|----------|------------------------|---------|---------|---------|--|
| 1        | Q_Bandpass(V(Uhp-a),3) | 9.35793 | 9.36377 | 9.42186 |  |
| 10.06118 | 25.67584               | 4.41228 |         |         |  |

|          |                                  |           |            |
|----------|----------------------------------|-----------|------------|
| 1        | Bandwidth_Bandpass_3dB(V(Upp+a)) | 10.57799  | 105.71286  |
| 1.05001k | 9.80935k                         | 37.36890k | 1.57477meg |

|          |                        |         |         |         |
|----------|------------------------|---------|---------|---------|
| 1        | Q_Bandpass(V(Upp+a),3) | 9.43512 | 9.44078 | 9.50148 |
| 10.13563 | 25.70330               | 4.56551 |         |         |

Pro obr.3.5 R=2340.5

|           |                                  |          |           |
|-----------|----------------------------------|----------|-----------|
| 1         | Bandwidth_Bandpass_3dB(V(Udp-a)) | 1.05761  | 10.57548  |
| 105.68868 | 1.05015k                         | 9.82526k | 38.86330k |

|         |                        |          |         |         |
|---------|------------------------|----------|---------|---------|
| 1       | Q_Bandpass(V(Udp-a),3) | 9.38976  | 9.39032 | 9.39594 |
| 9.45364 | 10.07664               | 24.72193 |         |         |

|           |                                  |          |           |
|-----------|----------------------------------|----------|-----------|
| 1         | Bandwidth_Bandpass_3dB(V(Upp+a)) | 1.05438  | 10.54311  |
| 105.36455 | 1.04704k                         | 9.80165k | 38.80954k |

|         |                        |          |         |         |
|---------|------------------------|----------|---------|---------|
| 1       | Q_Bandpass(V(Upp+a),3) | 9.47173  | 9.47229 | 9.47796 |
| 9.53451 | 10.15047               | 24.77645 |         |         |