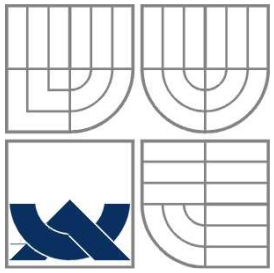
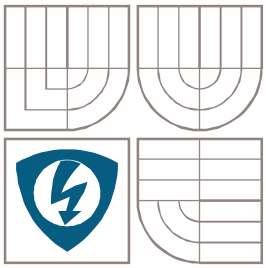


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

NÁVRH, SIMULACE A MĚŘENÍ AKTIVNÍCH FILTRŮ S MODERNÍMI FUNKČNÍMI BLOKY.

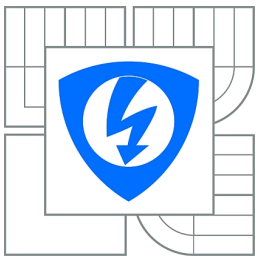
DESIGN, SIMULATION AND MEASUREMENT OF ACTIVE FILTERS WITH MODERN FUNCTIONAL BLOCKS.

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Vojtěch Melša
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.
SUPERVISOR

BRNO, 2010



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Vojtěch Melša ***ID:*** 106632
Ročník: 3 ***Akademický rok:*** 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Návrh, simulace a měření aktivních filtrů s moderními funkčními bloky

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s metodami návrhu, simulace a měření aktivních filtrů s moderními funkčními bloky. Navrhněte univerzální přeladitelný filtr typu DP, HP, PP a PZ zadaných parametrů. Proveďte simulaci jeho vlastností pomocí programu PSPICE.

Navržené zapojení univerzálního aktivního filtru realizujte ve formě laboratorníhio přípravku. Proveďte měření jeho kmitočtových charakteristik a výsledky srovnejte s výsledky simulací v programu PSPICE.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] HÁJEK, K., SEDLÁČEK, J. Kmitočtové filtry. Praha: BEN - technická literatura, 2002.

2] GHAUSI, M. S., LAKER, K. R. Modern Filter Design. Active RC and Switched Capacitor, Atlanta: Noble Publishing, 2003.

Termín zadání: 8.2.2010 ***Termín odevzdání:*** 28.5.2010

Vedoucí práce: prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA
POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení:	Vojtěch Melša
Bytem:	Lubná 338, Lubná, 569 63
Narozen/a (datum a místo):	15. Září 1987 v Poličce

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

   ☐ disertační práce
   ☐ diplomová práce
   ☒ bakalářská práce
   ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....
   (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP:	Návrh, simulace a měření aktivních filtrů s moderními funkčními bloky
Vedoucí/ školitel VŠKP:	prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.
Ústav:	Ústav radioelektroniky
Datum obhajoby VŠKP:	_____

   VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

   ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
   ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizovaní výpisů, opisů a rozmnoženin.

2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.

3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti

   - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
   - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
   - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
   - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
   - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy (z důvodu utajení v něm obsažených informací)

4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.

2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.

3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísni a za nápadně nevýhodných podmínek.

4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 28. května 2010

……..	……
Nabyvatel	Autor

ABSTRAKT

Tato práce je zaměřena na možnosti zapojení elektronických filtrů s moderními funkčními bloky. Následně jsou vybrány nejvhodnější zapojení a jejich vlastnosti jsou odsimulovány v programu Pspice. Ze vzájemného porovnání výsledků simulace, možností přelaďovaní, počtu funkcí, složitosti zapojení a v první řadě podle komerčně dostupných použitých integrovaných obvodů je vybráno zapojení k realizaci ve formě laboratorního přípravku. Jeho změřené charakteristiky jsou pak porovnány s výsledky simulace.

KLÍČOVÁ SLOVA

Filtry, proudové konvejory, transkonduktory

ABSTRACT

This work concentrates on the possibilities of how to connect electric filters with functional blocks. Then we choose the best possible connections and their characteristics are simulated in the Pspice program. From the comparison of the results of simulation, possibilities of tuning, quantity of functions, complicacy of connections and mainly by commercially available integrated circuits is chosen the connection which is realized in a laboratory preparation form. Its measured characteristics are compared with results of simulation

KEYWORDS

Filters, current conveyors, transconductors

MELŠA, V. Návrh, simulace a měření aktivních filtrů s moderními funkčními bloky. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2010. 38 s., 0 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: prof. ing. Lubomír Brančík, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh, simulace a měření aktivních filtrů s moderními funkčními bloky jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 28. května 2010 .....
podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Prof. Ing. Lubomíru Brančíkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 28. května 2010 .....
podpis autora

OBSAH

OBSAH ix
SEZNAM OBRÁZKŮ xi
SEZNAM TABULEK xii
ÚVOD 1
1. ZÁKLADNÍ FILTRAČNÍ OBVODY 2
1.1. Účel a použití filtrů 2
1.2. Typy filtrů 2
2. FILTRY S MODERNÍMI FUNKČNÍMI BLOKY 4
2.1. Proudové konvejory 4
2.1.1. Základní popis proudového konvejoru 4
2.1.2. Jednoduchý makromodel CCII 5
2.2. Proudový konvejor AD844 5
2.2.1. Základní popis AD844 5
2.2.2. Technické parametry obvodu AD844 6
2.2. Proudový konvejor EL2082 6
2.2.1. Základní popis EL2082 6
3. UNIVERZÁLNÍ PŘELADITELNÝ FILTR S AD844 8
3.1. Blokové schéma zapojení (AD844) 8
3.2. Přenosové funkce (AD844) 9
3.3. Schéma zapojení v programu Pspice (AD844) 10
3.4. Simulace v programu Pspice (AD844) 11
3.5. Odečtené hodnoty ze simulace (AD844) 14
3.6 Schéma zapojení v programu Pspice (AD844) s řídícím obvodem EL2082 15
3.7 Simulace v programu Pspice (AD844) s řídícím obvodem EL2082 16
3.8 Odečtené hodnoty ze simulace (AD844) s EL2082 19
4. PŘÍKLAD ZAPOJENÍ UNIVERZÁLNÍHO FILTRU S JINÝMI MODERNÍMI FUNKČNÍMI BLOKY 20
4.1. Blokové schéma zapojení s transkonduktory 20
4.2. Přenosové funkce v zapojení s transkonduktory 21
4.3. Schéma zapojení v programu Pspise s obvodem LT1228 22
4.4. Simulace v Pspice a obvodem LT1228 23
5. KONSTRUKCE FILTRU V ZAPOJENÍ S AD844 26
5.1. Schéma zapojení v programu Eagle 26
5.2. Plošný spoj 27
5.3. Seznam součástek 28

5.4. Rozměry desky laboratorního přípravku 29
6. ZMĚŘENÉ CHARAKTERISTIKY A HODNOTY FILTRU S AD844 30
7. NÁHLED NA HOTOVÝ PŘÍPRAVEK 34
ZÁVĚR 36
LITERATURA 37
SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK 38

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Modulové charakteristiky různých filtrů [1] 3
Obr. 2: Proudový konvejor CCII a) schematická značka, b) matice U a I 4
Obr. 3: Makromodel CCII [2] 5
Obr. 4: Proudový konvejor AD844 [6] 5
Obr. 5: Proudový konvejor EL2082 [7] 6
Obr. 6: Zapojení filtru (AD844) [3] 8
Obr. 7: Schéma zapojení filtru (AD844) v programu Pspice 10
Obr. 8: Schéma zapojení filtru (AD844) v programu Pspice - Fázovací článek 10
Obr. 9: Modulové frekvenční charakteristiky filtru (AD844) 11
Obr. 10: Modulová a fázová kmitočtová charakteristika fázovacího článku (AD844) 11
Obr. 11: Přeladění filtru (AD844) - dolní propust 12
Obr. 12: Přeladění filtru (AD844) - horní propust 12
Obr. 13: Přeladění filtru (AD844) - pásmová propust 13
Obr. 14: Přeladění filtru (AD844) - pásmová zádrž 13
Obr. 15: Přeladění filtru (AD844) - fázovací článek 14
Obr. 16: Schéma zapojení filtru (AD844) v programu Pspice s EL2082 15
Obr. 17: Schéma zapojení filtru (AD844) v programu Pspice s EL2082 - Fázovací článek 15
Obr. 18: Přeladění filtru (AD844) s EL2082 – dolní propust 16
Obr. 19: Přeladění filtru (AD844) s EL2082 – horní propust 16
Obr. 20: Přeladění filtru (AD844) s EL2082 – pásmová propust 17
Obr. 21: Přeladění filtru (AD844) s EL2082 – pásmová zádrž 17
Obr. 22: Přeladění filtru (AD844) s EL2082 – fázovací článek (modul) 18
Obr. 23: Přeladění filtru (AD844) s EL2082 – fázovací článek (fáze) 18
Obr. 24: Zapojení univerzálního filtru s obvodem LT1228 [4] 20
Obr. 25: Konfigurace filtru s obvodem LT1228 pro pásmovou zádrž [4] 20
Obr. 26: Schéma zapojení filtru s obvodem LT 1228 v programu Pspice (dolní propust) 22
Obr. 27: Dolní propust filtru (LT 1228) 23
Obr. 28: Horní propust filtru (LT 1228) 23
Obr. 29: Pásmová propust filtru (LT 1228) 24
Obr. 30: Pásmová zádrž filtru (LT 1228) 24
Obr. 31: Přeladění filtru (LT 1228) - dolní propust 25
Obr. 32: Schéma zapojení filtru (AD844) s EL2082 v programu Eagle 26
Obr. 33: Strana z pohledu součástek - TOP 27
Obr. 34: Strana z pohledu spojů - BUTTOM 27
Obr. 35: Osazení součástek 27
Obr. 36: Nákres přípravku 29
Obr. 37: Změřené hodnoty (AD844) - dolní propust 30
Obr. 38: Změřené hodnoty (AD844) - horní propust 30
Obr. 39: Změřené hodnoty (AD844) - pásmová propust 31
Obr. 40: Změřené hodnoty (AD844) - pásmová zádrž 31
Obr. 41: Zěřené hodnoty (AD844) - fázovací článek (modul) 32
Obr. 42: Změřené hodnoty (AD844) - fázovací článek (fáze) 32
Obr. 43: Vrchní strana 34
Obr. 44: Spodní strana 34
Obr. 45: Boční pohled 35
Obr. 46: Čelní pohled 35
Obr. 47: Plošný spoj 35

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Technické parametry obvodu AD844 [5] 6
Tabulka 2: Hodnoty součástek (AD844) [3] 8
Tabulka 3: Mezní frekvence jednotlivých filtrů (AD844) 14
Tabulka 4: Mezní frekvence jednotlivých filtrů (AD844) s EL2082 19
Tabulka 5: Hodnoty součástek (LT 1228) [4] 22
Tabulka 6: Seznam součástek 28
Tabulka 7: Mezní frekvence jednotlivých filtrů (AD844) – naměřené hodnoty 33

ÚVOD

Hlavní náplní této práce je zaměření se na elektronické filtry s moderními funkčními bloky. Nejprve budeme seznámeni se základními filtračními obvody. Budou nám ukázány všechny typy filtrů, příklady jejich použití a základní principy jejich funkce.

Dalším tématem budou moderní funkční bloky, které se používají pro konstrukci filtrů. Práce bude zaměřena především na proudové konvejory, které pracují v proudovém módu a dokážou zpracovávat mnohem širší frekvenční pásmo než běžné operační zesilovače. V programu Pspice budou provedeny simulace zapojení filtru s těmito moderními prvky a bude popsán konkrétní použitý proudový konvejor.

Také bude provedena simulace i jiných zapojení s jinými funkčními bloky a výsledky budou porovnány se zapojením s proudovými konvejory. Nakonec budou porovnány výhody i nevýhody každého zapojení a bude vybráno vhodné zapojení pro konstrukci.

Filtr bude zkonstruován ve formě laboratorního přípravku a jeho změřené charakteristiky porovnány s výsledky simulace.

1. ZÁKLADNÍ FILTRAČNÍ OBVODY

1.1. Účel a použití filtrů

Kmitočtové filtry jsou převážně lineární dvojbrany, které propustí jen některé harmonické složky spektra signálu v určitém pásmu kmitočtů. Toto pásmo se nazývá propustné pásmo. Ostatní harmonické složky mimo toto propustné pásmo jsou silně utlumeny – tzv. nepropustné pásmo.

Kmitočtové filtry se používají v řadě různých obvodů a systémů. Pro usměrňovače, kde je zapotřebí oddělit stejnosměrnou složku a potlačit všechny střídavé složky, se používá filtr typu dolní propust. V přijímačích se pro výběr určitého signálu vysílače používá pásmová propust a naopak pro odstranění nežádoucího kmitočtu (např. síťového kmitočtu 50Hz) se používá pásmová zádrž. V poslední době se v souvislosti s novými mikroelektronickými technologiemi rozvíjejí aktivní filtry RC s novými aktivními prvky a funkčními bloky. Dále je snaha odstranit resp. nahradit induktory syntetickými prvky. Jsou totiž příliš objemné, drahé a velmi těžko integrovatelné součástky. [1]

1.2. Typy filtrů

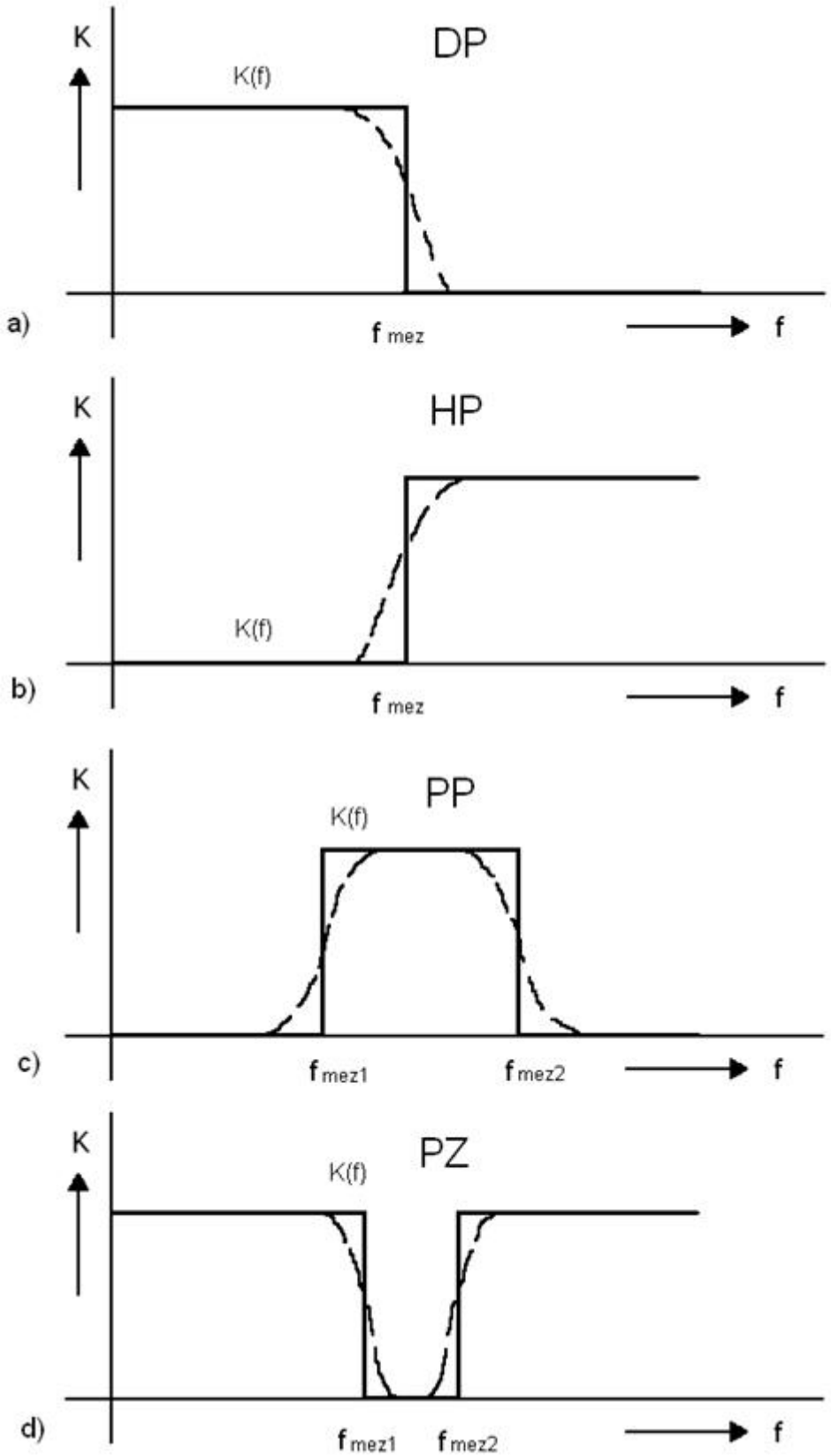
Filtry lze rozdělit podle následujících způsobů:

Podle přenášeného kmitočtového spektra (obr. 1):

- dolní propust,
- horní propust,
- pásmová propust,
- pásmová zádrž,
- všepropustný (fázovací) dvojbran,

Podle použitých prvků:

- pasivní filtry RC (resp. RLC),
- pasivní filtry LC,
- aktivní filtry RC,
  - se standardními operačními zesilovači,
  - se zvláštními typy operačních zesilovačů,
  - s ideálními zesilovači napětí,
- filtry RC s funkčními bloky,
  - s impedančními invertory a gyrátory,
  - s impedančními konvertory,
  - s proudovými konvejery,
  - aktivní filtr R,
- filtry se syntetickými prvky,
- filtry s spínanými kapacitory,
- filtry s povrchovou vlnou,
- filtry s piezoelektrickými rezonátory,
- a další. [1]



Obr. 1: Modulové charakteristiky různých filtrů [1]

a) dolní propust, b) horní propust, c) pásmová propust, d) pásmová zádrž

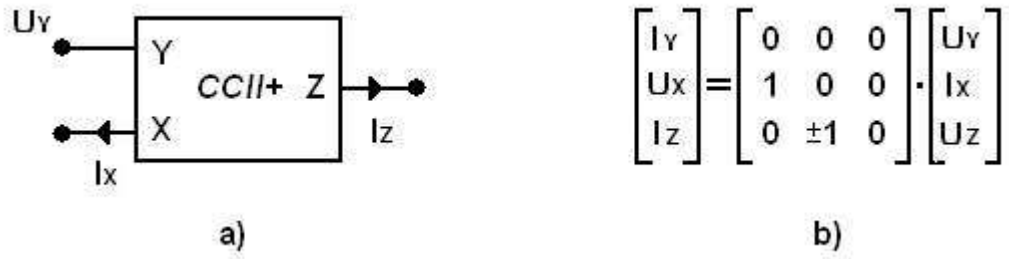
2. FILTRY S MODERNÍMI FUNKČNÍMI BLOKY

2.1. Proudové konvejory

Proudový konvejor (CC) je universální analogové zařízení určené pro používání v různých obvodových zapojení, které realizují mnoho analogových signálových funkcí. Jedná se o analogový obvod, který se v mnoha směrech podobá klasickému napěťovému zesilovači, ale představující alternativní metody implementování analogových systémů, které jsou obvykle budovány s napěťovými zesilovači. Jejich aplikační spektrum pokrývá všechny možné aplikace s napěťovými zesilovači a ještě mnohem víc. CC je tedy zařízení, které se v dnešní době začíná stále víc a víc uplatňovat díky svým dosahovaným vlastnostem, které jsou oproti klasickému napěťovému OZ značně lepší. [2]

2.1.1. Základní popis proudového konvejoru

Na obr.3 je základní schematická značka proudového konvejoru druhé generace (dále jen CCII) spolu s maticí napětí a proudů popisující jeho chování.



Obr. 2: Proudový konvejor CCII a) schematická značka, b) matice U a I

Po roznásobení matice získáme tyto základní vztahy mezi branovými veličinami:

$$U_X = U_Y,\ \ I_Y = 0,\ \ I_Z = I_X \tag{2.1}$$

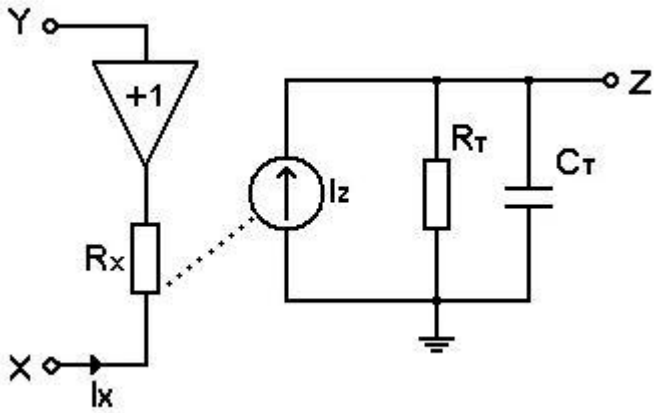
Proudové konvejery lze ještě rozdělit na CCII+ a CCII-, pro které platí:

1) CCII+: $I_x = I_z$
2) CCII-: $I_x = -I_z$

Další vlastností CCII je vysoká impedance na vstupu Y a Z a malá impedance na vstupu X. Napětí na nízkoimpedančním vstupu X je „sledováno“ z vysokoimpedančního vstupu Y, zatímco proud z nízkoimpedančního vstupu X je „konvejován“ (zrcadlen) na vysokoimpedanční výstup Z. [2]

2.1.2. Jednoduchý makromodel CCII

Jednoduchý makromodel obsahuje pouze ideální napěťový sledovač mezi svorkami Y a X, vnitřní odpor R_x, ideální zdroj proudu I_z řízeného proudem I_x a výstupní impedanci Z_T složenou z odporu R_T a kapacity C_T, která určuje transientní kmitočet přenosové funkce. [2]



Obr. 3: Makromodel CCII [2]

Pro tento makromodel platí:

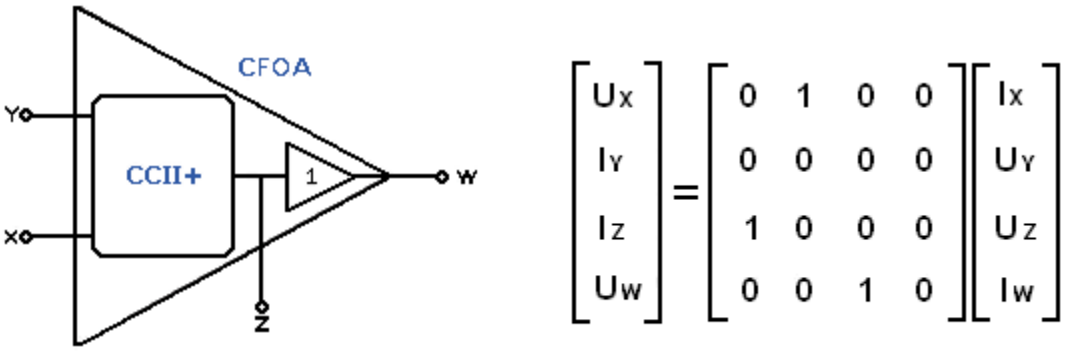
$$U_Y - U_X = I_X \cdot R_X \tag{2.2}$$

$$U_Z = I_X \cdot Z_T \qquad (\text{kde } Z_T = R_T||C_T\ ) \tag{2.3}$$

2.2. Proudový konvejor AD844

2.2.1. Základní popis AD844

Proudový konvejor AD844 má oproti klasickému proudovému konvejoru na výstupu ještě napěťový sledovač.



Obr. 4: Proudový konvejor AD844 [6]

Vztahy mezi branovými veličinami pak vypadají takto:

$$U_X = U_Y,\ \ I_Y = 0,\ \ I_Z = I_X,\ \ U_W = U_Z \tag{2.4}$$

2.2.2. Technické parametry obvodu AD844

Integrovaný obvod AD844 je k dispozici ve třech pouzdrech. V 16-pin SOIC (R) pouzdru se jedná o AD844J, které je určeno pro komerční rozmezí teplot a dále pak AD844A a AD844B v 8-pin cerdip (Q) pouzdru, které jsou určeny pro průmyslový rozsah teplot. [5]

Tabulka 1: Technické parametry obvodu AD844 [5]

	Podmínky	AD844J	AD844A	AD844B
Rozmezí teplot		0˚C až +70˚C	-40˚C až +85˚C	-40˚C až +85˚C
Pracovní rozsah		±4.5V až ±18V	±4.5V až ±18V	±4.5V až ±18V
Celkové harmonické zkreslení	f= 100kHz 2 Vrms	0.005%	0.005%	0.005%
Klidový proud		6.5mA až 7.5mA	6.5mA až 7.5mA	6.5mA až 7.5mA

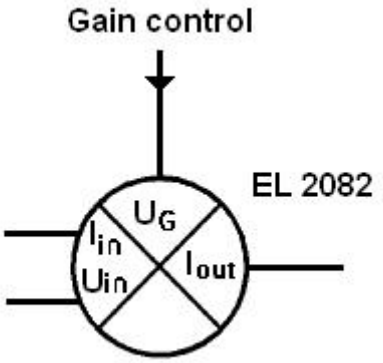
Absolutní maximální hodnoty [5]:

Napájecí napětí U_S ……..	±18V
Výkonový rozptyl……	1.1W
Diferenční vstupní napětí……	6V
Invertující vstupní proud	
nepřetržitý…….....	5mA
přechodný…….....	10mA
Rozsah skladovacích teplot (Q)…….....	-65˚C až +150˚C
(N,R)……..	-65˚C až +125˚C
Rozsah teploty přívodů…….....	+300˚C
ESD rozsah……	1000V

2.2. Proudový konvejor EL2082

2.2.1. Základní popis EL2082

Jedná se o negativní proudový konvejor CCII-, jehož proudový přenos B má záporné znaménko. Platí tedy vztah $I_x = -I_z$. Proudový přenos lze v jistém rozsahu měnit externím řídícím napětím Ug = (0V, 2V).



Obr. 5: Proudový konvejor EL2082 [7]

Je-li napěťový vstup připojen na zem, jeví se daný obvod mezi vstupním pinem I_{in} a výstupním pinem I_{out} jako reálný odpor, který lze měnit napětím Ug.

Absolutní maximální hodnoty [7]:

Napájecí napětí mezi U_S + a U_S - ……	+33V
Vstupní napětí U_{in} ……	$\pm U_S$
Řídící napětí U_G ……...	-1V až 7V
Vstupní proud I_{in} ……..	± 5mA
Provozní teplota ……...	0˚ až 75˚
Frekvenční rozsah ……	150MHz

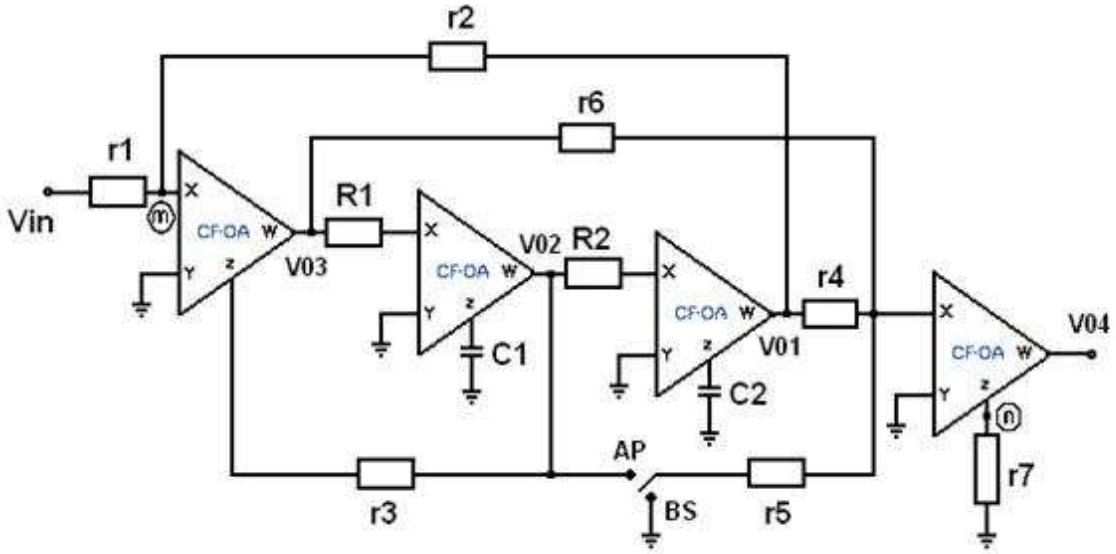
3. UNIVERZÁLNÍ PŘELADITELNÝ FILTR S AD844

3.1. Blokové schéma zapojení (AD844)

Zapojení na obr.6 využívá čtyř CFOA (Current-feedback operational amplifer) typu AD844, z nichž dva jsou zapojeny jako invertující integrátory a dva jako speciálně navržené sumátory.

Toto zapojení umožňuje odebírat všechny čtyři typy filtrů naráz (přepínač v poloze BS). Jedná se o typ filtru dolní propust (DP) v uzlu označeném V01, horní propust (HP) v uzlu VO3, pásmová propust (PP) v uzlu VO2 a pásmová zádrž (PZ) v uzlu V04. Pokud bude přepínač v poloze AP, získáme na výstupu V04 fázovací článek.

Přelaďovat lze tento filtr změnou velikosti odporu rezistorů R1 a R2. Při změně odporů musí být zachován vzájemný poměr jejich hodnot. [3]



Obr. 6: Zapojení filtru (AD844) [3]

Hodnoty součástek :

Tabulka 2: Hodnoty součástek (AD844) [3]

Název	r1 až r7	R1	R2	C1	C2
Hodnota	1kΩ	1 kΩ	2 kΩ	1nF	1nF

3.2. Přenosové funkce (AD844)

Přenosová funkce – dolní propust:

$$K_{dp}(s) = \frac{V_{01}}{V_{in}} = \frac{H_0\omega_0^2}{D(s)} = \frac{-\left(\frac{r_2}{r_1}\right)\frac{r_3}{r_2R_1C_1R_2C_2}}{s^2 + \frac{1}{R_1C_1}s + \frac{r_3}{r_2R_1C_1R_2C_2}} \text{ [3]} \quad (3.1)$$

Přenosová funkce – horní propust:

$$K_{hp}(s) = \frac{V_{02}}{V_{in}} = \frac{H_0\left(\frac{\omega_0}{Q_0}\right)s}{D(s)} = \frac{\left(\frac{r_3}{r_1}\right)\frac{1}{R_1C_1}s}{s^2 + \frac{1}{R_1C_1}s + \frac{r_3}{r_2R_1C_1R_2C_2}} \text{ [3]} \quad (3.2)$$

Přenosová funkce – pásmová propust:

$$K_{pp}(s) = \frac{V_{03}}{V_{in}} = \frac{H_0s^2}{D(s)} = \frac{-\left(\frac{r_3}{r_1}\right)s^2}{s^2 + \frac{1}{R_1C_1}s + \frac{r_3}{r_2R_1C_1R_2C_2}} \text{ [3]} \quad (3.3)$$

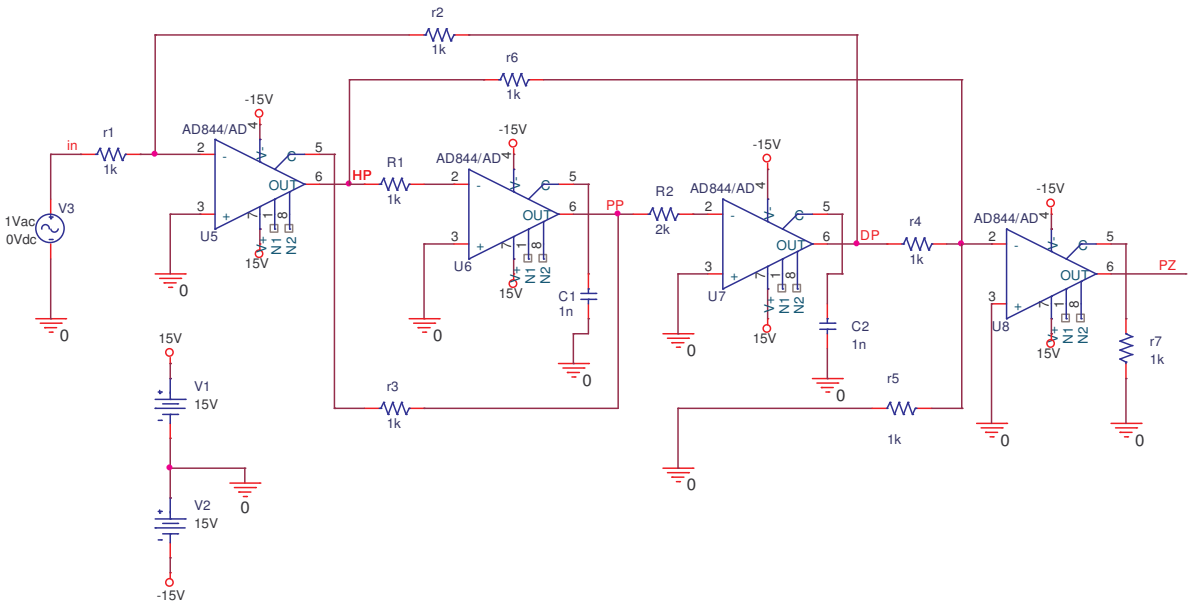
Přenosová funkce – pásmová zádrž:

$$K_{pz}(s) = \frac{V_{04}}{V_{in}} = \frac{H_0(s^2 + \omega_0^2)}{D(s)} = \frac{\left(\frac{r_3}{r_1}\right)\left(s^2 + \frac{r_3}{r_2R_1C_1R_2C_2}\right)}{s^2 + \frac{1}{R_1C_1}s + \frac{r_3}{r_2R_1C_1R_2C_2}} \text{ [3]} \quad (3.4)$$

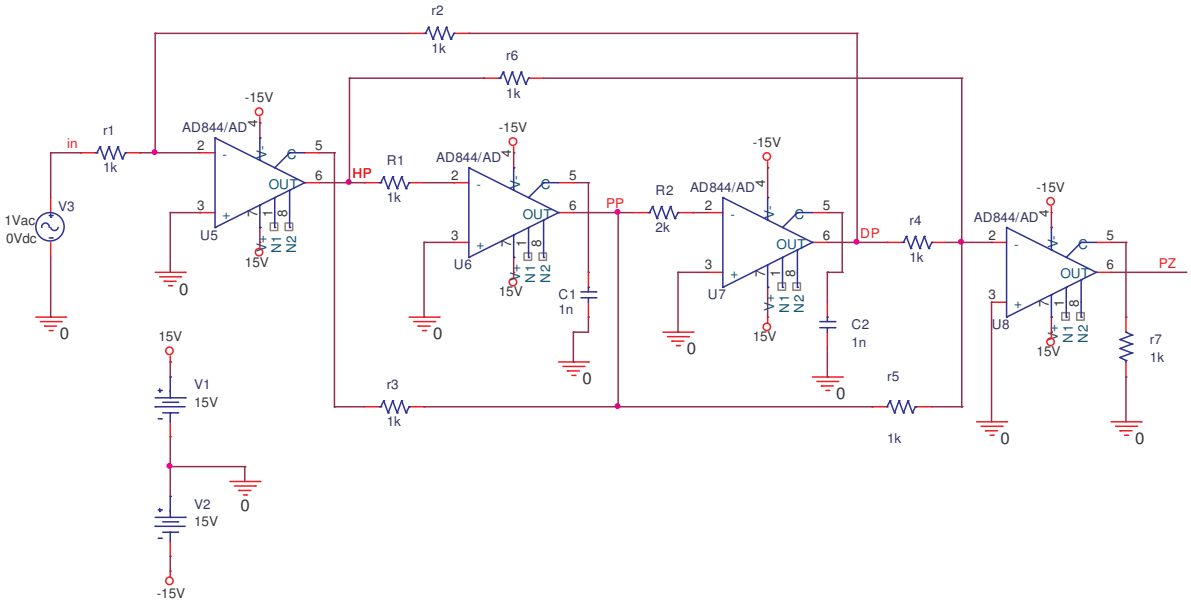
Přenosová funkce – fázovací článek:

$$K_{fc}(s) = \frac{V_{04}}{V_{in}} = \frac{H_0\left(s^2 - \left(\frac{\omega_0}{Q_0}\right)s + \omega_0^2\right)}{D(s)} = \frac{\left(\frac{r_3}{r_1}\right)\left(s^2 - \frac{1}{R_1C_1}s + \frac{r_3}{r_2R_1C_1R_2C_2}\right)}{s^2 + \frac{1}{R_1C_1}s + \frac{r_3}{r_2R_1C_1R_2C_2}} \text{ [3]} \quad (3.5)$$

3.3. Schéma zapojení v programu Pspice (AD844)

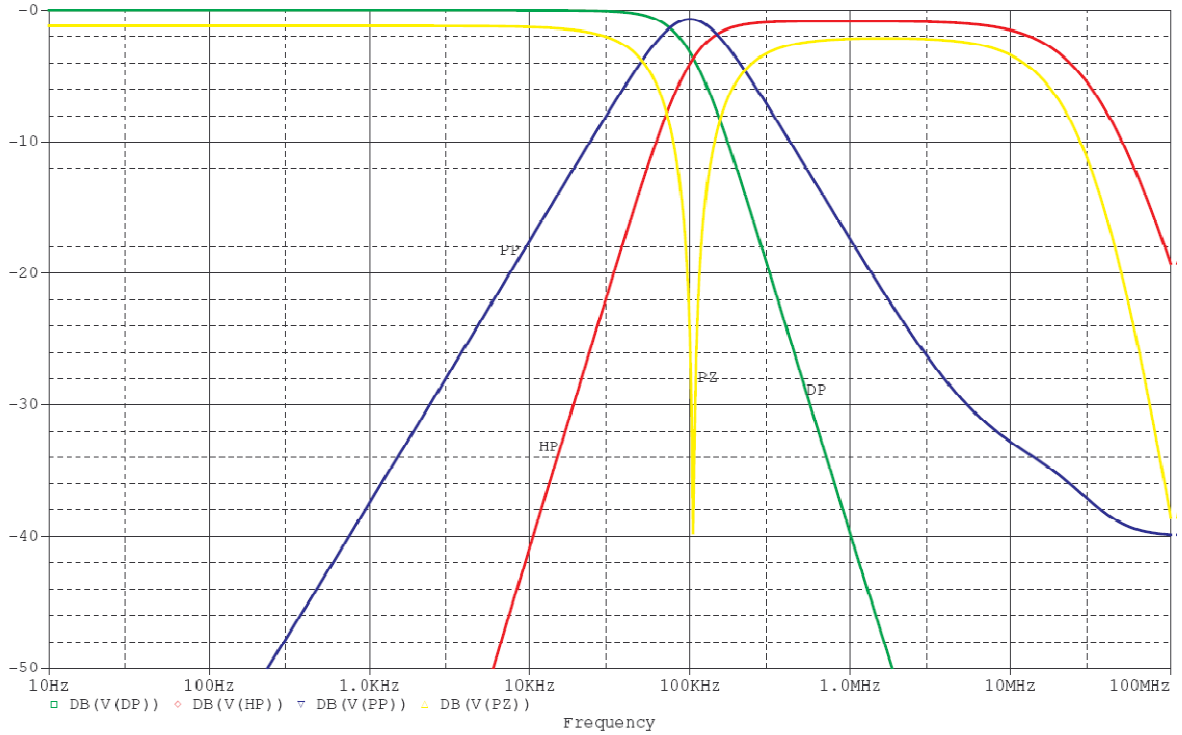


Obr. 7: Schéma zapojení filtru (AD844) v programu Pspice

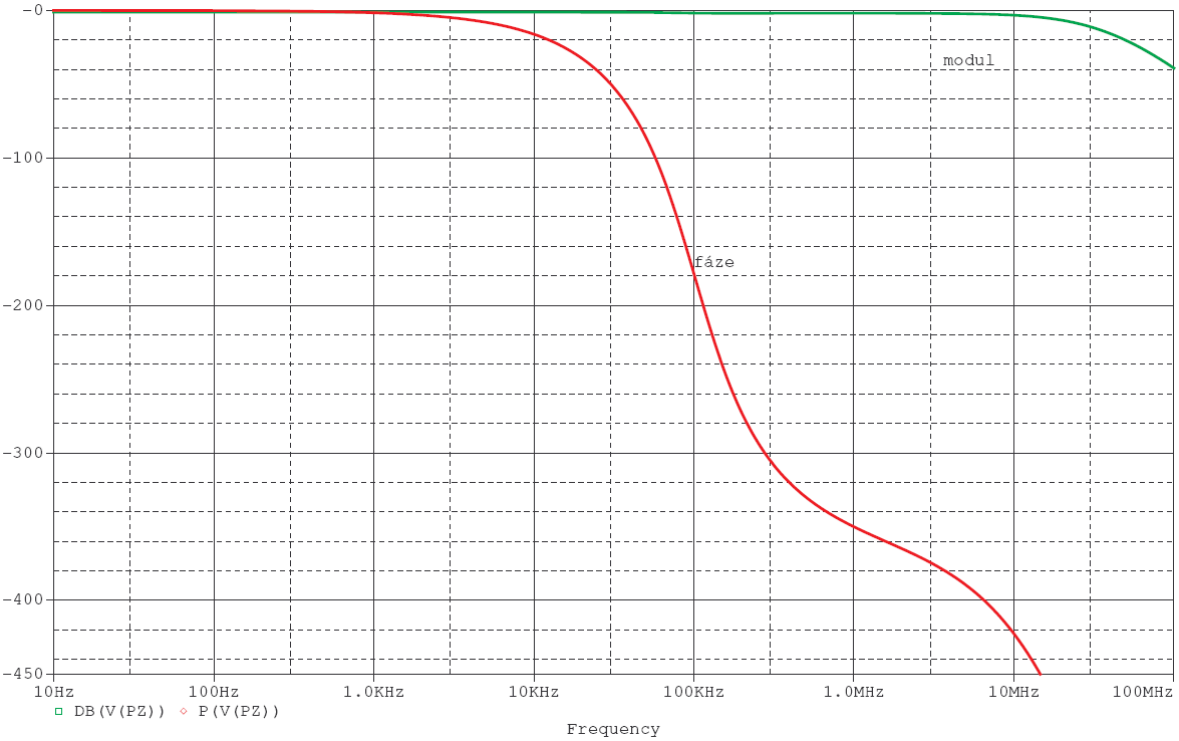


Obr. 8: Schéma zapojení filtru (AD844) v programu Pspice - Fázovací článek

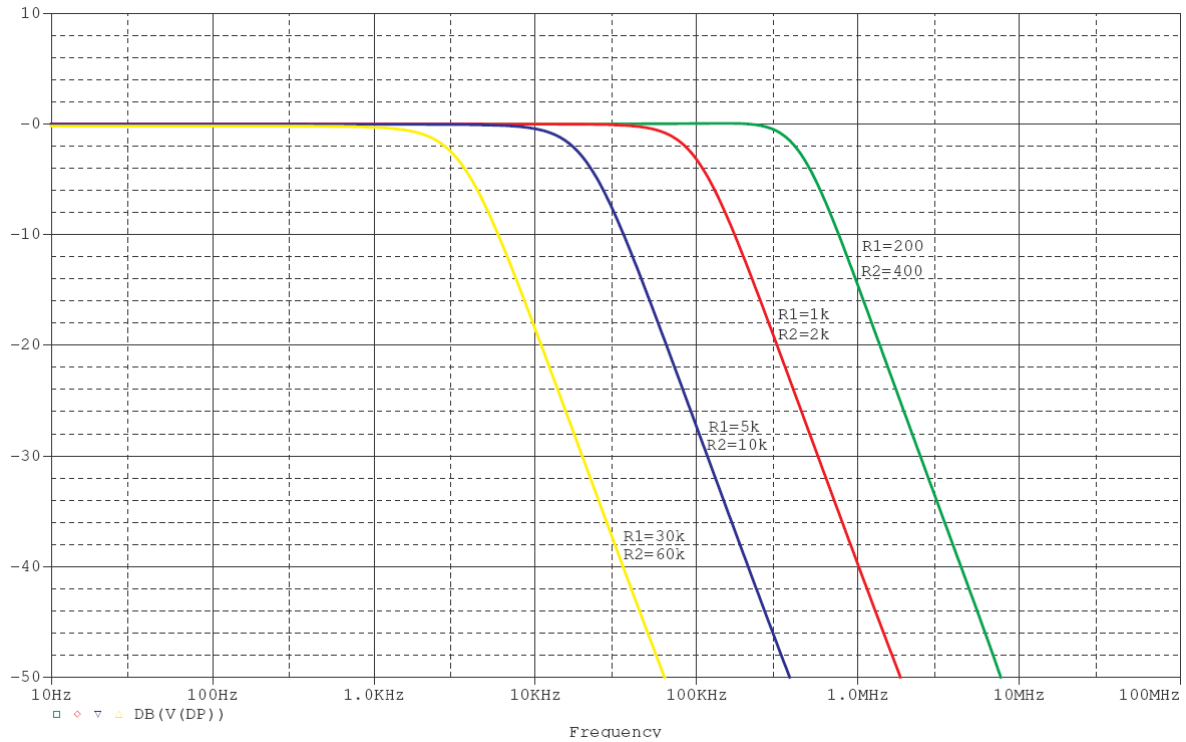
3.4. Simulace v programu Pspice (AD844)



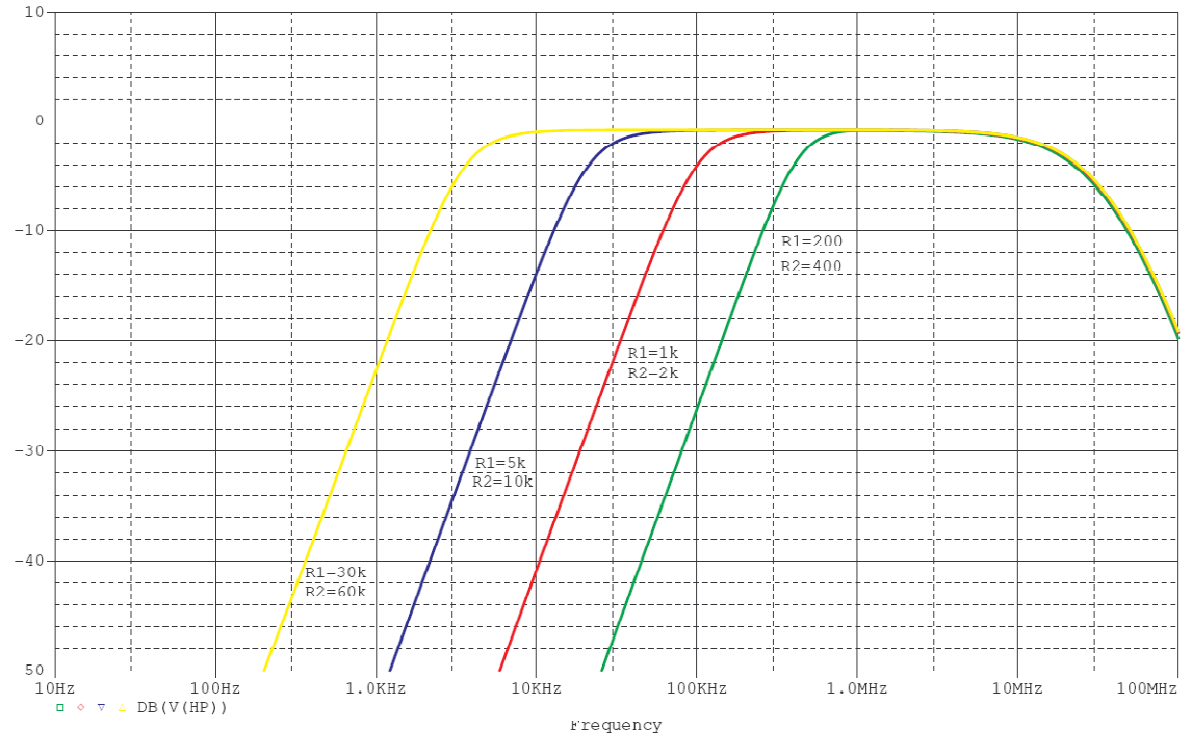
Obr. 9: Modulové frekvenční charakteristiky filtru (AD844)



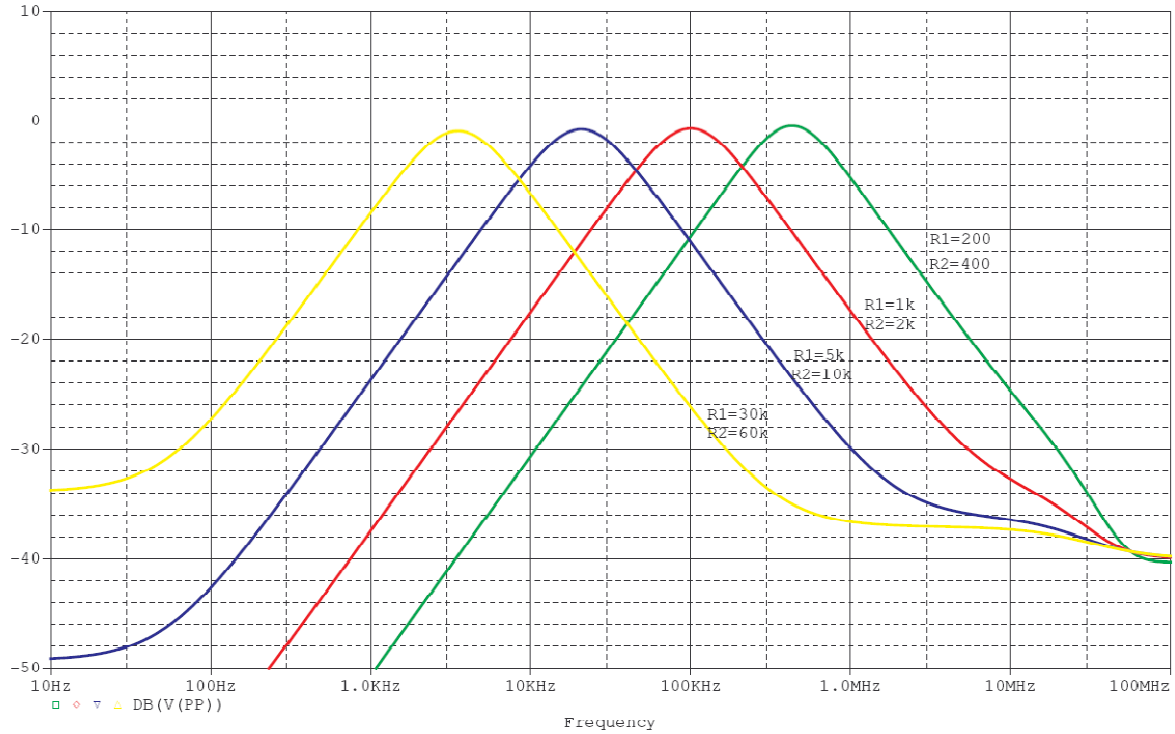
Obr. 10: Modulová a fázová kmitočtová charakteristika fázovacího článku (AD844)



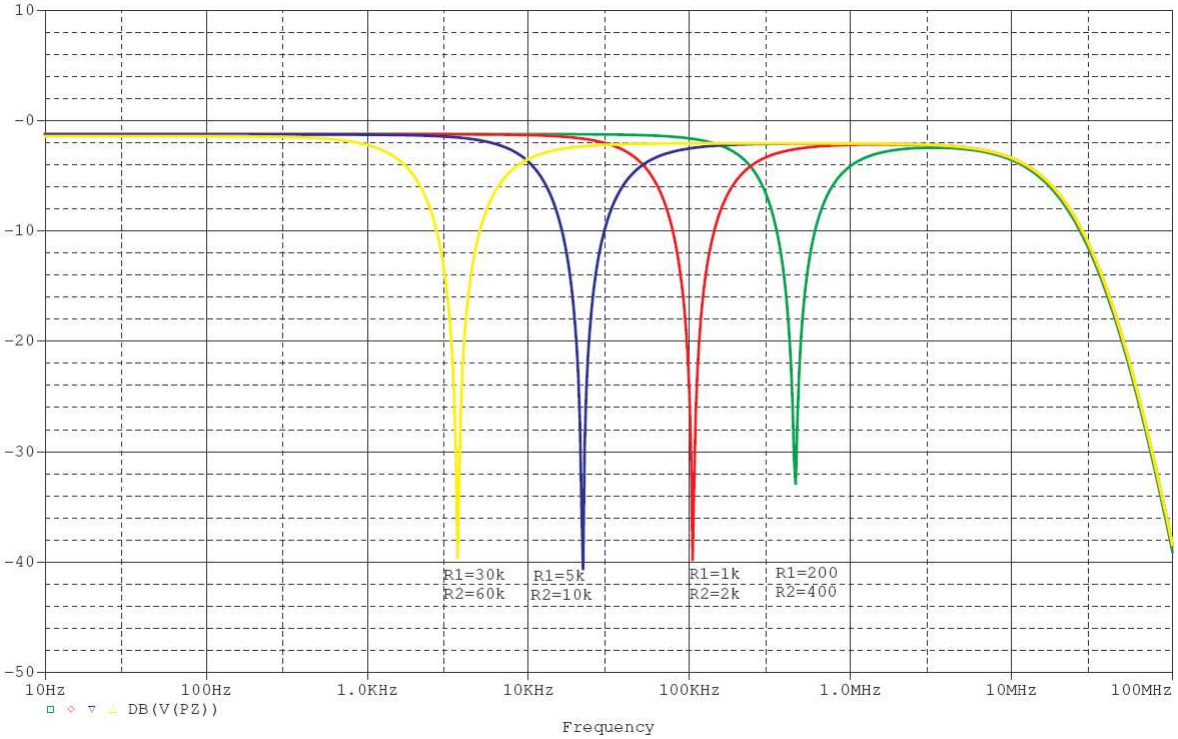
Obr. 11: Přeladění filtru (AD844)- dolní propust



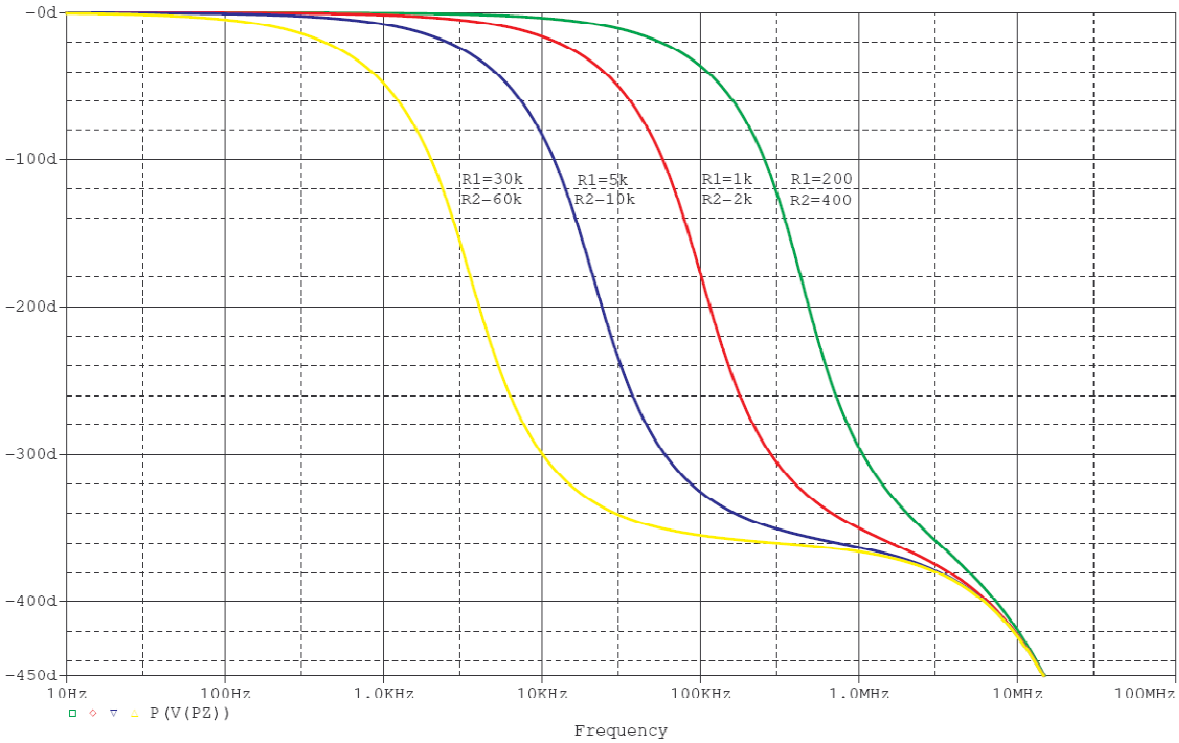
Obr. 12: Přeladění filtru (AD844)- horní propust



Obr. 13: Přeladění filtru (AD844)- pásmová propust



Obr. 14: Přeladění filtru (AD844) - pásmová zádrž



Obr. 15: Přeladění filtru (AD844) - fázovací článek

3.5. Odečtené hodnoty ze simulace (AD844)

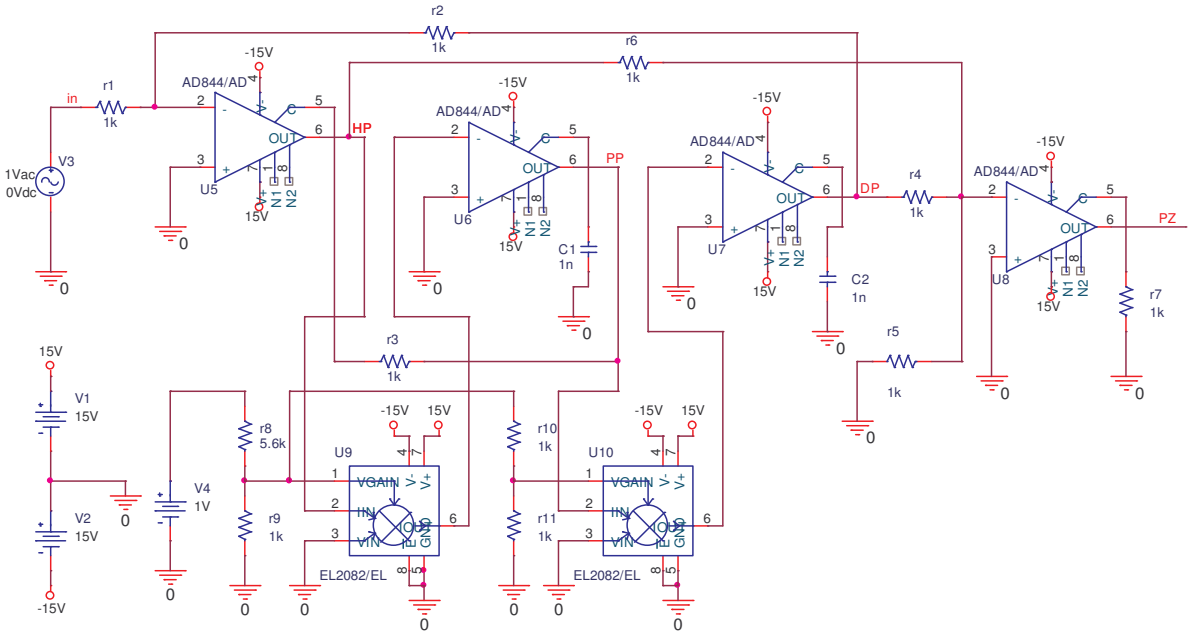
Tabulka 3: Mezní frekvence jednotlivých filtrů (AD844)

Hodnoty rezistorů		DP	HP	PP			PZ			FČ
R1 [kΩ]	R2 [kΩ]	f_{mez} [kHz]	f_{mez} [kHz]	f_{mez1} [kHz]	$f_{stř}$ [kHz]	f_{mez2} [kHz]	f_{mez1} [kHz]	$f_{stř}$ [kHz]	f_{mez2} [kHz]	f_{mez} [kHz]
0,2	0,4	456,13	451,40	243,40	436,81	763,50	235,90	457,06	1020,00	429,60
1	2	98,00	114,60	56,20	98,36	177,80	51,70	104,70	245,90	101,30
5	10	19,75	24,30	11,70	20,73	36,90	10,52	21,88	51,18	21,02
30	60	3,23	4,20	2,02	3,46	6,11	1,70	3,63	8,64	3,50

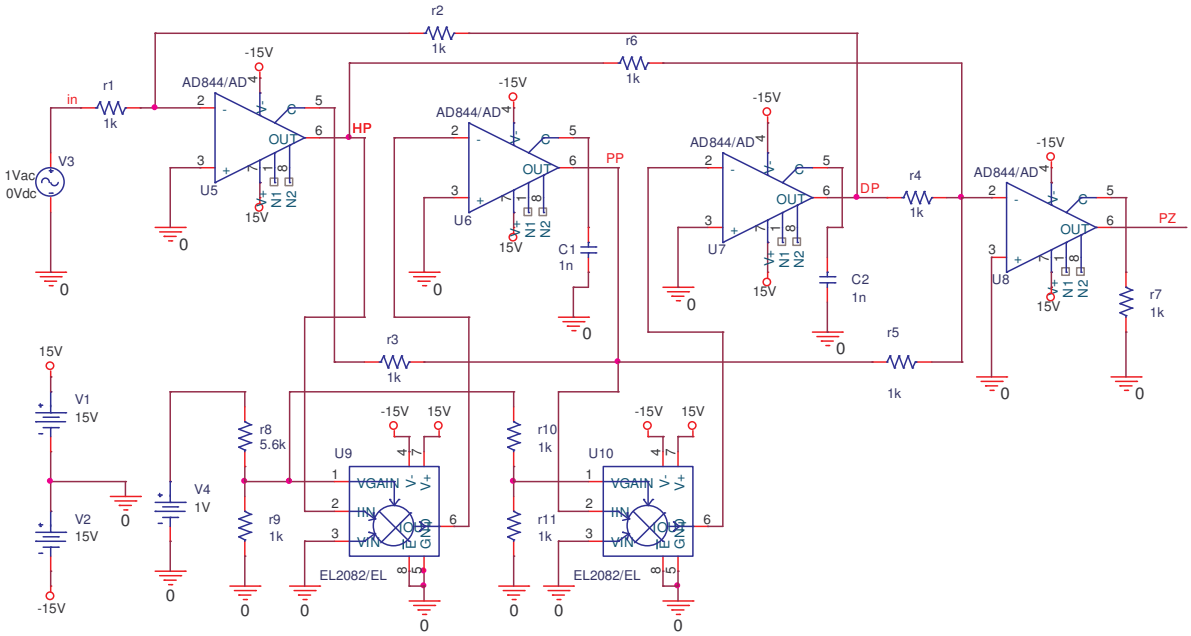
Sklon modulových frekvenčních charakteristik je -40dB/dek, neboť se jedná o filtr druhého řádu. Frekvenční pásmo filtru je 18,7MHz.

3.6 Schéma zapojení v programu Pspice (AD844) s řídícím obvodem EL2082

Obvod EL2082 je proudový zesilovač s napěťově řízeným zesílením. V daném zapojení se obvod chová jako rezistor, jehož hodnota je nastavována napětím zdroje V4. Dva obvody EL2082 nahrazují rezistory R1 a R2 z původního zapojení a jejich vzájemný poměr při přelaďování zajišťuje napěťový dělič tvořený rezistory r10 a r11. Rozsah řídícího napětí na vstupu obvodu, při kterém nedochází ke zkreslení průběhů, je necelý 1V. Přípravek je konstruován pro automatizované měření s rozsahem řídícího napětí 0 až 6V, a proto je na vstupu zařazen dělič tvořený rezistory r8, r9.

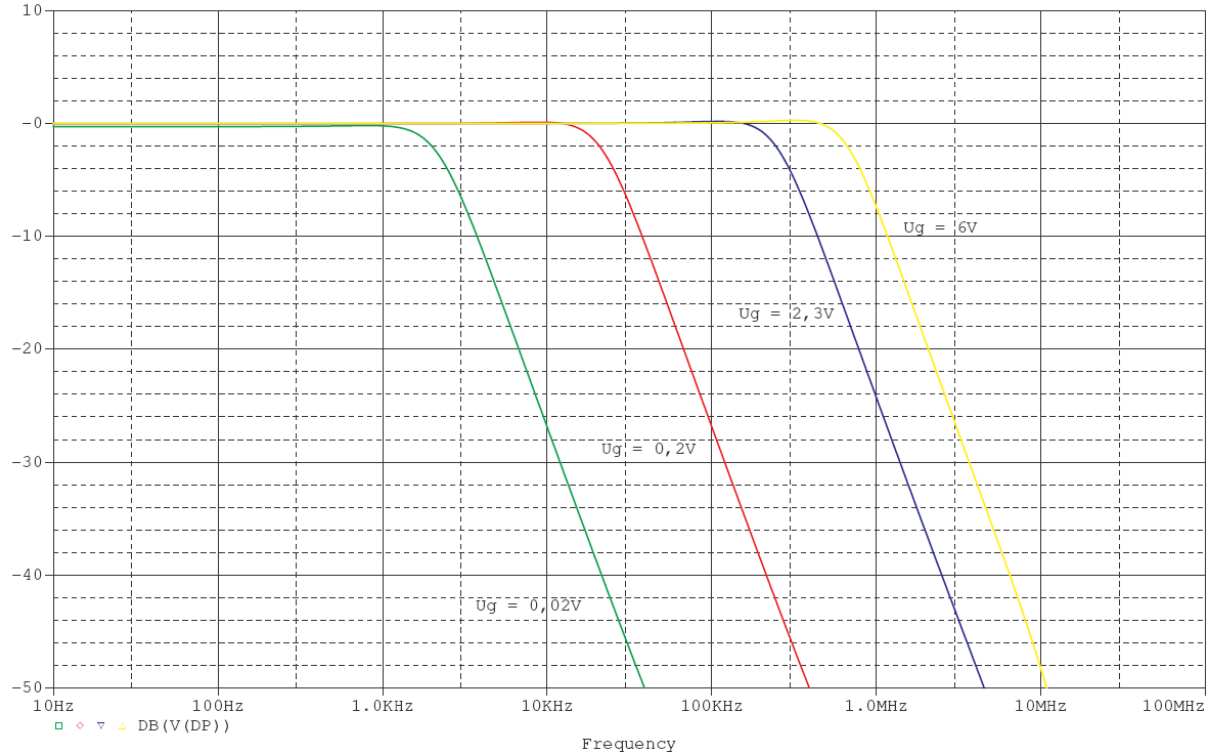


Obr. 16: Schéma zapojení filtru (AD844) v programu Pspice s EL2082

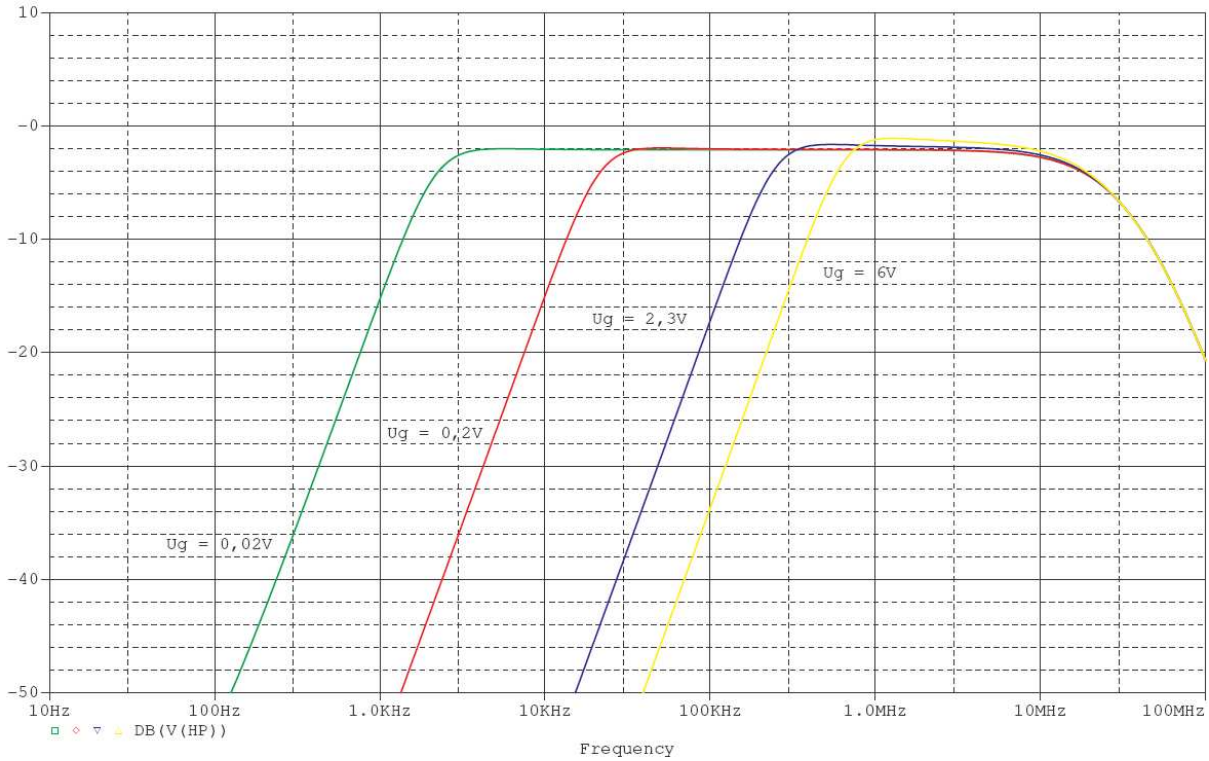


Obr. 17: Schéma zapojení filtru (AD844) v programu Pspice s EL2082 - Fázovací článek

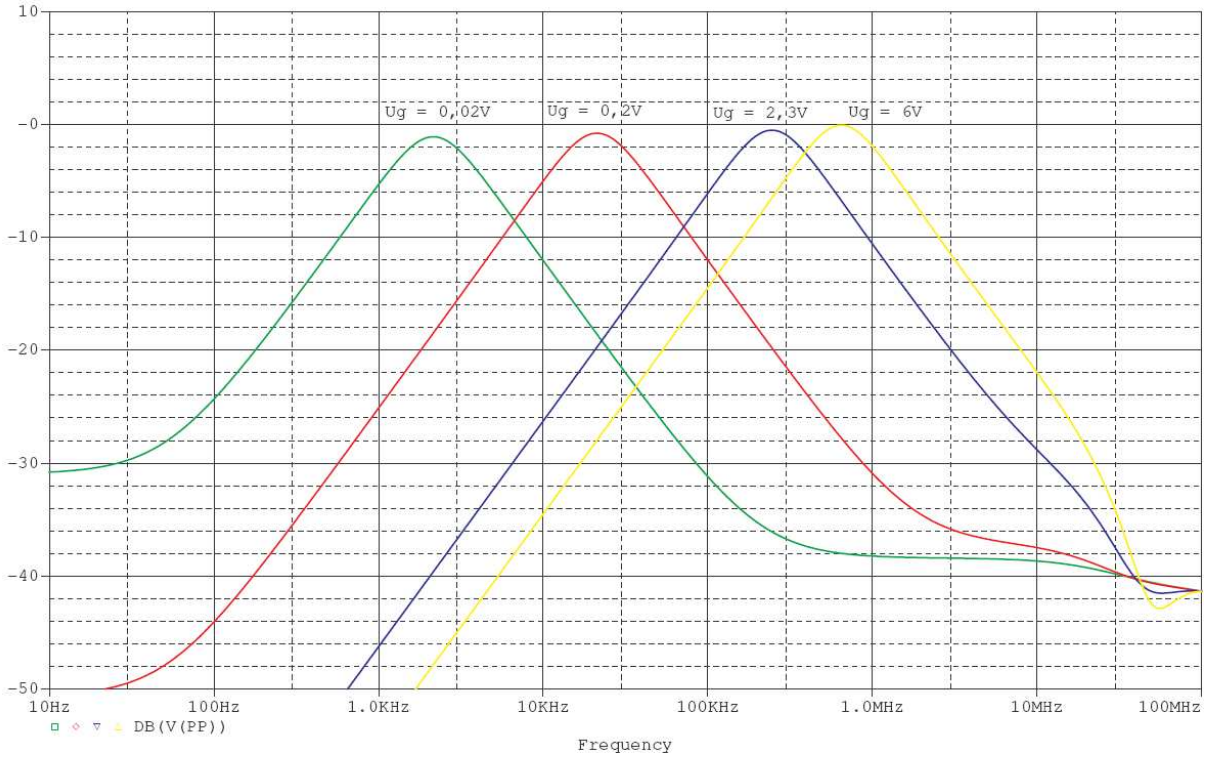
3.7 Simulace v programu Pspice (AD844) s řídícím obvodem EL2082



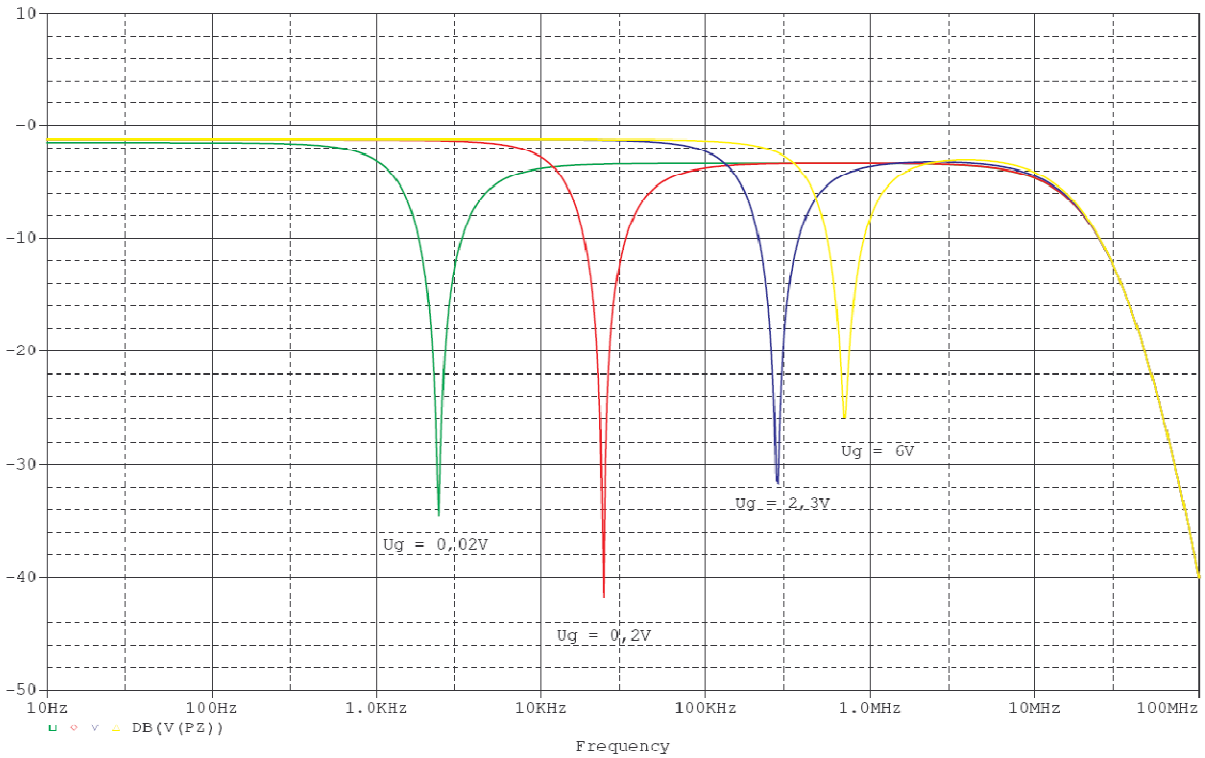
Obr. 18: Přeladění filtru (AD844) s EL2082 – dolní propust



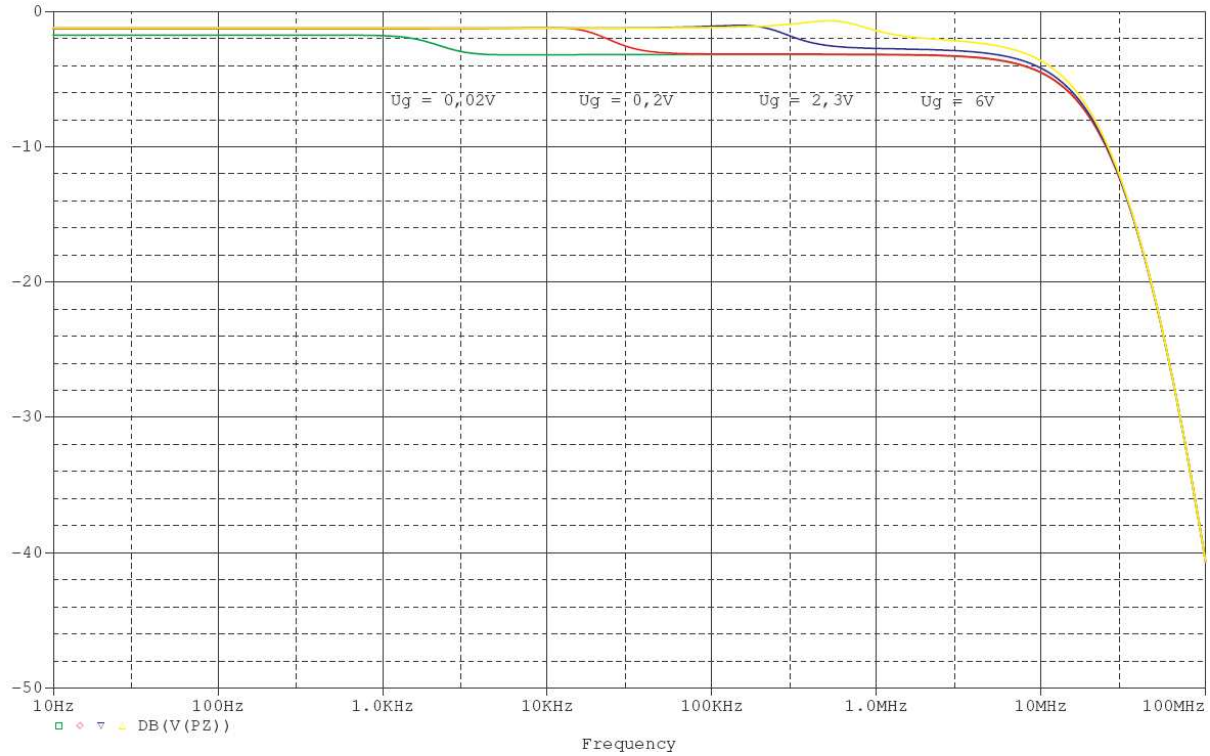
Obr. 19: Přeladění filtru (AD844) s EL2082 – horní propust



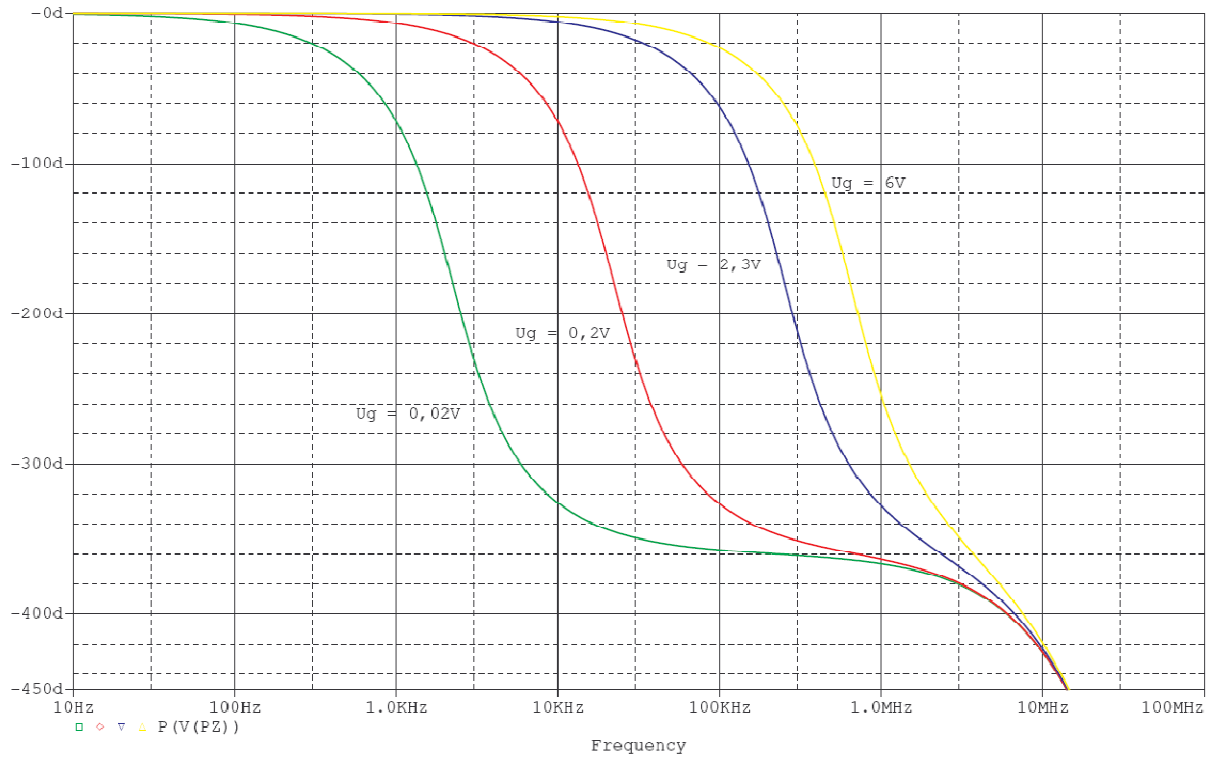
Obr. 20: Přeladění filtru (AD844) s EL2082 – pásmová propust



Obr. 21: Přeladění filtru (AD844) s EL2082 – pásmová zádrž



Obr. 22: Přeladění filtru (AD844) s EL2082 – fázovací článek (modul)



Obr. 23: Přeladění filtru (AD844) s EL2082 – fázovací článek (fáze)

3.8 Odečtené hodnoty ze simulace (AD844) s EL2082

Tabulka 4: Mezní frekvence jednotlivých filtrů (AD844) s EL2082

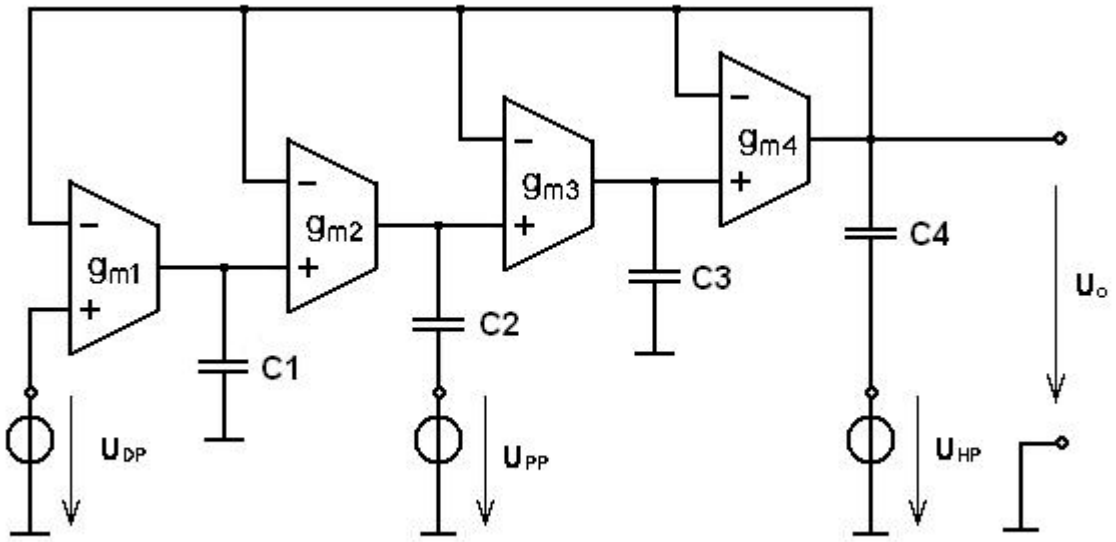
Řídící napětí	DP	HP	PP			PZ			FČ
Ug [V]	f_{mez} [kHz]	f_{mez} [kHz]	f_{mez1} [kHz]	$f_{stř}$ [kHz]	f_{mez2} [kHz]	f_{mez1} [kHz]	$f_{stř}$ [kHz]	f_{mez2} [kHz]	f_{mez} [kHz]
0,02	2,25	2,66	1,33	2,14	3,46	0,98	2,40	5,51	2,24
0,2	23,17	25,29	12,82	21,07	35,22	10,69	23,99	55,08	22,30
2,3	272,24	270,18	143,97	244,62	422,57	124,03	274,69	558,55	252,98
6	734,65	654,74	364,04	650,05	1160,80	324,18	706,19	1369,90	644,79

Sklon modulových frekvenčních charakteristik je opět -40dB/dek. Frekvenční pásmo filtru je 14,1MHz a je tedy menší než v předešlém případě.

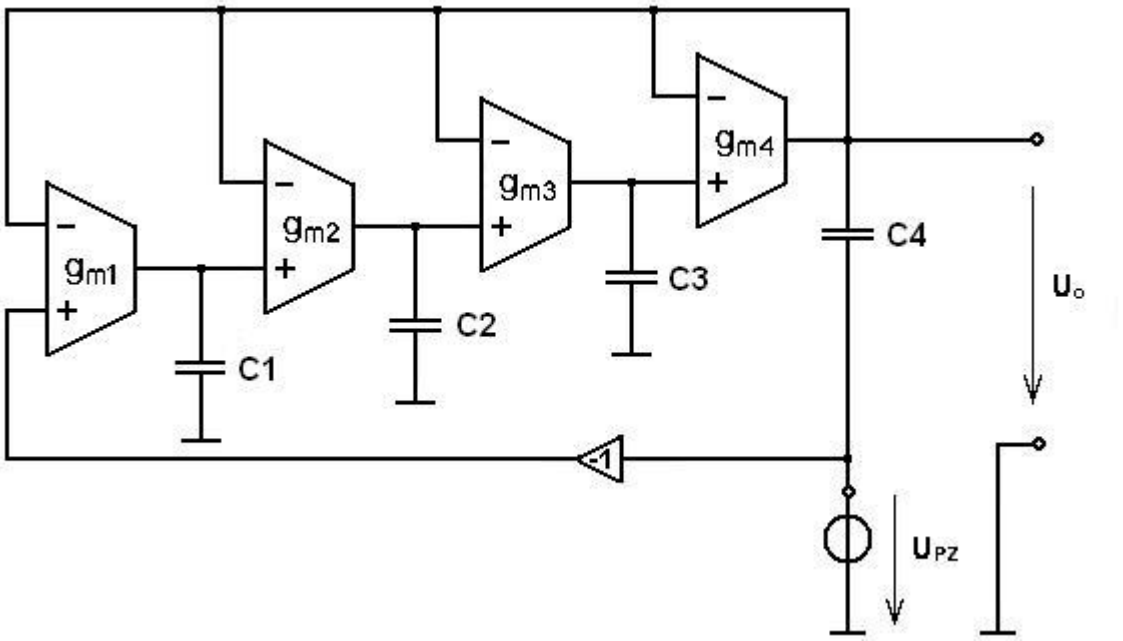
4. PŘÍKLAD ZAPOJENÍ UNIVERZÁLNÍHO FILTRU S JINÝMI MODERNÍMI FUNKČNÍMI BLOKY

4.1. Blokové schéma zapojení s transkonduktory

Zapojení universálního filtru s transkonduktory na obr.16 má jediný výstup a tři vstupy, jejichž vhodnou volbou lze docílit třech základních přenosových funkcí (dolní propust, horní propust a pásmová propust). Vstupy, na které není připojen signál, jsou připojeny na zem. Připojením invertoru ke vstupu dolní nebo horní propusti lze docílit i pásmové zádrže jak je zobrazeno na obr.17. [4]



Obr. 24: Zapojení univerzálního filtru s obvodem LT1228 [4]



Obr. 25: Konfigurace filtru s obvodem LT1228 pro pásmovou zádrž [4]

4.2. Přenosové funkce v zapojení s transkonduktory

Přenosová funkce – dolní propust:

$$K_{DP}(s) = \frac{U_0}{U_{DP}} = \frac{g_{m1} \cdot g_{m2} \cdot g_{m3} \cdot g_{m4}}{D(s)} \quad [4] \tag{4.1}$$

Přenosová funkce – pásmová propust:

$$K_{PP}(s) = \frac{U_0}{U_{PP}} = \frac{s^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot g_{m3} \cdot g_{m4}}{D(s)} \quad [4] \tag{4.2}$$

Přenosová funkce – horní propust:

$$K_{HP}(s) = \frac{U_0}{U_{HP}} = \frac{s^4 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4}{D(s)} \quad [4] \tag{4.3}$$

Přenosová funkce – pásmová zádrž:

$$K_{PZ}(s) = \frac{U_0}{U_{PZ}} = \frac{s^4 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 + g_{m1} \cdot g_{m2} \cdot g_{m3} \cdot g_{m4}}{D(s)} =$$

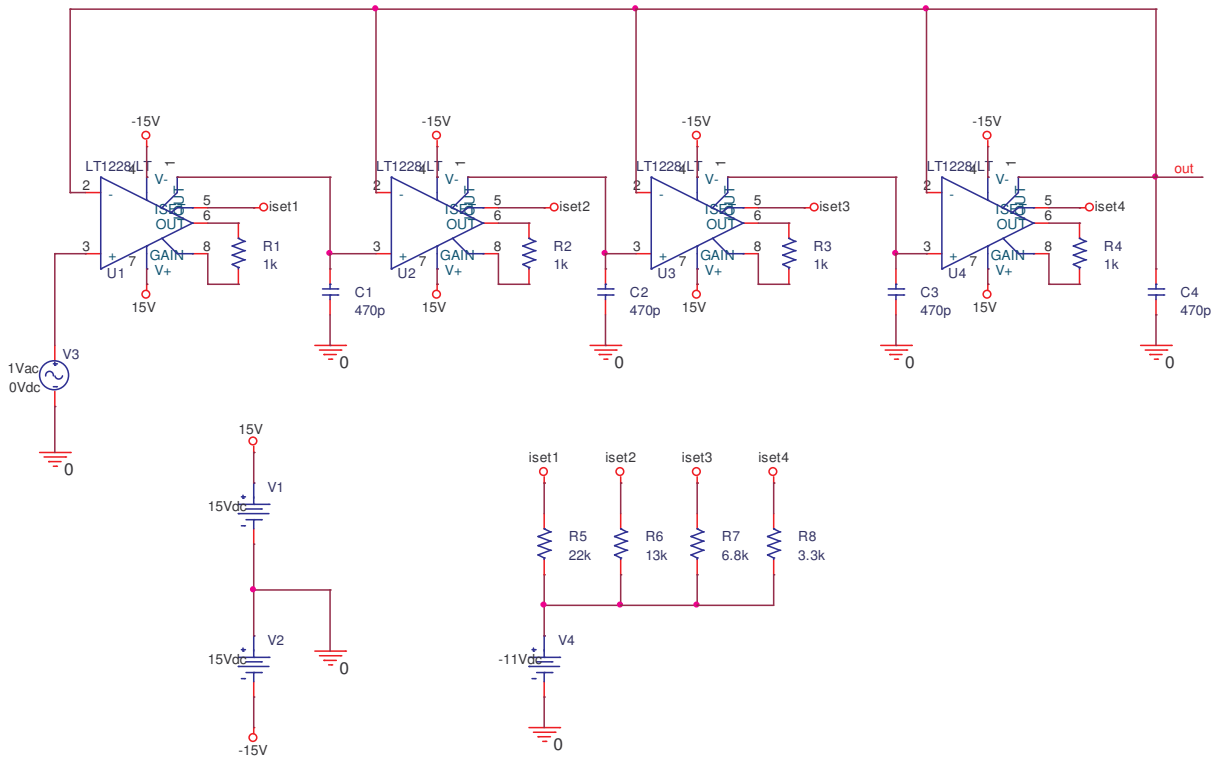
$$= \frac{s^4 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4}{D(s)} + \frac{g_{m1} \cdot g_{m2} \cdot g_{m3} \cdot g_{m4}}{D(s)} \quad [4] \tag{4.4}$$

Jmenovatel přenosové funkce:

$$D(s) = s^4 + b_3 \cdot s^3 + b_2 \cdot s^2 + b_1 \cdot s + b_{0=}$$

$$= s^4 + \frac{g_{m4}}{C_4} \cdot s^3 + \frac{g_{m3} \cdot g_{m4}}{C_3 \cdot C_4} \cdot s^2 + \frac{g_{m2} \cdot g_{m3} \cdot g_{m4}}{C_2 \cdot C_3 \cdot C_4} \cdot s + \frac{g_{m1} \cdot g_{m2} \cdot g_{m3} \cdot g_{m4}}{C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4} \quad [4] \tag{4.5}$$

4.3. Schéma zapojení v programu Pspice s obvodem LT1228



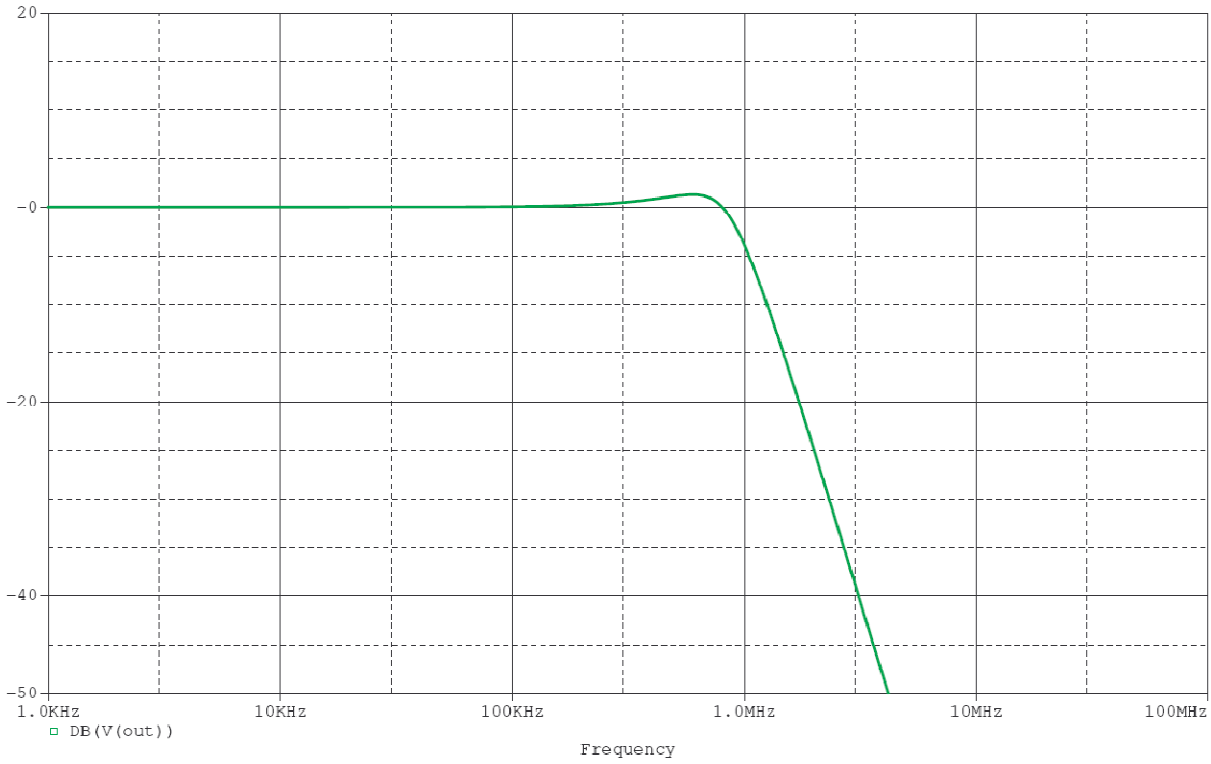
Obr. 26: Schéma zapojení filtru s obvodem LT 1228 v programu Pspice (dolní propust)

Hodnoty součástek:

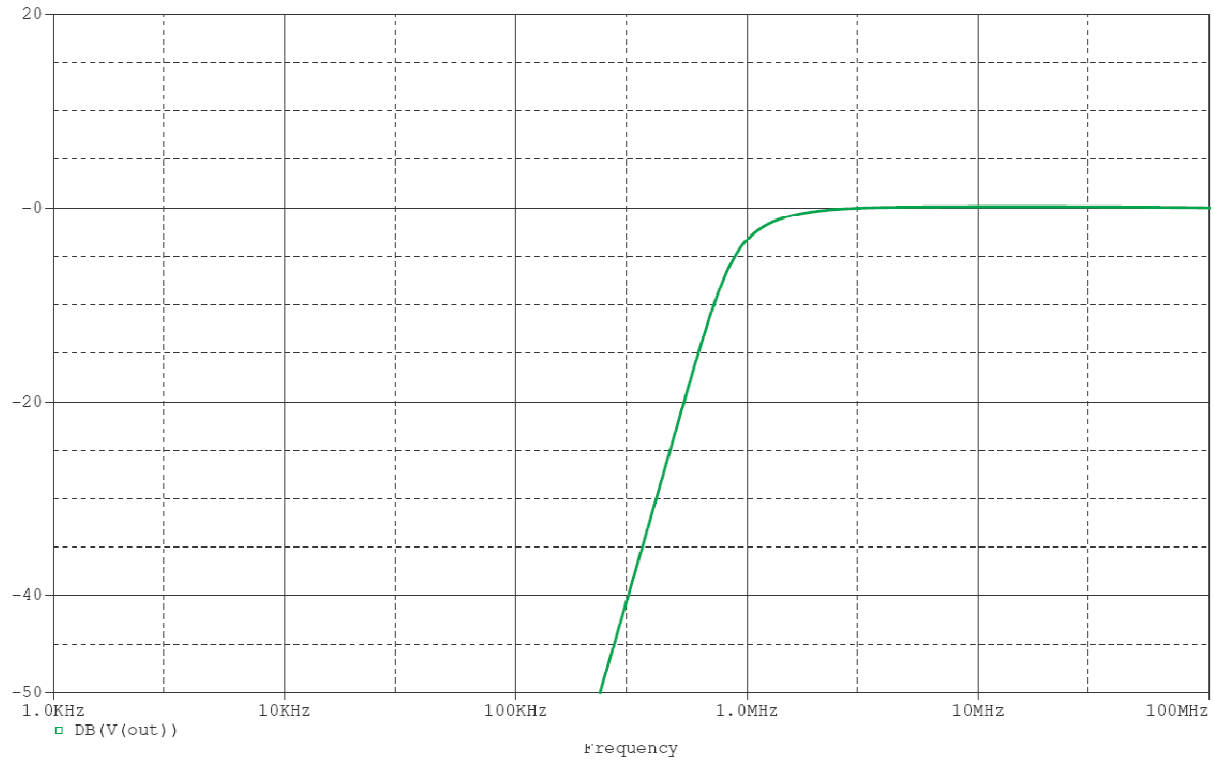
Tabulka 5: Hodnoty součástek (LT 1228) [4]

Název	C1 až C4	R1 až R4	R5	R6	R7	R8
Hodnota	470pF	1 kΩ	22 kΩ	13 kΩ	6.8 kΩ	3.3 kΩ

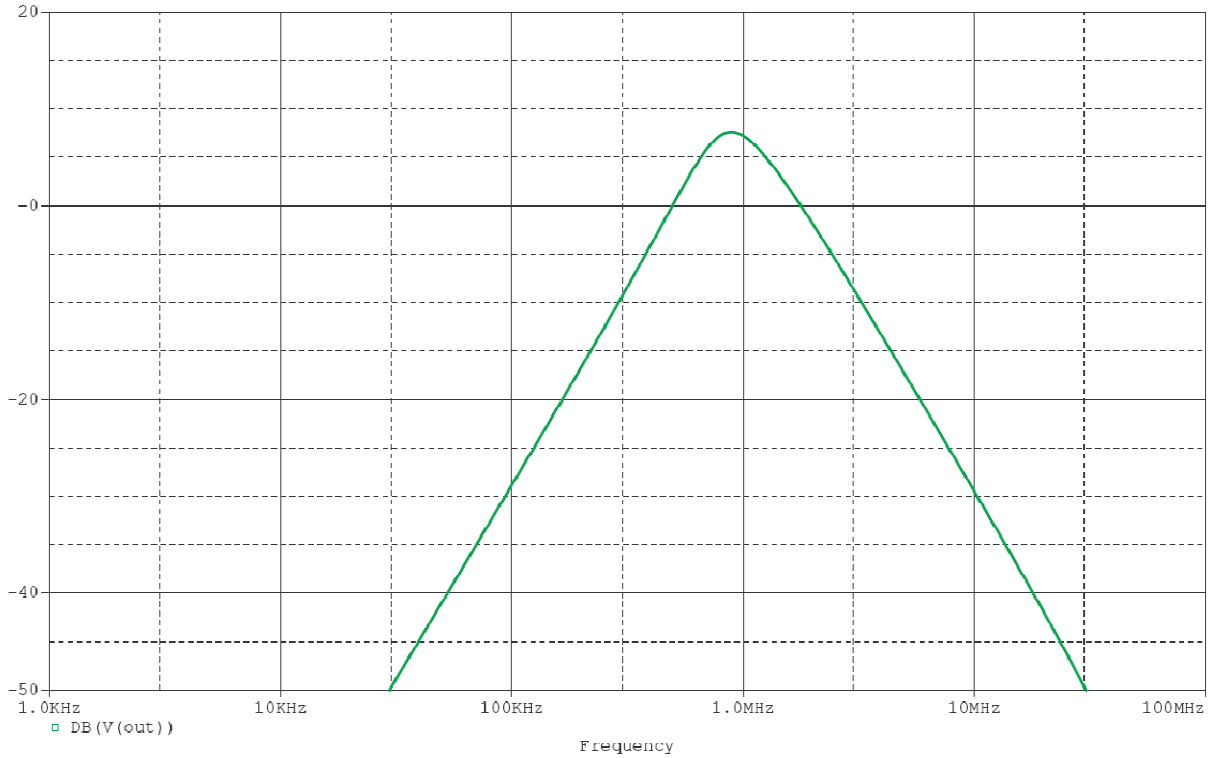
4.4. Simulace v Pspice a obvodem LT1228



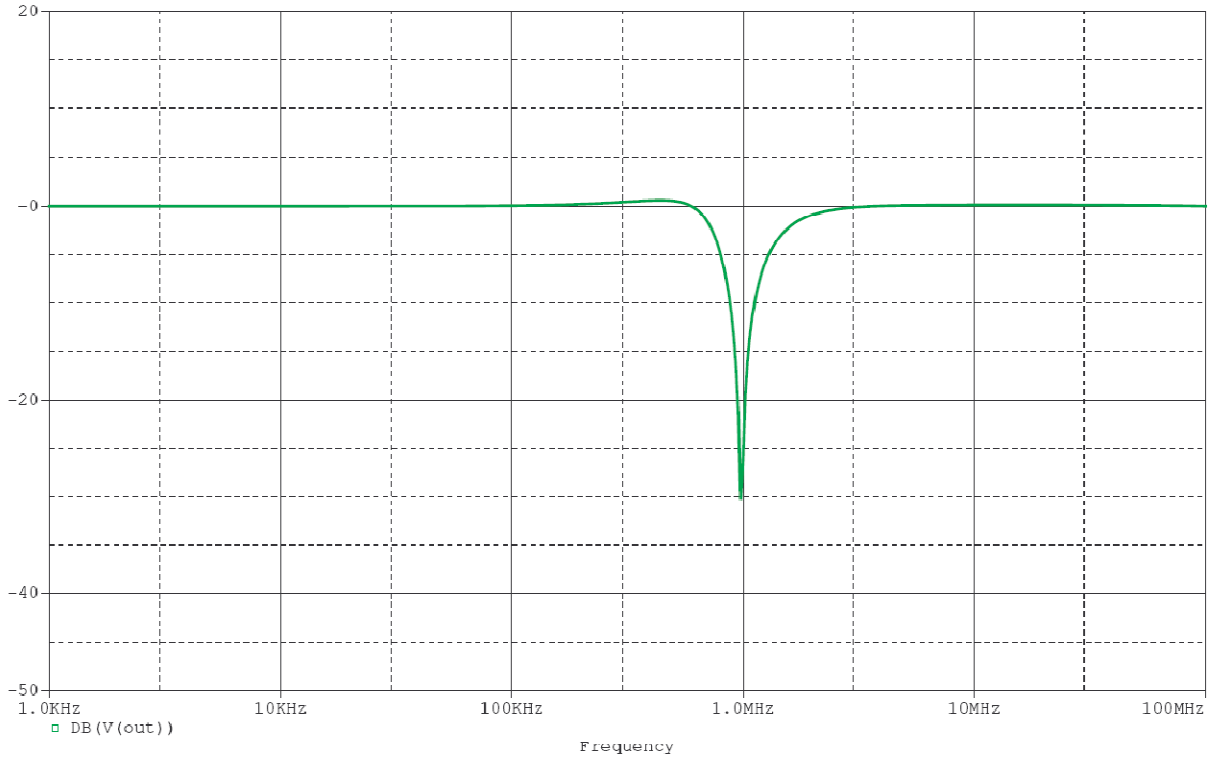
Obr. 27: Dolní propust filtru (LT 1228)



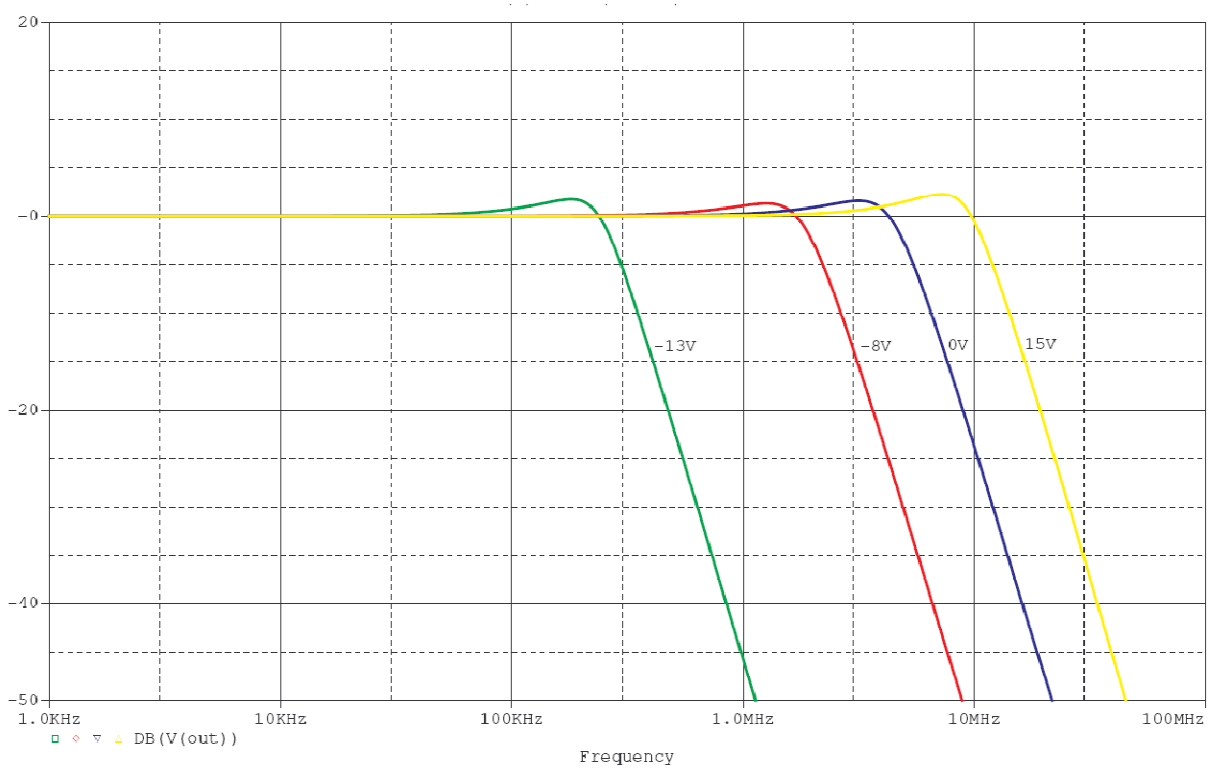
Obr. 28: Horní propust filtru (LT 1228)



Obr. 29: Pásmová propust filtru (LT 1228)



Obr. 30: Pásmová zádrž filtru (LT 1228)

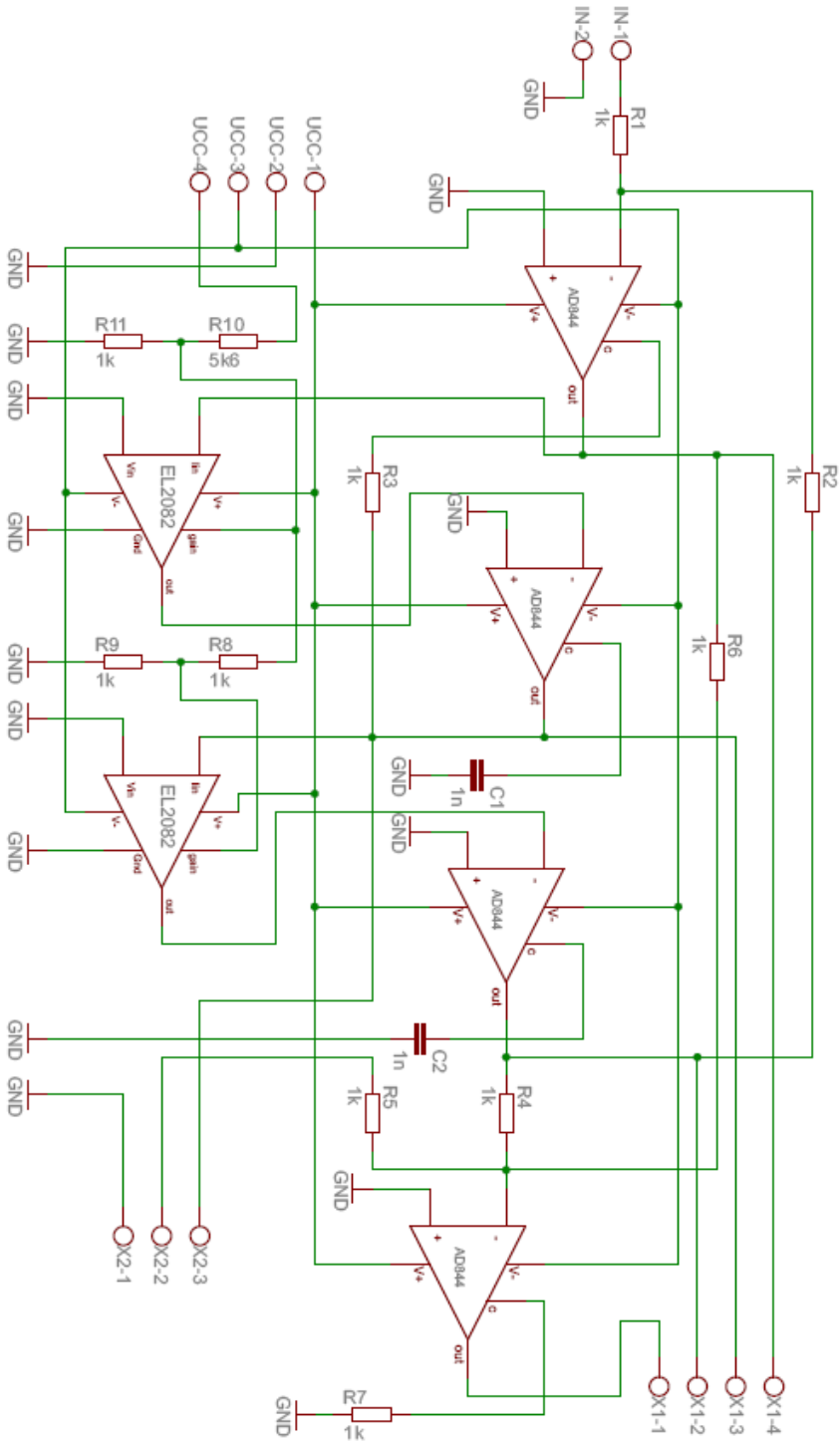


Obr. 31: Přeladění filtru (LT 1228) - dolní propust

Sklon frekvenčních modulových charakteristik je -80dB/dek. Jedná se tedy o filtr 4.řádu. Frekvenční pásmo filtru je přes 100MHz a lze tento filtr přelaďovat v rozsahu od 275kHz do 11MHz napětím v rozmezí od -13V do 15V.

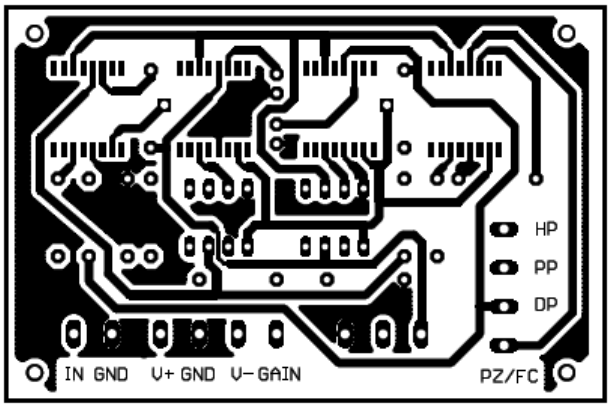
5. KONSTRUKCE FILTRU V ZAPOJENÍ S AD844

5.1. Schéma zapojení v programu Eagle

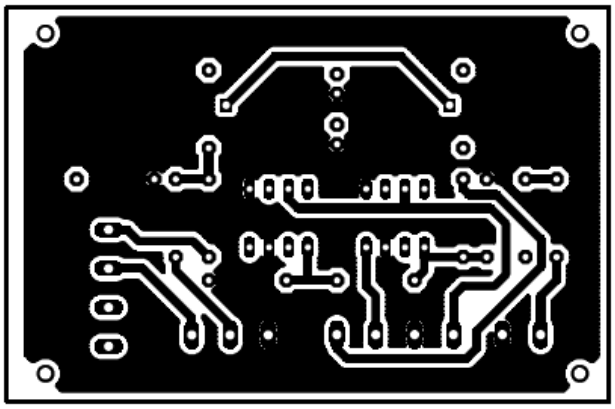


Obr. 32: Schéma zapojení filtru (AD844) s EL2082 v programu Eagle

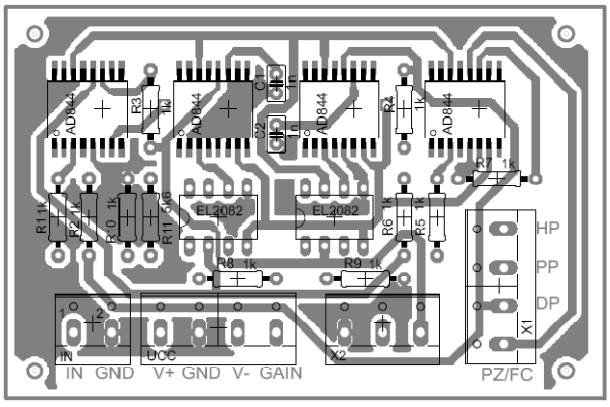
5.2. Plošný spoj



Obr. 33: Strana z pohledu součástek - TOP



Obr. 34: Strana z pohledu spojů - BUTTOM



Obr. 35: Osazení součástek

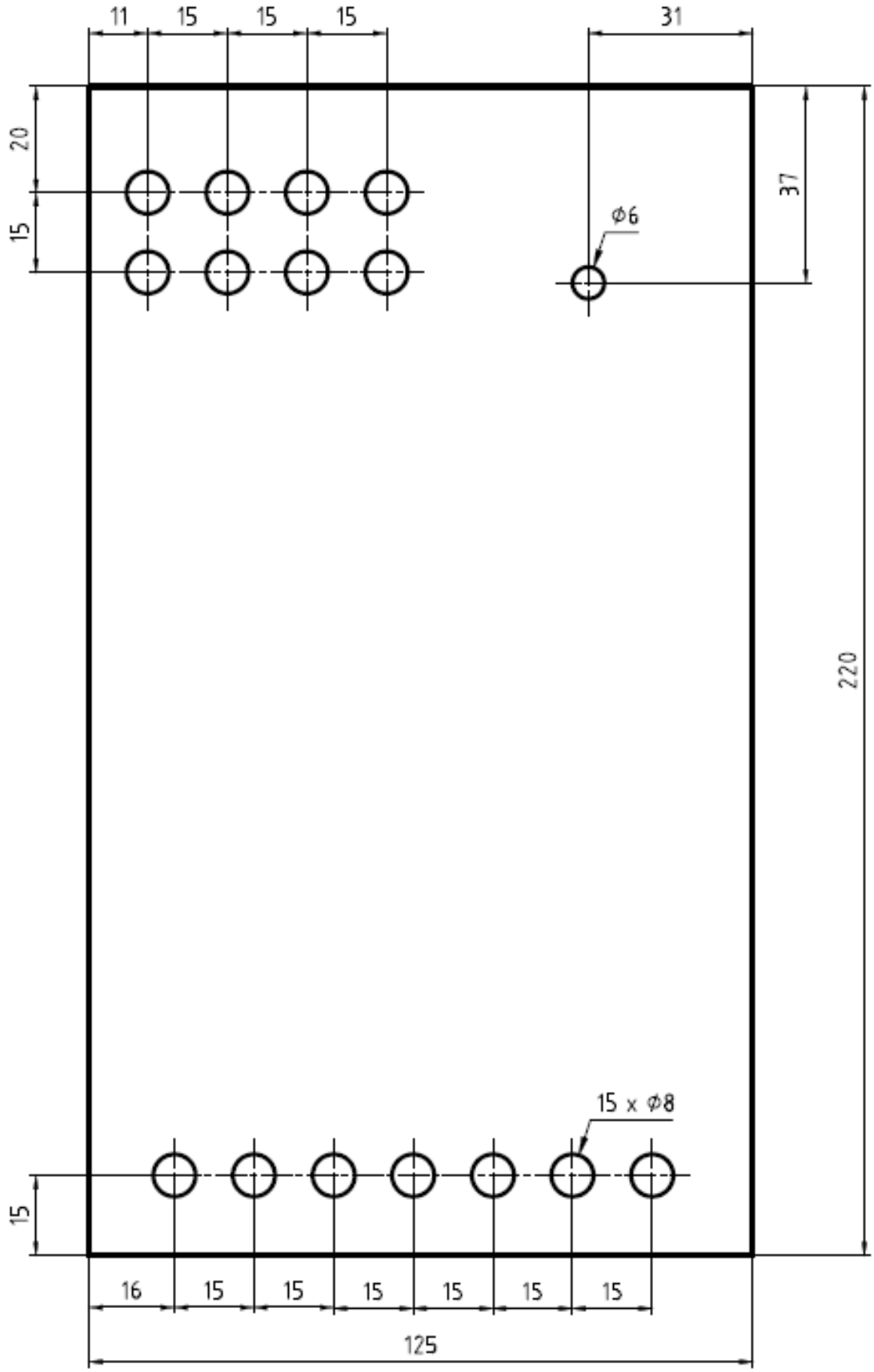
5.3. Seznam součástek

Tabulka 6: Seznam součástek

Pol.	Množství	Název	Typ	Hodnota
1	10	Rezistor R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9, R11	Metalizovaný	1kΩ / 0,6W
2	1	Rezistor R10	Metalizovaný	5,6kΩ / 0,6W
3	2	Kondenzátor C1, C2	Keramický	1nF / 100V
4	3	Kondenzátor C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9 C10, C11, C12, C13, C14	Keramický	1uF / 100V
5	4	IO1, IO2, IO3, IO4	AD844	
6	2	IO5, IO6	EL2082	
7	2	Patice obyčejná	SOKL 8	
8	7	Přístrojová zdířka pro banánek	SBZ GREEN	
9	7	Přístrojová zdířka pro banánek	SBZ RED	
10	1	Přístrojová zdířka pro banánek	SBZ BLUE	
11	1	Páčkový přepínač	P-B069B	1x250V/3A
12	1	Svorkovnice	AK 500/3-DS-5.0-V-GREY	
13	5	Svorkovnice	AK 500/2-DS-5.0-V-GREY	

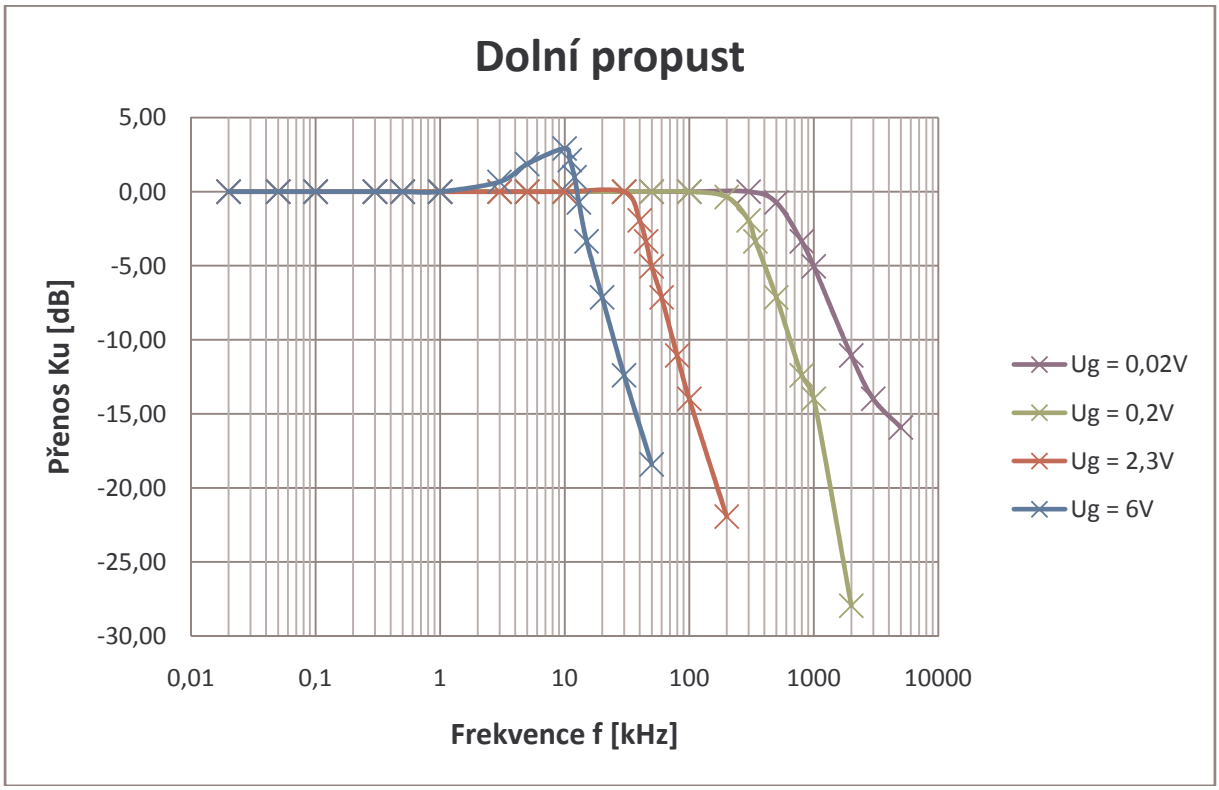
Kondenzátory C3 až C14 nejsou ve schématu ani na desce plošného spoje zakresleny, neboť byly do přípravku přidány až po jeho zhotovení. Kondenzátory jsou připájeny k napájecím pinům všech integrovaných obvodů proti zemi a zamezují tak nechtěným oscilacím.

5.4. Rozměry desky laboratorního přípravku

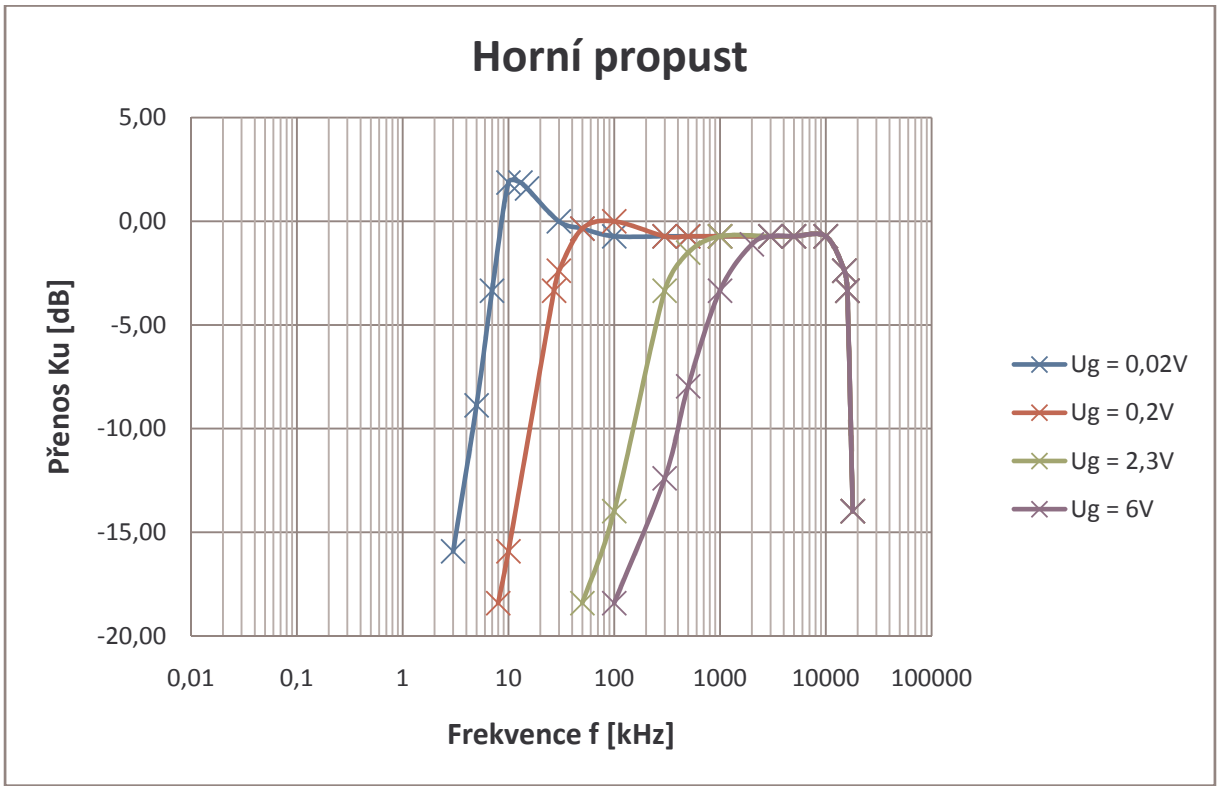


Obr. 36: Nákres přípravku

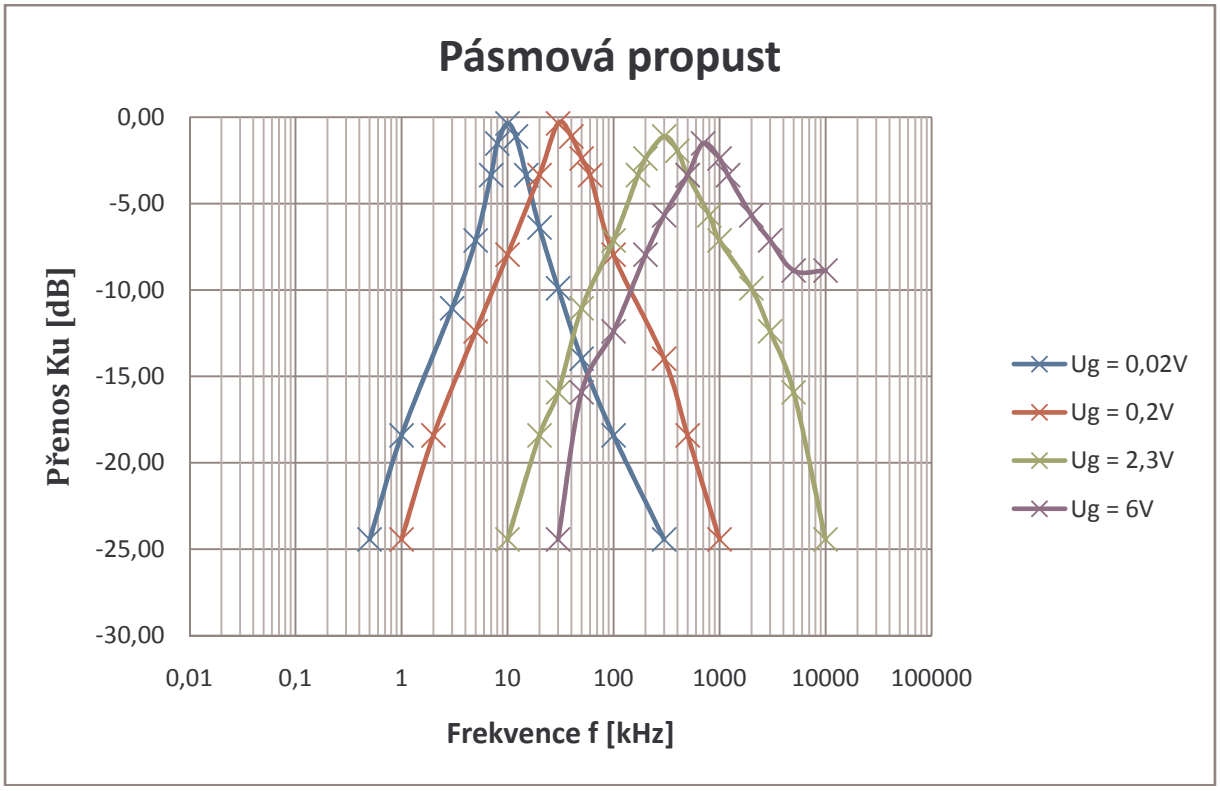
6. ZMĚŘENÉ CHARAKTERISTIKY A HODNOTY FILTRU S AD844



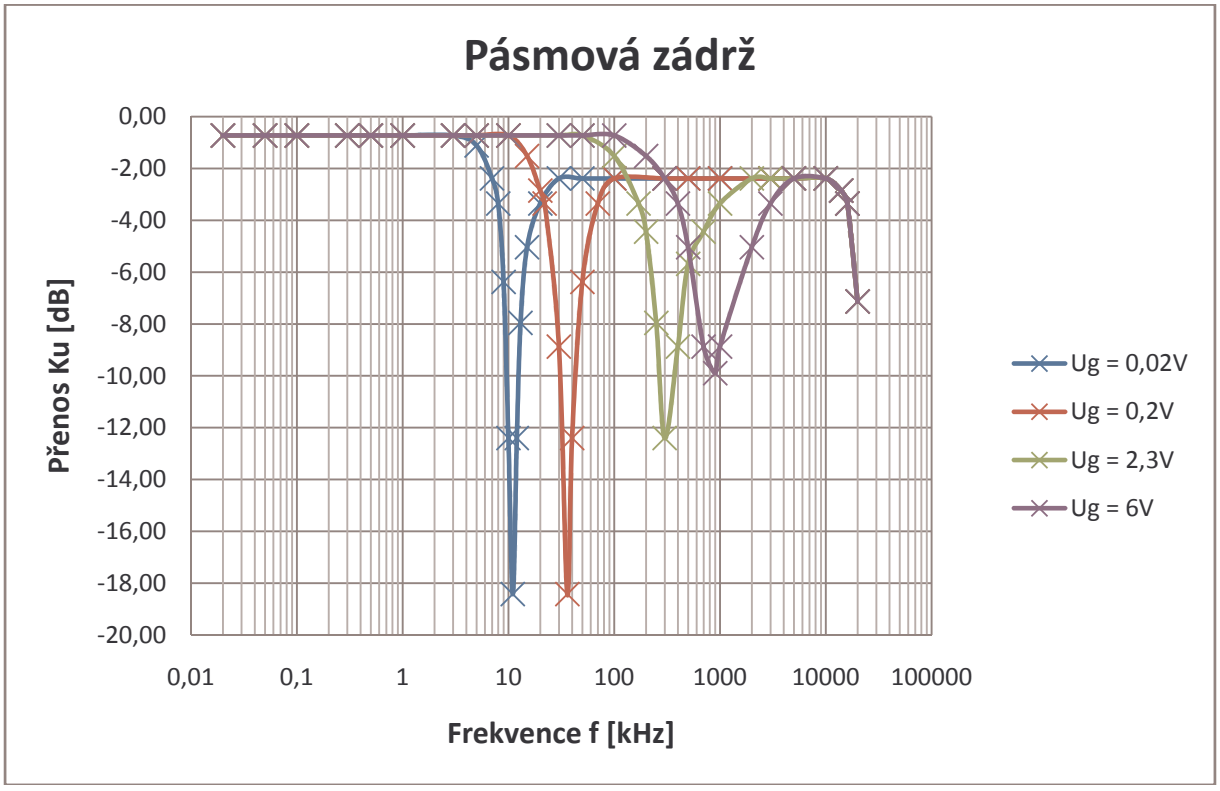
Obr. 37: Změřené hodnoty (AD844) - dolní propust



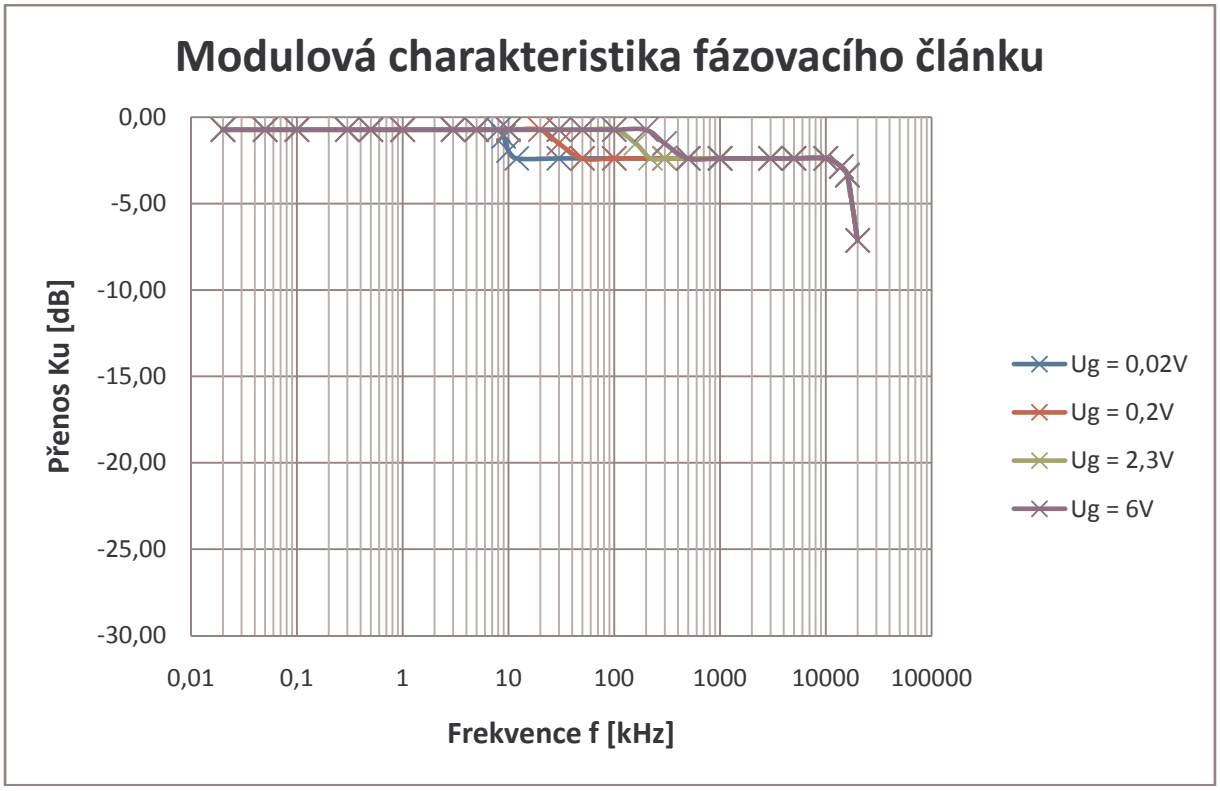
Obr. 38: Změřené hodnoty (AD844) - horní propust



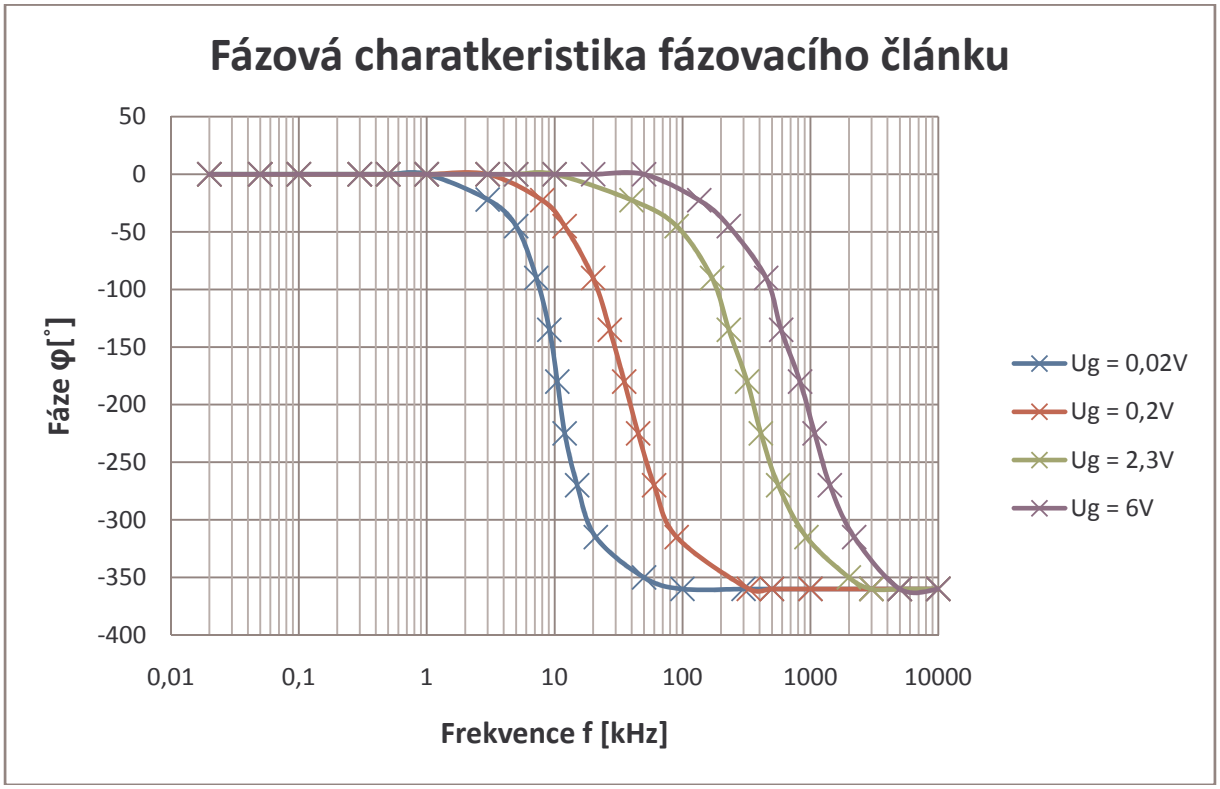
Obr. 39: Změřené hodnoty (AD844) - pásmová propust



Obr. 40: Změřené hodnoty (AD844) - pásmová zádrž



Obr. 41: Zěřené hodnoty (AD844) - fázovací článek (modul)



Obr. 42: Změřené hodnoty (AD844) - fázovací článek (fáze)

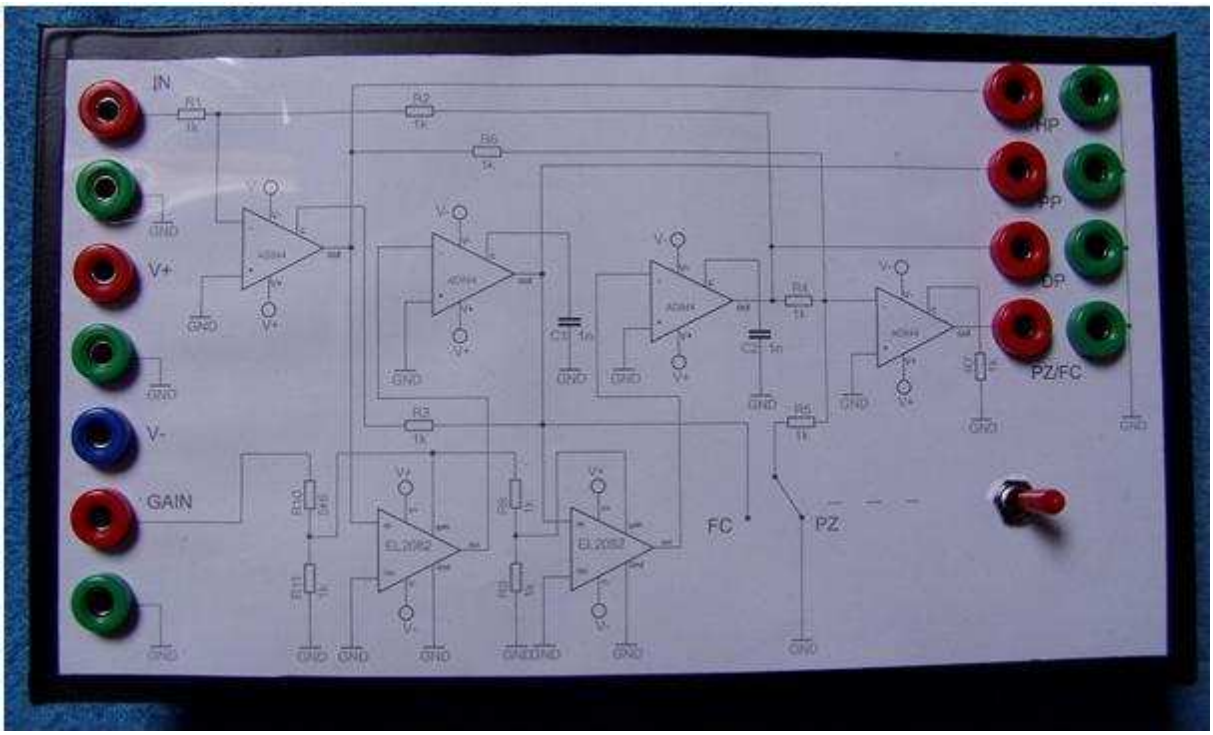
Tabulka 7: Mezní frekvence jednotlivých filtrů (AD844)– naměřené hodnoty

Řídící napětí	DP	HP	PP			PZ			FČ
Ug [V]	f_{mez} [kHz]	f_{mez} [kHz]	f_{mez1} [kHz]	$f_{stř}$ [kHz]	f_{mez2} [kHz]	f_{mez1} [kHz]	$f_{stř}$ [kHz]	f_{mez2} [kHz]	f_{mez} [kHz]
0,02	15	7	7	10	15	8	11	20	11
0,2	45	27	20	30	60	22	36	70	35
2,3	340	300	170	300	500	170	300	1000	320
6	800	1000	500	700	1200	400	900	3000	830

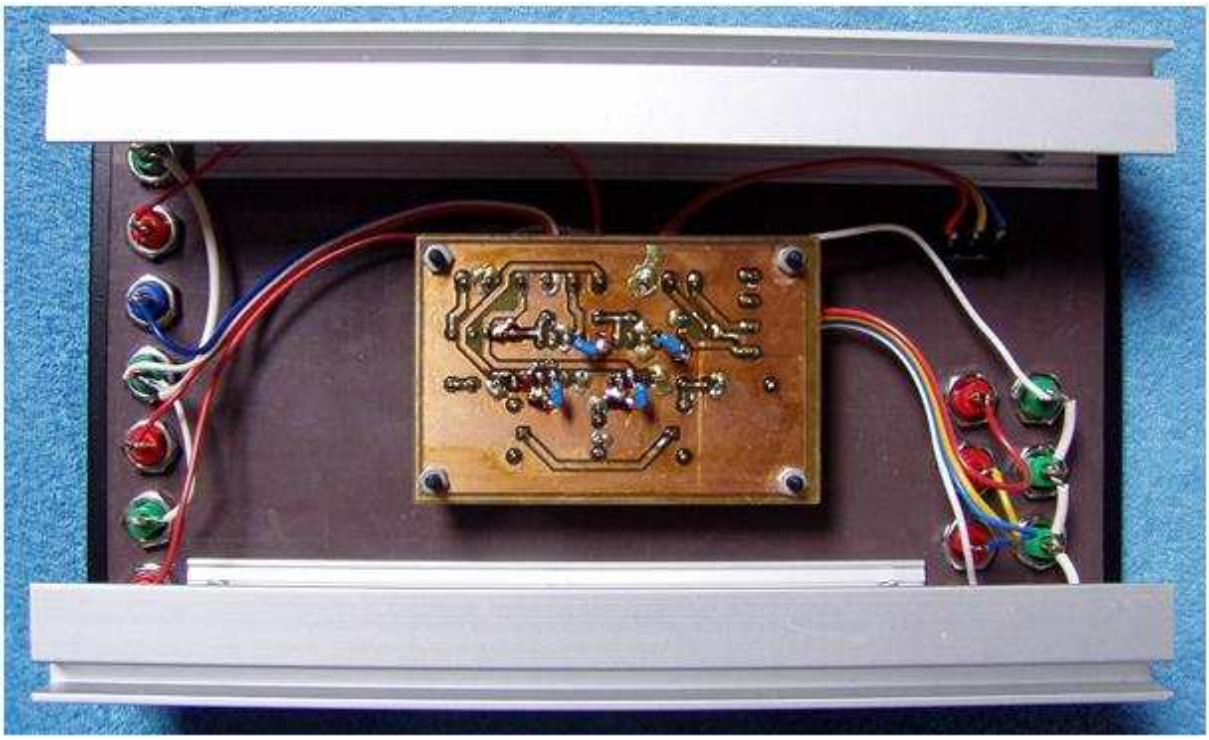
Frekvenční pásmo filtru ze změřených charakteristik je 16 MHz.

Všechny frekvenční charakteristiky byly naměřeny pomocí osciloskopu Tektronix TDS 1012. Jako zdroj vstupního signálu byl použit funkční generátor Agilent s frekvenčním rozsahem 0 – 20MHz. Úroveň vstupního signálu byla $100mV_{p-p}$. Přípravek byl napájen ze zdroje Agilent E3631A s napěťovým rozsahem 0 – ±25V/1A pro napájení integrovaných obvodů a dále s napěťovým rozsahem 0 – 6V/5A, který sloužil jako zdroj řídícího napětí.

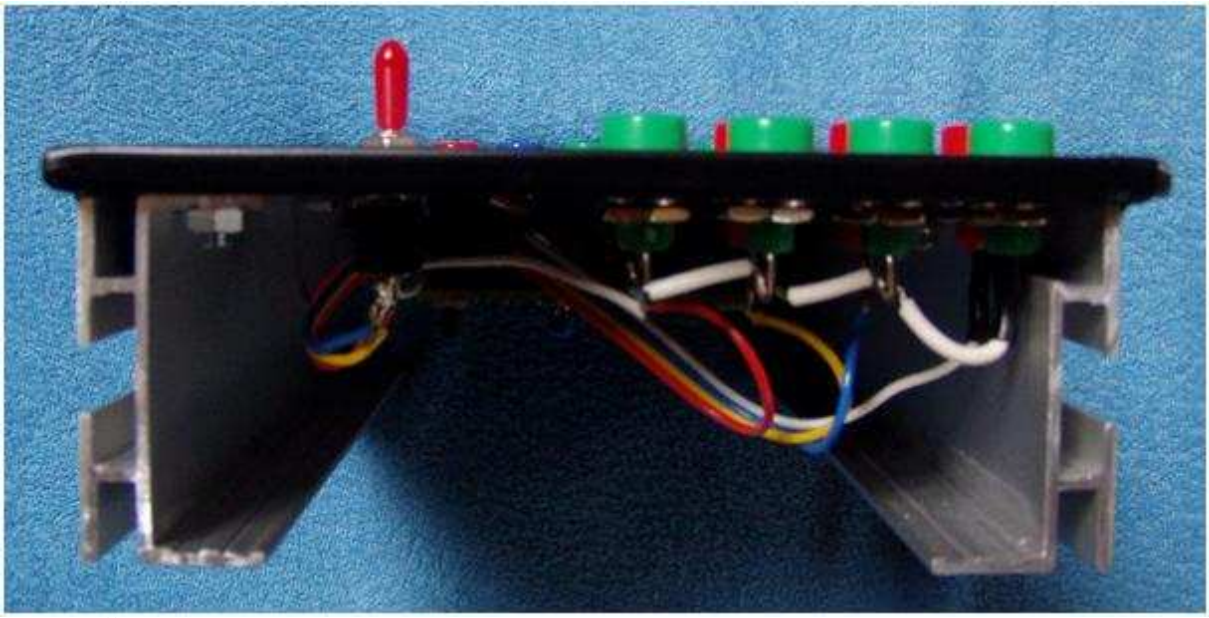
7. NÁHLED NA HOTOVÝ PŘÍPRAVEK



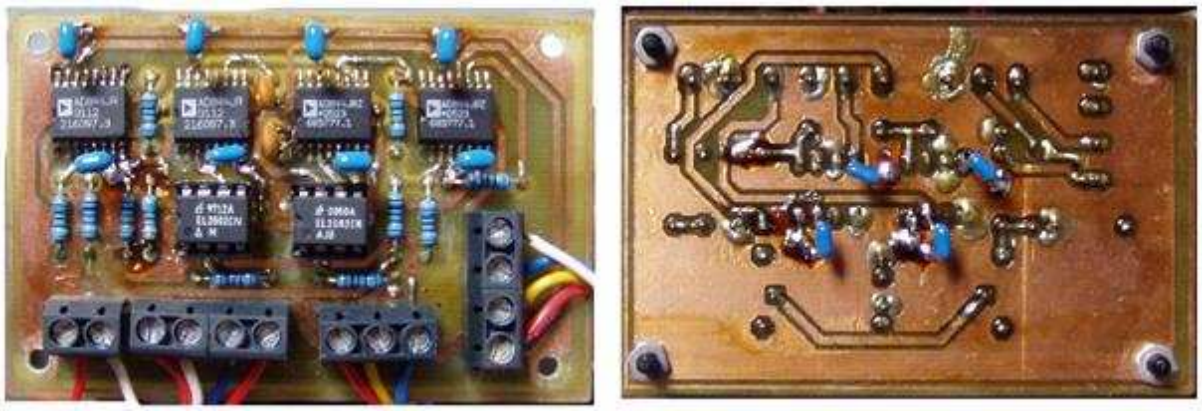
Obr. 43: Vrchní strana


Obr. 44: Spodní strana

Obr. 45: Boční pohled



Obr. 46: Čelní pohled



Obr. 47: Plošný spoj

ZÁVĚR

I přesto, že zapojení s transkonduktory dokáže pracovat s mnohem vyššími kmitočty a má větší strmost frekvenčních modulových charakteristik, jeví se jako vhodnější možnost pro realizaci laboratorního přípravku zapojení s proudovými konvejory. Hlavní výhodou tohoto zapojení je možnost odebírat jednotlivé typy filtrů najednou z různých uzlů obvodu a dále také možnost rozšíření o funkci fázovacího článku.

Dále pak toto zapojení ani žádné jemu podobné nebylo pro laboratorní účely fyzicky zkonstruováno.

Mezní kmitočty frekvenčních charakteristik změřené na přípravku se obzvlášť při malém řídícím napětí neshodují s hodnotami získané ze simulací. U pásmové propusti byl zaznamenán poměrně malý přenos za mezní frekvencí f_{mez2}, který je těsně nad hranicí -3dB.

Přípravek je navržen pro automatizované měření v laboratořích předmětu Analogové elektronické obvody a rozsah řídícího napětí je přizpůsoben řízenému zdroji s rozsahem 0 – 6V.

LITERATURA

[1] DOSTÁ, T., AXMAN, V.: *Elektronické filtry*. VUT

[2] KYSELÍK, M.: *Funkční bloky v proudovém módu*. Semestrální práce, 2003

[3] V. K. SINGH, A. K. SINGH, D. R. BHASKAR, R. SENANI: *Novel mixed-mode universal biquad configuration*. Electronic express 2005

[4] ŠOTNER, R.: *Univerzální filtr 4. řádu s transkonduktory*. Elektrorevue, VUT 2008

[5] ANALOG DEVICES: *AD844 60 MHz, 2000 V/µs Monolithic Op Amp Data Sheet (REV. E)*

[6] A. PENA-PÉREZ, E. TLELO-CUAUTLE, A. DÍAZ-MÉNDEZ, C. SÁNCHEZ-LÓPEZ: *Diseño de un CFOA compatible con CMOS y su Aplicación en Filtros Analógicos.* LATIN AMERICA 2007

[7] INTERSIL: *EL2082 Data Sheet*

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
C	[F]	Kondenzátor
DP	[-]	Dolní propust
FČ	[-]	Fázovací článek
HP	[-]	Horní propust
PP	[-]	Pásmová propust
PZ	[-]	Pásmová zádrž
R	[Ω]	Rezistor
Ω	[-]	Jednotka elektrického odporu